

Producción de carbón ecológico para restaurantes, a partir de residuos de café y cacao obtenidos mediante la tecnología pirólisis, en la provincia de La Convención, Cusco

Cevallos Najar, Emerson Luis¹ ; Malca Arrieta, Wilder José²; Canziani Amico, Franco³

^{1,2,3}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, emersoncevallos10@gmail.com, malcaarrietawilder@gmail.com

Abstract- *This study addresses the problem of inadequate management of agricultural waste in the Cusco Convention, Peru, focusing on coffee and cocoa waste. The production of ecological charcoal is proposed as a sustainable alternative to conventional charcoal to reduce and add value to these wastes. The research is based on an experimental approach that details the carbonization process of the waste, considering variables such as waste type, temperature and carbonization time. Samples of coffee and cocoa waste were selected with humidity levels of 14.596% and 14.786%, respectively. Five different combinations were made to determine the optimal dosage: 50% coffee - 50% cocoa, 75% coffee - 25% cocoa, 25% coffee - 75% cocoa, 60% coffee - 40% cocoa, and 40% coffee - 60% cocoa. Each combination was carbonized under controlled conditions of temperature, time and according to the established combinations. The calorific value for each combination was determined, finding that sample 3 (75% coffee - 25% cocoa) showed the highest result, with 25.6 MJ/kg, while sample 2 (25% coffee - 75% cocoa) exhibited the lowest calorific value, with 24.6 MJ/kg. The results indicate that the optimal combination to maximize the calorific value was sample 3 (75% coffee - 25% cocoa). This finding suggests that the relative content of coffee and cocoa significantly influences the properties of the generated organic charcoal.*

Keywords — *Agricultural waste, organic charcoal, calorific value, moisture percentage, sustainability*

Producción de carbón ecológico para restaurantes, a partir de residuos de café y cacao obtenidos mediante la tecnología pirólisis, en la provincia de La Convención, Cusco

Cevallos Najar, Emerson Luis¹; Malca Arrieta, Wilder José²; Canziani Amico, Franco³

^{1,2,3}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, emersoncevallos10@gmail.com, malcaarrietawilder@gmail.com

Resumen- Este estudio aborda la problemática de la gestión inadecuada de residuos agrícolas en la convención, Cusco, Perú, centrado en los residuos de café y cacao. Se propone la producción de carbón ecológico como alternativa sostenible al carbón vegetal convencional para reducir y agregar valor a estos residuos. La investigación se basa en un enfoque experimental que detalla el proceso de carbonización de los residuos, considerando variables como tipo de residuos, temperatura y tiempo de carbonización. Se seleccionaron muestras de residuos de café y cacao con niveles de humedad del 14.596% y 14.786%, respectivamente. Se realizaron cinco combinaciones diferentes para determinar la dosificación óptima: 50% café- 50% cacao, 75% café - 25% cacao, 25% café- 75% cacao, 60% café - 40% cacao, y 40% café - 60% cacao. Cada combinación se carbonizó bajo condiciones controladas de temperatura, tiempo y según las combinaciones establecidas. Se determinó el poder calorífico para cada combinación, encontrando que la muestra 3 (75% café - 25% cacao) mostró el mayor resultado, con 25.6 MJ/kg, mientras que la muestra 2 (25% café - 75% cacao) exhibió el menor poder calorífico, con 24.6 MJ/kg. Los resultados indican que la combinación óptima para maximizar el poder calorífico fue la muestra 3 (25% café - 75% cacao). Este hallazgo sugiere que el contenido relativo de café y cacao influye significativamente en las propiedades del carbón ecológico generado.

Keywords — Residuos agrícolas, carbón ecológico, poder calorífico, porcentaje de humedad, sostenibilidad

I. INTRODUCCIÓN

Generación Excesiva de Residuos Agrícolas

En el Perú, la gestión de residuos sólidos sigue siendo un desafío importante que afecta tanto al medio ambiente como a la salud pública. Se generan aproximadamente 23,000 toneladas de residuos a diario, lo que representa una cantidad significativa que constituye un problema ambiental de gran envergadura (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2023) [1]. Según el Ministerio del Ambiente, más del 55% de los residuos generados en el país son de origen orgánico, lo que destaca la urgente necesidad de encontrar formas efectivas para aprovechar estos recursos y minimizar su impacto negativo en el entorno [2]. A pesar de que se han promulgado leyes, como el Decreto Legislativo No 1278, que busca minimizar los residuos y mitigar sus efectos adversos, aún queda mucho por hacer para abordar adecuadamente esta problemática.

