



Fecha de recibido: 14-03-2024

Fecha de aceptado: 25/06/2024

DOI: 10.22490/21456453.7822

BIOCARBÓN DE PULPA DE CAFÉ Y RAQUIS DE PALMA CON POTENCIAL PARA USO AGRÍCOLA EN EL TRÓPICO SECO

COFFEE PULP AND PALM RACHIS BIOCHAR WITH POTENTIAL FOR AGRICULTURAL DRY TROPICS USE

Sonia Esperanza Aguirre Forero ¹

José Villa Parejo ²

Nelson Virgilio Piraneque Gambasica ³

¹ Doctora en Ciencias Agrarias, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.
saguirre@unimagdalena.edu.co

² Magister en Ingeniería, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia.
jvilla@unimagdalena.edu.co

³ Doctor en Ciencias Agropecuarias, Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. npiraneque@unimagdalena.edu.co

Citación: Aguirre, S., Villa, J., y Piraneque, N. (2025). Biocarbón de pulpa de café y raquis de palma con potencial para uso agrícola en el trópico seco. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 16(1), 157 - 183. <https://doi.org/10.22490/21456453.7822>

RESUMEN

Contextualización: la caracterización y análisis de biocarbón derivado de raquis de palma y pulpa de café es fundamental para aprovechar adecuadamente los residuos orgánicos, además es trascendental para el desarrollo de obtención de materiales promisorios para el manejo del suelo del trópico seco. La investigación se orientó a caracterizar biocarbón obtenido de la biomasa de Pulpa de Café y el Raquis de Palma, variando la temperatura de pirólisis en 250, 300 y 350 °C en un horno mufla de 64 litros.

Vacío de conocimiento: los estudios de caracterización y análisis de biocarbón en la región Caribe son escasos, lo que resalta la necesidad de realizar estudios para recopilar información que pueda mejorar la comprensión, el proceso, el manejo y la aplicación del biocarbón como mejorador de suelos en esta área.

Propósito: el objetivo fue evaluar contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa y caracterizar el biocarbón obtenido (Dr, retención de humedad, pH, CE, CIC y contenido de nutrientes).

Metodología: el análisis de los contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa se realizó utilizando los métodos de fibra detergente ácida (ADF) y lignina detergente ácida (ADL), y la caracterización del biocarbón, retención de humedad, pH (1:2) por potenciometría, conductividad eléctrica (CE) conductímetro, densidad real (Dr), contenidos totales de K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Bo, Cu, Zn y Si, por digestión ácida y espectrofotometría de absorción atómica.

Resultados y conclusiones: se evidenció que el biocarbón obtenido de la pulpa de café (BPT1, BPT2 y BPT3) respecto a los parámetros evaluados es más favorable para la producción agrícola en comparación con los biocarbón de raquis de palma (BRT1, BRT2 y BRT3). El BPT1 presentó diferencia en su contenido nutricional, no obstante, es crucial enfatizar que es una enmienda física, química y orgánica.

Palabras clave: enmienda, nutrientes, pirólisis, secuestro de carbono, suelos agrícolas

ABSTRACT

Contextualization: The characterization and analysis of biochar derived from palm rachis and coffee pulp is fundamental to take advantage of organic residues; in addition, adequately, it is transcendental for the development of obtaining promising materials for soil management in the dry tropics. The research was oriented to characterize biochar obtained from coffee pulp and palm rachis biomass, varying the pyrolysis temperature at 250, 300, and 350 °C in a 64-liter muffle furnace.

Knowledge gap: Characterization and analysis studies of biocarbon in the Caribbean region are scarce, highlighting the need for research to gather information that can enhance the understanding, process, management, and application of biocarbon as a soil amendment in this area.

Purpose: The objective was to evaluate lignin, cellulose, and hemicellulose contents and to characterize the biochar obtained (Dr, moisture retention, pH, EC, CEC, and nutrient content).

Methodology: The analysis of lignin, cellulose, and hemicellulose contents was conducted using the acid detergent fiber (ADF) and acid detergent lignin (ADL) methods, while the characterization of biocarbon (moisture retention, pH (1:2) by potentiometry, electrical conductivity (EC) by conductometry, real density (Dr), total contents of K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, B, Cu, Zn, and Si by acid digestion and atomic absorption spectrophotometry) was carried out.

Results and conclusions: It were found that the biochar obtained from the coffee pulp (BPT1, BPT2, and BPT3) is more favorable for agricultural production concerning the parameters evaluated than biochar from palm rachis (BRT1, BRT2, and BRT3). BPT1 presented a difference in its nutritional content; however, it is crucial to emphasize that it is an amendment.

