



Artículo original / Original article

Implementación de un sistema piloto de bioenergía para la gestión inteligente de residuos sólidos y generación de energía limpia mediante el aprovechamiento de la cáscara de castaña en la planta de procesamiento ASCART

Implementation of a pilot bioenergy system for the intelligent management of solid waste and generation of clean energy through the use of chestnut shells in the ASCART processing plant

Gilber Rigoberto Martínez-Maceda ^{1*}; Jhosseli Milagros García-Asencios ¹; Rosa América Chávez-Concha ¹

¹ Asociación de castañeros de la Reserva Nacional Tambopata y Parque Nacional Bahuaja Sonene ASCART, Madre de Dios - Perú

Recibido: 12/08/2023
Aceptado: 10/11/2023
Publicado: 20/12/2023

Autor de correspondencia: gilberpem@gmail.com

Resumen: El presente estudio tuvo como objetivo implementar un sistema piloto de bioenergía para la gestión inteligente de residuos sólidos y generación de energía limpia mediante el aprovechamiento de la cáscara de castaña en la planta de procesamiento ASCART, Puerto Maldonado, Madre de Dios. La obtención de la energía eléctrica se realizó mediante procesos termoquímicos que involucraron las operaciones de pirólisis y gasificación de la cáscara de castaña para obtener gases productores, se instaló un sistema simple a escala piloto con capacidades definidas y metodologías probadas científicamente. Los resultados del estudio evidencian la factibilidad y las características ideales de la biomasa experimental para la generación de energía eléctrica que paulatinamente puede sustituir a la energía convencional, sin embargo, se encontró que el sistema instalado actualmente únicamente puede suplir el 14 % de la demanda energética de la planta ASCART.

Palabras clave: Bioenergía; biomasa; *Bertholletia excelsa*; castaña.

Abstract: The objective of this study was to implement a pilot bioenergy system for the intelligent management of solid waste and generation of clean energy through the use of chestnut shells at the ASCART processing plant, Puerto Maldonado, Madre de Dios. Electrical energy was obtained through thermochemical processes that involved pyrolysis and gasification operations of the chestnut shell to obtain producer gases. A simple system was installed on a pilot scale with defined capacities and scientifically proven methodologies. The results of the study show the feasibility and ideal characteristics of experimental biomass for the generation of electrical energy that can gradually replace conventional energy; however, it was found that the currently installed system can only supply 14 % of the demand. energy of the ASCART plant.

Keywords: Bioenergy; biomass; *Bertholletia excelsa*; chestnut.

1. Introducción

En los últimos tiempos, el mundo ha experimentado profundos cambios en sus procesos climáticos propiciados generalmente, por los remanentes de las actividades económicas del hombre; estas actividades, por lo general involucran el uso de combustibles fósiles a diversas escalas; tal es así, que la quema de estos combustibles con fines de obtener energía constituye la principal fuente de generación de los denominados gases invernadero que provocan el cambio climático. Actualmente, esta problemática es de tenor mundial, por lo cual, diversos gobiernos enfrentan el desafío de generar novedosas tecnologías destinadas a reducir los impactos nocivos de las actividades humanas en el mundo (Sosa, 2022). Por otra parte, a nivel de los países en desarrollo, la demanda de energía aumenta día a día, debido a esto, la competencia por los recursos energéticos se vuelve cada vez más dura; esta realidad hace que el mantenimiento del suministro de fuentes de energía adecuadas, sea el desafío más difícil de todos los gobiernos en la era actual (Yao et al., 2019). Asimismo, cabe destacar que la transición de fuentes eléctricas no renovables a fuentes alternativas y renovables se aceleró a un ritmo inesperado en el año 2020, y se estima que habrá una expansión mucho mayor para los años venideros posteriores a la pandemia por COVID-19. De estas fuentes de energía renovables, la biomasa representa una fuente de energía térmica utilizada en prácticamente todos los sectores, convirtiéndose en una alternativa para la diversificación de la matriz energética global, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles (Silva et al., 2022). La biomasa constituye un grupo numeroso de desechos provenientes de la naturaleza y de diversas actividades económicas con características ideales para su reutilización en diversos ámbitos de la industria (Sosa, 2022). El aprovechamiento de estos recursos y el valor agregado que se les pueda conferir, constituyen una de las bases de la economía circular en un enfoque centrado en la sostenibilidad y la reducción de desperdicios, para tales efectos una de las alternativas viables es la generación de energía renovable que permita reducir la huella ambiental.