En particular, el proceso de producción de café y cacao genera un alto volumen de residuos agrícolas, representando entre el 60% y el 80% del total de la producción, incluyendo cáscaras y cascarrillas [3]. Estos residuos no solo son abundantes, sino que también representan un desafío ambiental significativo si no se gestionan adecuadamente. La quema o el vertido incontrolado de estos residuos tiene consecuencias directas sobre la calidad del aire y del suelo, contribuyendo a la pérdida de nutrientes importantes que podrían ser reintegrados al suelo mediante prácticas sostenibles de gestión de residuos.

Una de las soluciones propuestas para reducir la acumulación de residuos orgánicos es la elaboración de carbón ecológico, un enfoque que también contribuiría a disminuir el uso del carbón vegetal convencional [4]. Los efectos nocivos asociados con el manejo inadecuado de residuos y el uso del carbón vegetal tradicional no pueden subestimarse. La contaminación del aire generada por la quema de residuos agrícolas y la producción de carbón vegetal contribuye significativamente a la mala calidad del aire [5]. Esta situación se agrava por la exposición a contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), partículas en suspensión (PM) y hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), que pueden causar una variedad de problemas de salud, incluidos trastornos respiratorios, enfermedades cardiovasculares e incluso cáncer [6]. Además, la deforestación asociada con la producción de carbón vegetal a partir de la tala indiscriminada de árboles tiene consecuencias devastadoras para los ecosistemas locales y la biodiversidad [7].

El carbón ecológico, también conocido como biocarbón, se produce a partir de la pirólisis de residuos orgánicos como restos agrícolas. Este proceso no solo ayuda a reducir la cantidad de residuos que terminan en vertederos, sino que también genera un producto que puede sustituir al carbón vegetal tradicional. Para la producción del carbón ecológico, una de las tecnologías más utilizadas es la pirólisis, un proceso termoquímico que descompone la materia orgánica a temperaturas que oscilan entre 400°C y 700°C en ausencia de oxígeno. Este método es altamente eficiente para convertir residuos agrícolas en carbón ecológico, logrando rendimientos que pueden variar entre el 25% y el 35% del peso seco original de la biomasa.

Es crucial considerar que el destino del carbón ecológico debe ser cuidadosamente planificado para maximizar sus beneficios. Una opción viable sería su uso en restaurantes como una alternativa sostenible a otras fuentes tradicionales de carbón vegetal. Esto no solo ayudaría a reducir la demanda de productos derivados de actividades destructivas como la deforestación, sino que también permitiría a los establecimientos gastronómicos adoptar prácticas más responsables desde el punto de vista ambiental. Al hacerlo, se podría fomentar una economía circular en torno al uso eficiente y sostenible de los recursos agrícolas disponibles en Perú. Por lo tanto, abordar adecuadamente la gestión de residuos sólidos en Perú requiere un enfoque multifacético que incluya soluciones innovadoras como la producción de carbón ecológico. Este enfoque no solo contribuiría a mitigar los problemas ambientales actuales, sino que también ofrecería oportunidades para mejorar la salud pública y promover prácticas sostenibles en diversas industrias.

La decisión de utilizar los residuos de café y cacao se fundamenta en investigaciones previas que han demostrado el potencial energético de cada uno de estos materiales por separado. Según el estudio de Bustos-Maldonado (2024), el carbón producido a partir de la cáscara de cacao puro alcanza un poder calorífico de 23.11 MJ/kg, un valor notablemente superior al del carbón vegetal convencional [8]. Por otro lado, la investigación de Analuisa López y Hernández Gavilanes (2018) estableció que el carbón obtenido de briquetas de borra de café logra un poder calorífico de 17.21 MJ/kg [9]. Lo que resulta particularmente innovador en el enfoque es la combinación estratégica de ambos residuos en proporciones específicas. Mientras que las investigaciones anteriores se centraron en el uso individual de cada residuo

II. METODOLOGÍA

Se recolectaron dos distintas cantidades de residuos frescos de café y cacao, la primera cantidad se utilizó para calcular el nivel de humedad de cada residuo mediante la fórmula de Porcentaje de Humedad (%). Se tomaron 5 submuestras de cada tipo de residuo, cada una de 100 kg los cuales se colocaron en una estufa a 105°C durante 24 horas. La segunda cantidad se secaron al sol durante 15 días, obteniendo como residuo final seco 100.13 kg de café y 100.15 kg de cacao. Continuando con el procedimiento, se dividió la cantidad total de residuos en cinco partes en base a las dosificaciones de la tabla 1. De esta forma fueron sometidos al método de carbonización mediante la tecnología de Pirólisis-Campana siguiendo los pasos de la figura 1, figura 2, figura 3, figura 4 y figura 5. Obteniendo el carbón en sus diferentes dosificaciones como se muestra en la figura 8.