En Madre de Dios-Perú, una de las actividades económicas más importantes que genera una gran cantidad de biomasa con potencial energético, es la actividad castañera; por ejemplo, en la etapa de descascarado, se calcula que se desecha hasta el 90 % de la masa del producto trabajado (Zapata et al., 2021). En la planta de ASCART, se calcula que en una temporada promedio de procesamiento de castaña se obtienen 320 TN de cáscara, el 70-80 % se queman como combustible para el caldero durante el proceso de secado de la nuez, sobrando entre 64-96 TN que representan gran cantidad de materia prima que, debido a su densidad, similar a la madera, tarda años en descomponerse como compost, constituyendo un problema que acarrea contaminación e incremento de costos operativos en la planta.

Por otra parte, en el año 2021, ASCART emitió un total de 28,99 tCO₂eq, teniendo como principal fuente de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) procedentes del consumo de combustibles por fuentes fijas, fuentes que representa el 35,82 % de las emisiones totales con un total de 10,38 tCO₂eq. De la misma manera, se ha observado que la planta ASCART tiene un consumo elevado de electricidad convencional lo que se traduce en elevados costos operativos. En vista de la problemática identificada, en el presente estudio, se plantea implementar un sistema de bioenergía para la gestión inteligente de residuos sólidos y generación de energía limpia mediante el aprovechamiento de la cáscara de castaña, como una oportunidad de reducir los costos de energía y reemplazar parcialmente la energía comprada de la red con energía renovable producida inicialmente a nivel piloto, utilizando el valor energético de las cáscaras para generar electricidad.

2. Materiales y métodos

La investigación se llevó a cabo en la planta de procesamiento de castaña ASCART ubicada en Pj. Emadi Nro. A-7 Urb. Cercado en la provincia de Tambopata, departamento de Madre de Dios. En esta locación, se implementó un sistema piloto de conversión de la biomasa en energía eléctrica que combina tecnologías comerciales e innovadoras. Los componentes principales del sistema fueron: La unidad de procesamiento de biomasa compuesta por el área preprocesamiento de la materia prima y el área de pirolisis; la unidad de gasificación que consta de dos unidades de gasificación, unidad o sistema de filtración y un sistema generador de energía representados en la Figura 1.

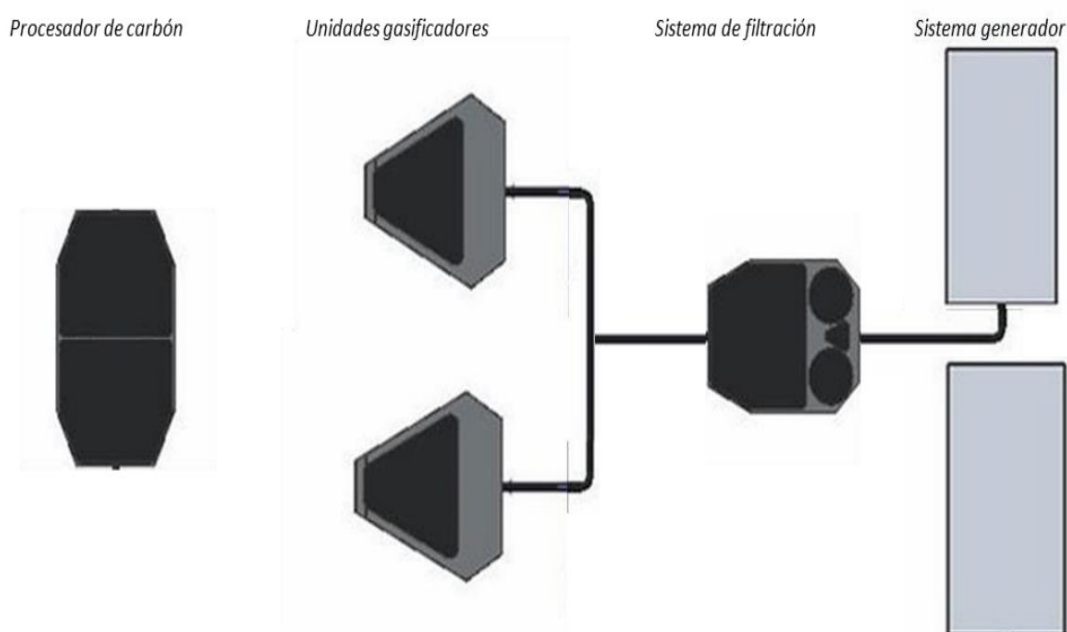


Figura 1. Sistema cerrado diseñado para la generación de energía eléctrica a partir de cáscara de castaña.

2.1. Análisis y técnicas utilizadas

Para el presente estudio se utilizó como biomasa productora de energía, cáscaras de castaña (*Bertholletia excelsa*) procedentes de la planta de procesamiento ASCART durante la zafra 2023.

2.1.1. Análisis físico-químico

En el presente estudio, se realizó un análisis físico-químico de la biomasa a utilizar, en el cual se evaluaron en 100 gr de muestra las concentraciones de los siguientes elementos:

- Fibra cruda: Elemental para la optimización de los procesos de generación de bioenergía. Este parámetro fue evaluado utilizando el método Weende, que involucra un proceso de digestión ácida con ácido sulfúrico, el mismo que se encarga de la descomposición de moléculas como celulosa y hemicelulosa, dejando intactos compuestos como la lignina y trazas de minerales para luego filtrarse, lavarse, secarse y pesarse para calcular el % de fibra por masa de muestra trabajada.
- Cenizas: Como indicador de la idoneidad de la biomasa para generar energía, puesto que altas concentraciones de cenizas pueden indicar la presencia de impurezas no

pertinentes en el proceso como materiales no combustibles, minerales, tierra, etc. Este parámetro fue evaluado por calcinación, método basado en la norma ASTM D-1762, en el cual las muestras son calcinadas en una mufla o horno precalentado a una temperatura de 550 por espacio de 4 horas.

- Humedad: Está relacionada directamente con la eficiencia del proceso de pirolisis, su evaluación es esencial para asegurar la eficiencia de la liberación de calor y estimar el poder calorífico de la biomasa. Este parámetro fue evaluado utilizando el método gravimétrico AOAC 1984, en el cual, se pesaron 5 gramos de muestra para llevarla a la mufla a de 105 °C por dos horas, para luego pesarla y calcular el porcentaje de humedad.
- Proteína total (nitrógeno total) factor: 6,25: Estos parámetros son indicadores importantes de la calidad y pureza de la biomasa; por ejemplo, los niveles elevados de nitrógeno pueden ser indicadores de contaminación de la biomasa que puedan alterar el óptimo proceso de generación de energía. Este parámetro fue evaluado utilizando el método Kjeldahl.
- Carbohidratos: Son importantes para estimar la cantidad de material orgánico como celulosa y hemicelulosa para la producción de biogás. Este parámetro fue evaluado utilizando el método gravimétrico.
- Energía total: Es importante para determinar la cantidad de energía potencial que posee el material utilizado, este análisis es ideal para evaluar la factibilidad del uso de materiales para la generación de bioenergía. Este parámetro fue evaluado utilizando el método de análisis proximato.
- % Kcal proveniente de Carbohidratos: Nos permite determinar la eficiencia potencial de la materia orgánica utilizada como una fuente de energía renovable. Este análisis se relaciona con la calidad de la biomasa y la cantidad de energía que se puede obtener de ella. Este parámetro fue evaluado utilizando el método de cromatografía de Alta Resolución (HPLC).
- % Kcal proveniente de Grasa: Es parte complementaria del análisis de la biomasa y nos da idea de los contenidos de energía de esta ofrece. Este parámetro fue evaluado utilizando el método de cromatografía de Alta Resolución (HPLC).
- % Kcal proveniente de Proteínas: Este parámetro es parte complementaria del análisis de la biomasa y nos da idea de los contenidos de energía de esta ofrece. Este parámetro fue evaluado utilizando el método de cromatografía de Alta Resolución (HPLC).