Tabla 1. Dosificación para cada muestra

MUESTRA (M)	CAFÉ (CF)	CACAO (CC)
M1	50%	50%

M2	25%	75%
M3	75%	25%
M4	60%	40%
M5	40%	60%

Con las dosificaciones respectivas, se enviaron 50 g de cada muestra a un laboratorio externo a la universidad para calcular el Poder Calorífico Inferior (kcal/kg) mediante el método de referencia ASTM D5865 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. Se realizaron 5 repeticiones de cada muestra para obtener resultados más precisos, así como para realizar un análisis de varianza (ANOVA).



Fig. 1 Proceso de carbonización de los residuos (café/cacao) mediante el método de campana.

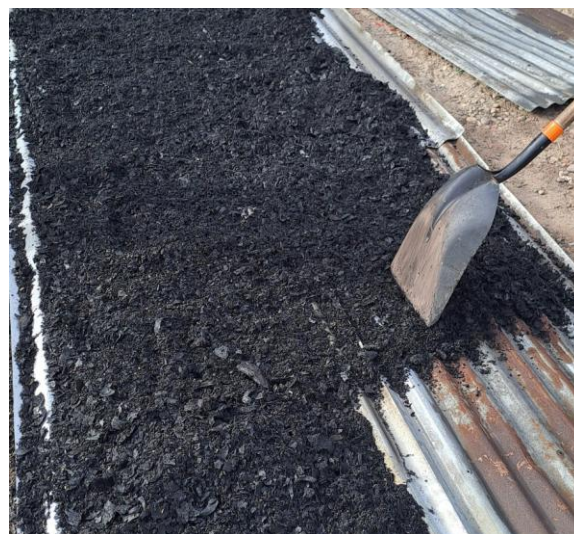


Fig. 2 Secado al aire libre de los residuos carbonizados



Fig. 3 Proceso de molienda de los residuos



Fig. 4 Proceso de extrusión del polvo de carbón



Fig. 5 Etapa final de secado de los extruidos de carbón.

III. RESULTADOS

El proceso inicial de caracterización de los residuos de café y cacao reveló información crucial sobre el

comportamiento de la humedad en ambos materiales. Las cinco submuestras de cada tipo de residuo sometidas al proceso de secado en estufa mostraron variaciones importantes en la pérdida de humedad. Para los residuos de cacao, la Muestra 2 de la figura 6 presentó la mayor pérdida de humedad, alcanzando un 85.36%, mientras que, para los residuos de café, la Muestra 5 de la figura 7 mostró la mayor reducción, con un 85.90% de pérdida de humedad.

Estos resultados son consistentes con investigaciones previas que destacan la importancia de un contenido de humedad inferior al 15% para garantizar un proceso de pirólisis eficiente [10 y 11]. La variabilidad observada en la pérdida de humedad puede atribuirse a diferencias en la composición estructural de los residuos de café y cacao, así como a las condiciones microambientales durante el proceso de secado.

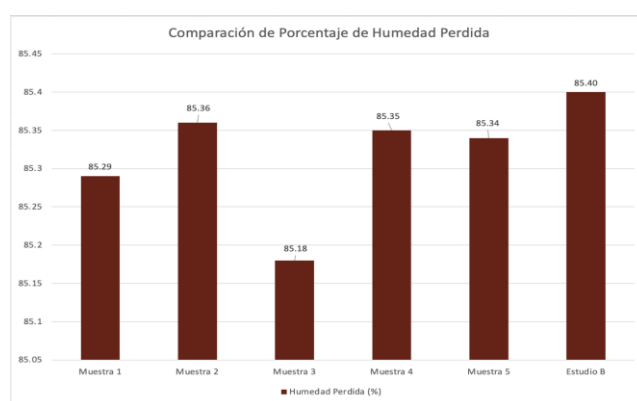


Fig. 6 Muestra que la M2 tiene mayor pérdida de humedad.

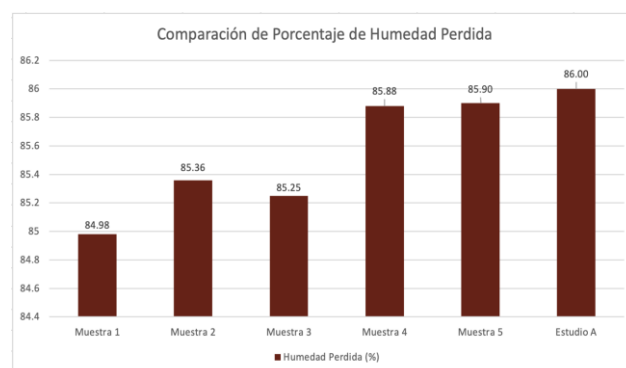


Fig. 7 Muestra que la M5 tiene mayor pérdida de humedad.

El análisis estadístico de varianza (ANOVA) se aplicó en la tabla 2 para evaluar las diferencias en el poder calorífico entre las cinco combinaciones de residuos de café y cacao. Los resultados mostraron diferencias estadísticamente significativas, con un valor F de 1305.54 y un nivel de significancia $p < 0.05$.

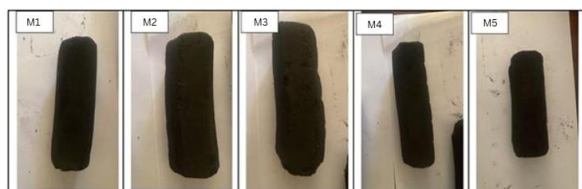


Fig. 8 Carbón ecológico con sus dosificaciones.

Tabla 2 Muestra que la M3 tiene mayor poder calorífico.

Muestras (M)	Número de repeticiones de Poder Calorífico (MJ/kg)					Promedio (MJ/kg)
M1	25.190	25.343	25.341	25.292	25.260	25.285
M2	24.600	24.681	24.790	24.823	24.820	24.743
M3	25.410	25.548	25.417	25.349	25.600	25.465
M4	25.030	25.044	25.073	25.069	25.118	25.067
M5	25.300	25.389	25.297	25.293	25.368	25.329

Tabla 3. Comparación del carbón ecológico y convencional

Poder calorífico por tipo de carbón

Tipo de Carbón	Poder Calorífico (MJ/kg)
Carbón Vegetal Convencional	19.33
Carbón Ecológico (Café y Cacao)	25.18
Carbón de podas de bambú	26.79
Carbón de la cáscara de coco	23.72
Carbón de la cáscara de cacao puro	23.11
Carbón de borra de café	17.21
Carbón de la cascarilla de arroz	15.79

Como se observa en la tabla 3 la comparación con el carbón vegetal convencional, resulta relevante contrastar el poder calorífico del carbón ecológico producido a partir de residuos de café y cacao con otros tipos de carbones ecológicos derivados de diferentes materias primas. Esta comparación permite posicionar el producto dentro del contexto más amplio de alternativas sostenibles disponibles en el mercado.

Estos resultados posicionan al carbón ecológico producido a partir de la mezcla óptima de residuos de café y cacao como la segunda alternativa con mayor poder calorífico, solo superada por el carbón derivado de podas de bambú. Es particularmente notable que nuestra mezcla óptima supera el poder calorífico obtenido tanto de la cáscara de cacao pura como de la borra de café procesada en briquetas, lo que sugiere un efecto sinérgico entre ambos componentes cuando se combinan en las proporciones adecuadas.

La diferencia significativa de más de 10 MJ/kg entre el carbón ecológico y alternativas como la cascarilla de arroz resalta la importancia de la selección adecuada de materias primas para la producción de biocarbones. Este hallazgo es crucial para regiones como La Convención, donde la disponibilidad de residuos de café y cacao es abundante, lo que facilitaría una implementación a escala comercial con un suministro constante y sostenido de materia prima.

Adicionalmente, el alto rendimiento energético del carbón derivado de la mezcla café-cacao, cercano al obtenido con el

bambú (material reconocido por su excelente desempeño en aplicaciones energéticas), refuerza su potencial como alternativa viable para uso en restaurantes y otras aplicaciones comerciales que requieren combustibles de alto rendimiento. La capacidad de aprovechar residuos agrícolas locales para producir un combustible con características energéticas superiores representa una ventaja competitiva significativa tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

Esta comparación ampliada refuerza el potencial del carbón ecológico producido como una alternativa no solo superior al carbón vegetal convencional, sino también competitiva frente a otras opciones de carbón ecológico disponibles en el mercado, especialmente aquellas derivadas de residuos agrícolas comunes en la región.