2.1.2. Muestreo

Para el muestreo de cáscaras de castaña se juntaron las unidades de biomasa procedentes de varios sacos y se apilaron en una superficie plana, luego con ayuda de una regla, se realizó el respectivo cuarteo; posteriormente, se obtuvo una muestra de aproximadamente 400 Kg separados para la obtención de bioenergía. Por otra parte, se separaron 400 g de muestra debidamente guardada herméticamente en bolsas de polietileno y etiquetadas para el análisis físico-químico, cada bolsa contenía 40 g de muestra.

2.2. Procedimientos para la generación de energía eléctrica a partir de biomasa

La obtención de energía eléctrica a partir de cáscara de castaña como biomasa residual, se realizó mediante procesos termoquímicos descritos y diferenciados según (Caputo et al., 2005). Principalmente este proceso hace posible la generación de gases de síntesis para generar energía eléctrica cuya composición pueden cambiar debido a las características de la biomasa empleada, el tipo de gasificador, el fluido de gasificación, y los parámetros de funcionamiento (Corrêa et al., 2019). Asimismo, las etapas de procesamiento se presentan en el flujograma de la Figura 2.

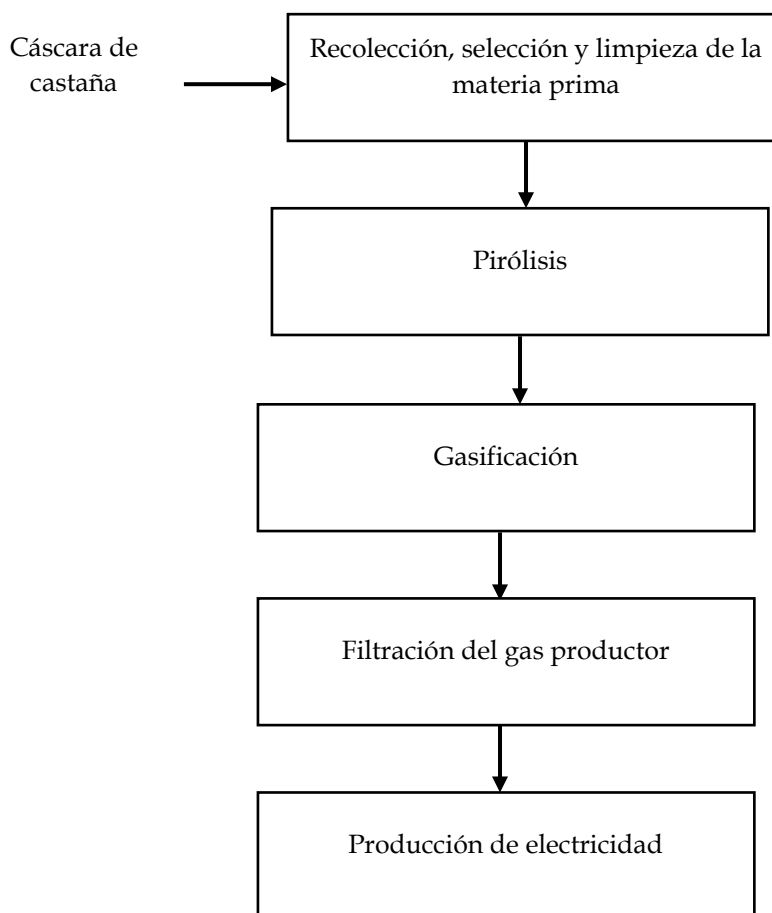


Figura 2. Flujograma para la generación de energía eléctrica a partir de cáscara de castaña.

2.3. Descripción de las etapas del proceso

2.3.1. Recolección, selección y limpieza de la materia prima

La materia prima utilizada en el presente estudio fue cascara de castaña (*Bertholletia excelsa*) procedente de la planta de procesamiento ASCART, la misma que paso por un proceso de selección separándola de impurezas como ramas, tierra y objetos extraños, para luego lavarla con agua corriente.

Pirólisis: En esta etapa, se procesó la biomasa (cáscara de castaña) para obtener biocarbón utilizando la metodología recomendada por Tripathi et al. (2016), en la cual se aplica un proceso de pirolisis en ausencia de oxígeno a 400 °C; esta etapa se llevó a cabo en un procesador por lotes alimentado por un proceso de combustión externa producida por un gas sintético.