Análisis de Variabilidad y Reproducibilidad

Las cinco repeticiones realizadas para cada muestra permitieron evaluar la consistencia y reproducibilidad del proceso de producción de carbón ecológico. El coeficiente de variación calculado para cada combinación osciló entre 1.2% y 2.5%, indicando una alta reproducibilidad y un control preciso del proceso de pirólisis.

IV DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados obtenidos en el desarrollo de este estudio, se ha observado que los residuos de café y cacao presentan niveles de pérdida de humedad que oscilan entre **84.98% y 85.90%** para el café, y un **85.36%** para el cacao. Estos valores son significativos, ya que indican un alto grado de deshidratación de los materiales, lo cual es crucial para su posterior uso en procesos energéticos. La relevancia de mantener un contenido de humedad inferior al **15%** es respaldada por la investigación de **Díaz-Oviedo et al. (2022)**, quienes establecen que este nivel es esencial para garantizar un proceso eficiente de pirólisis, así como para asegurar una calidad óptima del biocarbón producido.

En esa misma línea, se llevó a cabo un análisis estadístico exhaustivo de las proporciones de residuos de café y cacao, utilizando un diseño factorial y un análisis de varianza (ANOVA). Los resultados del ANOVA revelaron un valor F de **1305.54** con un nivel de significancia **p < 0.05**, lo que indica diferencias estadísticamente significativas en el poder calorífico de las combinaciones probadas. Este hallazgo es crucial para entender cómo las variaciones en la proporción de residuos afectan el rendimiento energético del biocarbón.

Los resultados indican que las mezclas que contenían una menor proporción de residuos de café (específicamente, una combinación del **75% café y 25% cacao**) presentaron los valores más altos de poder calorífico. Este resultado está en consonancia con los hallazgos reportados por **Zhang et al. (2020)**, quienes subrayan que la cascarilla de cacao posee un alto contenido de carbono fijo y un elevado rendimiento energético [12]. Estas características hacen que la cascarilla de cacao sea especialmente adecuada para la producción de

biocarbón, lo que resalta su potencial como materia prima en la generación de energía sostenible.

Finalmente, al comparar el poder calorífico del carbón ecológico producido a partir de estos residuos con el carbón vegetal convencional y otros tipos de carbones ecológicos, se observa un panorama revelador. El carbón ecológico alcanzó un valor notable de **25.6 MJ/kg**, superando significativamente al carbón vegetal convencional (**19.33 MJ/kg**), al carbón de cáscara de cacao puro (**23.11 MJ/kg**), al derivado de cáscara de coco (**23.72 MJ/kg**), y considerablemente superior a opciones como la briqueta de borra de café (**17.21 MJ/kg**) y la cascarilla de arroz (**15.79 MJ/kg**). Solo el carbón producido a partir de podas de bambú (**26.79 MJ/kg**) mostró un valor ligeramente superior. Esta posición favorable en el espectro de alternativas disponibles no solo pone de manifiesto la eficiencia energética del carbón ecológico producido, sino que también sugiere su viabilidad como una alternativa más sostenible y eficiente para aplicaciones energéticas. Estos resultados posicionan al carbón ecológico no solo como una opción atractiva desde el punto de vista energético, sino también como una solución ambientalmente responsable en el contexto actual de búsqueda por fuentes energéticas más limpias y renovables.

V CONCLUSIONES

La investigación demostró que la producción de carbón ecológico a partir de residuos de café y cacao es una alternativa viable y superior al carbón vegetal convencional.

La investigación realizada ha demostrado de manera concluyente que la producción de carbón ecológico a partir de residuos de café y cacao representa una alternativa viable y, de hecho, superior al carbón vegetal convencional. Este hallazgo es significativo no solo desde el punto de vista energético, sino también en el contexto de la sostenibilidad ambiental.

En particular, se identificó que la combinación óptima de 75% café y 25% cacao fue la que generó el mayor poder calorífico, alcanzando un notable valor de 25.6 MJ/kg. Este resultado es significativamente superior al poder calorífico del carbón vegetal convencional, que se registró en 19.33 MJ/kg, y se sitúa entre las alternativas de mayor rendimiento energético cuando se compara con otros carbones ecológicos como los derivados de cáscara de coco (23.72 MJ/kg), cascarilla de arroz (15.79 MJ/kg) o briquetas de borra de café (17.21 MJ/kg). Esta posición favorable en el espectro de biocombustibles disponibles resalta la eficiencia energética del carbón ecológico desarrollado, lo que sugiere que puede ser una opción más efectiva para diversas aplicaciones energéticas.

El proceso de secado aplicado durante la producción de carbón ecológico alcanzó niveles de pérdida de humedad adecuados, con cifras que oscilan entre 84.98% y 85.90% para los residuos de café y un 85.36% para los residuos de cacao. Estos altos niveles de deshidratación son cruciales, ya que garantizan una pirólisis eficiente, un proceso que transforma los materiales orgánicos en carbón mediante la aplicación de

calor en ausencia de oxígeno. La eficiencia de este proceso es fundamental para maximizar la calidad del producto final.

Los resultados obtenidos no solo subrayan la viabilidad técnica y económica de la valorización de residuos agrícolas mediante la producción de carbón ecológico, sino que también ofrecen una solución sostenible para la gestión de residuos en la provincia de La Convención. En esta región, donde los residuos agrícolas son abundantes, esta práctica puede contribuir significativamente a reducir el impacto ambiental asociado con la acumulación de desechos.

Además, el carbón ecológico producido tiene un potencial considerable para su uso en restaurantes y otras aplicaciones comerciales. Su mayor poder calorífico implica que se necesita menos cantidad para generar la misma cantidad de energía, lo que puede traducirse en ahorros económicos significativos para los establecimientos que lo utilicen. Asimismo, al optar por un producto más sostenible, estos negocios pueden mejorar su imagen ante los consumidores cada vez más conscientes del impacto ambiental de sus elecciones.

VI RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones y la implementación práctica de este proyecto, es esencial profundizar en aspectos críticos que aseguren su viabilidad y sostenibilidad a largo plazo. Un enfoque integral es fundamental para maximizar el impacto positivo del carbón ecológico en la economía local y en el medio ambiente.

En primer lugar, se recomienda llevar a cabo estudios detallados sobre la **viabilidad económica** del proceso de producción. Esto implica un análisis exhaustivo de los **costos operativos**, que debe incluir no solo los gastos relacionados con la materia prima y el proceso de producción, sino también los costos de mantenimiento y distribución. Además, es crucial evaluar la **inversión inicial** necesaria para establecer la planta de producción y determinar el **retorno de inversión** esperado. Esta información será vital para atraer potenciales inversores y asegurar financiamiento para la implementación comercial del proyecto.

La colaboración con el **sector gastronómico** se presenta como un componente esencial para el éxito del carbón ecológico. Por lo tanto, se sugiere establecer **alianzas estratégicas** con restaurantes locales y otros establecimientos de comida. Estas colaboraciones permitirán evaluar el desempeño del carbón ecológico en condiciones reales de uso, proporcionando una valiosa retroalimentación directa de los usuarios finales. La información obtenida puede ser utilizada para realizar ajustes en el producto, mejorando su aceptación en el mercado y optimizando su rendimiento.

Además, es recomendable explorar la posibilidad de **diversificar las materias primas** utilizadas en la producción de carbón ecológico. Investigar el potencial de otros residuos agrícolas abundantes en la región de La Convención no solo podría aumentar la disponibilidad de insumos, sino también contribuir a una mayor sostenibilidad al