Gasificación: El biocarbón resultante seco y libre de impurezas, fue gasificado en ausencia de oxígeno utilizando la metodología recomendada por Ardila (2018), en la cual, el carbón vegetal o biochar es gasificado utilizando como medio de gasificación el vapor de agua en dos sistemas de gasificación totalmente cerrados.

Filtración del gas productor: El gas productor se filtra para separarlo de impurezas y subproductos no deseados, como alquitrán y cenizas.

Producción de electricidad: el gas productor limpio y purificado pasó a un sistema de turbinas de gas en un proceso cerrado para generar energía eléctrica.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis físico-químico de la cáscara de castaña

Los resultados del análisis físico-químico de la materia prima empleada en el presente estudio, se detallan en la Tabla 1.

Tabla 2. Resultados del análisis físico-químico de las cáscaras de castaña.

Valores de % en base a 100g de muestra	
Grasa	1,3
Fibra cruda	38,4
Cenizas	1,5
Humedad	15,1
Proteína total (nitrógeno total) factor: 6,25	3,9 (0,6)
Carbohidratos	78,2
Energía total	340,1
% Kcal proveniente de Carbohidratos	92,0
% Kcal proveniente de Grasa	3,4
% Kcal proveniente de Proteínas	4,6

El análisis fisicoquímico realizado a la biomasa, muestra que este material cuenta con características ideales para el proceso de pirolisis como primera etapa de la generación de energía, así como también, es fuente de compuestos orgánicos importantes cuya combustión posibilita la formación de gases productores necesarios en el proceso planteado.

3.2. Resultados del procesamiento de cáscara de castaña para generar energía eléctrica

La planta de procesamiento ASCART, en cada campaña de extracción de castaña cuenta con 15 000 sacos de cáscara que hacen en promedio 1 125 000 kg de biomasa disponible para la generación de bioenergía.

Tabla 3. Resultados del sistema piloto de generación de bioenergía con Potencia de carga base eléctrica de 10 kW a 60 Hz.