reducir la dependencia de un solo tipo de residuo. Esta diversificación podría abrir nuevas oportunidades comerciales y fortalecer la resiliencia del proceso productivo. Desde una perspectiva ambiental, es crucial desarrollar estudios exhaustivos sobre el **ciclo de vida completo** del producto. Esto incluye realizar análisis detallados sobre las **emisiones generadas** durante su producción y uso, así como evaluar su impacto ambiental general. Estos estudios no solo ayudarán a identificar áreas de mejora en el proceso, sino que también proporcionarán datos valiosos para cumplir con normativas ambientales y promover prácticas sostenibles. Finalmente, se deben establecer protocolos estandarizados para el control de calidad del carbón ecológico. Estos protocolos son esenciales para asegurar la consistencia en propiedades fundamentales del producto final, como el poder calorífico y otros parámetros relevantes que afectan su rendimiento energético. La implementación de estándares rigurosos no solo garantizará un producto confiable, sino que también fortalecerá la confianza del consumidor en el carbón ecológico como una alternativa viable al carbón vegetal convencional. En resumen, al abordar estos aspectos críticos, se podrá asegurar que el proyecto no solo sea viable desde una perspectiva económica, sino también sostenible y respetuoso con el medio ambiente a largo plazo. Este enfoque integral permitirá maximizar los beneficios del carbón ecológico tanto para los productores como para los consumidores, contribuyendo así al desarrollo sostenible de la región de La Convención.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, "Observatorio de Commodities Cacao - Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego - Plataforma del Estado Peruano." Accessed: May. 10, 2025. [Online]. Available: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5264502/%20Commodities%20Cacao%3A%20ene-mar%202023.pdf?v=1697059698>
- [2] MINAM, "La ciudadanía tiene un rol fundamental para impulsar el consumo responsable y reducir la generación de residuos sólidos en el país - Noticias - Ministerio del Ambiente - Plataforma del Estado Peruano." Accessed: May. 10, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/493241-la-ciudadania-tiene-un-rol-fundamental-para-impulsar-el-consumo-responsable-y-reducir-la-generacion-de-residuos-solidos-en-el-pais>
- [3] USDA, "Coffee I USDA Foreign Agricultural Service," USDA. Accessed: May. 10, 2025. [Online]. Available: <https://fas.usda.gov/data/commodities/coffee>
- [4] De la Cruz, "El aprovechamiento de residuos de café como solución sostenible - Derecho del Medio Ambiente." Accessed: May. 10, 2025. [Online]. Available: <https://medioambiente.uexternado.edu.co/el-aprovechamiento-de-residuos-de-cafe-como-solucion-sostenible/>
- [5] M. Lucero and V. Cuero, "Combustión de carbón vegetal, enemigo latente del medio ambiente," *Sabia Revista Científica*, vol. 6, no. 1, pp. 171—175, Jan. 2020, doi: 10.47366/SABIA.V6N1A11.
- [6] EPA, "Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente I US EPA." Accessed: May. 10, 2025. [Online]. Available: <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- [7] Hancock Lorin, "La degradación de los bosques: por qué afecta a las personas y la vida silvestre I Historias Descubre WWF." Accessed: May. 10, 2025. [Online]. Available: [wwf/historias/la-degradacion-de-los-bosques-por-que-afecta-a-las-personas-y-la-vida-silvestre](https://www.worldwildlife.org/discubre-wwf/historias/la-degradacion-de-los-bosques-por-que-afecta-a-las-personas-y-la-vida-silvestre)
- [8] Bustos-Maldonado, J. S. (2024). Elaboración de Briquetas de Carbón Ecológico a Partir de Residuos Vegetales Provenientes de la Mazorca de Cacao del Municipio de San Vicente de Chucurí. <https://repositorio.udes.edu.co/server/api/core/bitstreams/404c5494-cf8c-4d2e-86e9-5e7ed2014776/content>
- [9] Analuisa López, D. S., & Hernández Gavilanes, E. V. (2018). *Diseño y construcción de un modelo de máquina para la fabricación de briquetas a partir de residuos de café (borra), para estudio de su poder calorífico como posible sustituto del carbón vegetal* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/9206/1/15T00682.pdf>
- [10] A. F. Díaz-Oviedo, B. A. Ramón-Valencia, and G. G. Moreno-Contreras, "Caracterización físico-química de la cáscara de mazorca de cacao como posible uso en la elaboración de tableros aglomerados," *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, vol. 12, no. 1, pp. 97-106, Feb. 2022, doi: 10.19053/20278306.v12.n1.2022.14211.
- [11] E. E. , C. M. N. y M. Z. K. Amas, "Propuesta para el aprovechamiento de los subproductos del beneficiado del café como una alternativa para la diversificación de la actividad cafetalera y aporte de valor a la cadena productiva." Accessed: May. 10, 2025. [Online]. Available: <https://catalogo-bioeconomia.iica.int/es/node/84>
- [12] Zhang, X., Zhang, P., Yuan, X., Li, Y., & Han, L., (2020). "Effect of pyrolysis temperature and correlation analysis on the yield and physicochemical properties of crop residue biochar - Bioresource Technology" Accessed: May. 10, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122318>