Parámetro evaluado	Resultado
Capacidad del horno de pirolisis	40 Kg de cáscara/carga
Capacidad del gasificador	70 kg de biochar/carga/cada uno
Rendimiento del proceso	1 kWh de electricidad por cada 1,4 kg de cáscara que ingresa al proceso

La planta a escala piloto presenta una potencia de carga base eléctrica de 10 kW a 60 Hz, con una cogeneración térmica de 10 kW. Bajo las operaciones descritas en la metodología, se lograron rendimientos promedio de 1 kWh de electricidad por cada 1,4 kg de cáscara de castaña procesada en 10 horas de funcionamiento con un llenado de tolva de 70 kg de biochar por cada gasificador; se cuenta con dos gasificadores cuya carga se realiza de manera manual. Considerando el promedio de biomasa disponible en cada temporada de proceso, se estima que existe materia prima suficiente para realizar el proceso de generación de energía con los equipos piloto

presentes en la planta. Por otra parte, considerando la potencia contratada de energía convencional de 70 Kw, registrada en el recibo de luz, y la potencia generada por el sistema piloto, esta forma de energía alternativa podría suplir aproximadamente el 14 % de la demanda energética de la planta ASCART.

4. Discusión

El sistema piloto de generación de energía eléctrica a partir de cáscara de castaña presenta características y rendimientos similares a otros sistemas instalados en otros países productores de la nuez, por ejemplo, el sistema descrito por Azcona (2011), instalado en Bolivia, cuenta con una operatividad a nivel doméstico con 9,08 horas de trabajo diario, tiempo cercano al experimentado en el presente estudio, sin embargo presentó una potencia máxima de 41,23 Kw, 4 veces más que el registrado en el presente estudio, las diferencias encontradas en los sistemas de generación de bioenergía, según Pérez et al. (2015) se deben principalmente a las diferencias en las características de los motores utilizados tales como la marca, capacidad y el modelo independientemente de la capacidad de carga que presentes los gasificadores, dicha diferencia tiene relevancia en el tiempo de operatividad y en la practicidad del sistema.

Por otra parte, otros sistemas combinaron el potencial energético de la castaña con materias de importantes contenido lignocelulósico tales como la madera, en el estudio de Zavaleta, (2018), se describe un sistema de generación de energía eléctrica que cuenta con de 90 % cáscara de castaña y 10 % desechos de madera como biomasa, dicho sistema logró la conversión de biomasa de 1MW de energía con un generador 0,75 MW de capacidad en condiciones operativas similares a las utilizadas en el presente estudio.

En cuanto al proceso, se identificaron como etapas claves para la generación de energía eléctrica, la pirolisis y gasificación en la primera, se aplicó una temperatura experimental de 400 °C en ausencia de oxígeno, este parámetro es cercano al aplicado en el estudio de Lefebvre et al. (2018), en el cual la pirolisis de cáscaras de castaña se realiza a 350 °C para la generación de biocarbón; sin embargo en el estudio de P. R. Bonelli et al. (1999) se identificó una temperatura adecuada de 600 °C; esta gran diferencia de temperaturas probablemente se deba a la forma de procesamiento del carbón y al destino final del producto.

En cuanto a los resultados del análisis físico-químico realizado a la cáscara de castaña, las cifras obtenidas fueron similares a las presentadas por Bonelli (2001), con leves variaciones en cuanto a las metodologías de los análisis realizados, adicionalmente, este autor realizó otros análisis de compuestos orgánicos lignocelulósicos encontrando concentraciones que perfilan a la cáscara de castaña como una biomasa con alto potencial de aprovechamiento para la generación de múltiples formas de energía. Asimismo otros autores consideraron como parámetro importante a la humedad de la materia prima para la planificación de las operaciones básicas necesarias para generar energía eléctrica, así, De-Lucas et al. (2012), considera que valores inferiores a 30 % de humedad en la biomasa a utilizar, representa un ahorro en sistemas de secado y mano de obra para su control, en tal sentido, en el presente estudio se trabajó con cáscaras de castaña con humedad de 15,1 % por lo cual no fue necesario un procedimiento previo de secado de la biomasa.

5. Conclusiones

En el presente estudio, se logró la implementación de un sistema piloto para la generación de energía eléctrica utilizando como biomasa la cáscara de castaña, como también, se determinaron rendimientos y parámetros óptimos de procesamiento de la biomasa trabajada, sin embargo, en el presente estudio, se pudo observar que existe la oportunidad de ampliar el sistema piloto debido al espacio disponible en planta, y a la cantidad excedente de cáscara de castaña que se logra recolectar de manera anual.

Financiamiento

El presente estudio fue financiado por PROINNOVATE.

Conflicto de intereses

No existen conflictos de interés.

Contribución de autoría

Conceptualización: Gilber Rigoberto Martínez Maceda,

Metodología: Primer Autor; Jhosseli Milagros García Asencios

Referencias bibliográficas

- Ardila, M. A. (2018). Determinación del potencial de gasificación de carbones de la provincia Centro de Boyacá para combustión en horno túnel/Determination of gasification potential of coal from Central Province of Boyacá for combustion in tunnel kiln. *Prospectiva*, 16(1), 51-59. <https://doi.org/10.15665/rp.v16i1.1178>
- Azcona, S. (2011). *Proyecto piloto de generación de energía eléctrica mediante gasificación en comunidades amazónicas aisladas*. [Tesis de pregrado, Escuela técnica superior de ingenieros Industriales y de Telecomunicación].
- Bonelli, P. (2001). Effect of pyrolysis temperature on composition, surface properties and thermal degradation rates of Brazil Nut shells. *Bioresource Technology*, 76(1), 15-22. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00085-7](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00085-7)
- Bonelli, P. R., Della, P. A., Cerrella, E. G., & Cukierman, A. L. (1999). Pirólisis de residuos lignocelulosicos: un estudio para su caracterización. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 3.
- Caputo, A. C., Palumbo, M., Pelagagge, P. M., & Scacchia, F. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables. *Biomass and Bioenergy*, 28(1), 35-51. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.04.009>
- Corrêa, P. S. P., Zhang, J., Lora, E. E. S., Andrade, R. V., De Mello, L. R., & Ratner, A. (2019). Experimental study on applying biomass-derived syngas in a microturbine. *Applied Thermal Engineering*, 146, 328-337. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.09.123>
- De-Lucas, A., Taranco, C., & Rodríguez-García, E Paniagua, P. (2012). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*. Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario.

- Lefebvre, D., Cabanillas, F., Silman, M., & Fernandez, L. E. (2018). *Producción y utilización de biocarbón*. Cincia.
- Pérez, N. P., Machin, E. B., Pedroso, D. T., Roberts, J. J., Antunes, J. S., & Silveira, J. L. (2015). Biomass gasification for combined heat and power generation in the Cuban context: Energetic and economic analysis. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.095>
- Silva, G. V. da, Farias, D. T. de, Coldebella, R., Wacht, W. L., & Pedrazzi, C. (2022). Biomassa de *Dendrocalamus giganteus* como recurso bioenergético. *Ciência Florestal*, 32(4), 2244-2262. <https://doi.org/10.5902/1980509867680>
- Sosa, E. (2022). Alternativas bioenergéticas de los residuos sólidos urbanos: panorama en México. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 31, 59-76. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.31.2022.5086>
- Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467-481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Yao, S., Lyu, S., An, Y., Lu, J., Gjermansen, C., & Schramm, A. (2019). Microalgae-bacteria symbiosis in microalgal growth and biofuel production: a review. *Journal of Applied Microbiology*, 126(2), 359-368. <https://doi.org/10.1111/jam.14095>
- Zapata, X., Rosero, J. J., & Estupiñan, H. A. (2021). Comparison of Treatments by Mercerization and Plasma Glow Discharge on Residues of the Amazon Chestnut Shell (*Bertholletia Excelsa*). *Ingeniería e Investigación*, 42(1), e86698. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v42n1.86698>
- Zavaleta, P. (2018). Análisis de impactos productivos y ambientales de la implementación de ventiladores y cambio de combustible en ladrilleras artesanales de Riberalta, Beni. *Acta nova*, 8(4), 679-699.