Keywords: agricultural soils, amendment, carbon sequestration, nutrients, pyrolysis

RESUMEN GRÁFICO



Diagrama del proceso desarrollado para evaluar la composición fisicoquímica del biocarbón obtenido de raquis de palma de aceite y pulpa de café

Fuente: autores.

1 INTRODUCCIÓN

En Colombia, el sector agrícola genera residuos durante sus procesos productivos, el raquis de palma y la pulpa de café, muchas veces se acumulan en el suelo lo que en ocasiones afecta el ambiente debido a la concentración de sustancias tóxicas como fenoles y polifenoles (Serna-Jiménez *et al.*, 2018; Hoseini *et al.*, 2021), no obstante, en

algunas zonas palmeras el raquis se usa como combustible de calderas y en otras es desechado. Los residuos agroindustriales son fuente potencial de energía renovable, en especial aquellos que presentan contenidos de hemicelulosa, celulosa y lignina (Cheng *et al.* 2020) y su pirólisis, es una alternativa de solución para el manejo (Biswas *et al.*, 2017).

La fracción sólida carbonosa, consecuencia de pirólisis de biomasa en ausencia de oxígeno y temperaturas altas, se denomina biocarbón (Rajendiran *et al.*, 2023; Lehmann y Joseph, 2015), producto con una amplia gama de aplicaciones entre las que se destacan: secuestro de C del suelo (Aguirre *et al.*, 2023), reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Brassard *et al.*, 2016; Dissanayake *et al.*, 2020), coadyuvante en la fertilidad del suelo (Ding *et al.*, 2016; Biederman y Harpole, 2013), remediador de contaminantes (Beiyan *et al.*, 2020; Omondi *et al.*, 2016), hidro retenedor, entre otras.

Sin embargo, las características del biocarbón se alteran según el tipo de biomasa y temperaturas de procesamiento. Su uso y aplicación depende de las propiedades que presente el producto (Lehmann y Joseph, 2015), por lo que es necesario analizar la composición de la biomasa que se someterá a pirólisis y el producto resultante (biocarbón). Además, también es importante estudiar y validar sus características, comportamientos y efectos en distintos contextos, tales como diferentes tipos de suelos, climas y prácticas agrícolas específicas.

En estudios previos se han reportado diversas características de biocarbones obtenidos de distintas biomásas mediante pirólisis a diferentes temperaturas. Por ejemplo, Sukartono *et al.* (2011) encontraron que el biocarbón de cáscara de coco pirolizado entre 190-280°C tiene un pH de 9,9, conducti-

vidad eléctrica (CE) de 1,75 dS m⁻¹, contenido total de carbono del 80,59% y capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 11,78 cmol₍₊₎kg⁻¹. En contraste, Abrishamkesh *et al.* (2015) evidenciaron que la cáscara de arroz pirolizada entre 250-300°C tiene pH de 7,4 y CE de 0,36 dS m⁻¹, mientras que a 450-500°C, el pH aumenta a 8,4 y la CE a 0,48 dS m⁻¹. Zhang *et al.* (2015) descubrieron que el biocarbón de jacinto de agua tiene pH que varía de 7,24 a 10,49 y CIC que varía de 9,3 a 21,95 cmol₍₊₎kg⁻¹, dependiendo de la temperatura de pirólisis que osciló entre 250-550°C. Finalmente, Pituya *et al.* (2017) reportaron que el biocarbón de madera de acacia pirolizado a 300°C tiene pH de 5,0, contenido total de carbono del 67,56% y CIC de 127,45 cmol₍₊₎kg⁻¹, mientras que a 400°C y 500°C, estos valores cambian a 6,2 y 7,7 para el pH, 68,68% y 73,26% para el contenido de carbono y 96,81 y 64,40 cmol₍₊₎kg⁻¹ para la CIC, respectivamente.

Lo anterior muestra como la temperatura de pirólisis y el tipo de biomasa influyen significativamente en las características del biocarbón generado, por esta razón, los objetivos del presente estudio fueron: determinar la composición de los residuos orgánicos de pulpa de café y raquis de palma en el departamento del Magdalena, y caracterizar el biocarbón obtenido a partir de estos con el fin de orientar el uso en el sector agrícola asociado a zonas secas.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Selección de la biomasa

Para la producción de biocarbón se seleccionaron residuos orgánicos de pulpa de café y raquis de Palma de aceite provenientes del sector cafetero y palmero del departamento de Magdalena. La pulpa de café fue proporcionada por la finca El Recuerdo, ubicada en el corregimiento de Minca, Sierra Nevada de Santa Marta, y el raquis de palma de aceite fue facilitado por la empresa extractora Palmaceite S.A., localizada en el Km. 49 vía Ciénaga – Fundación. La biomasa se expuso al sol 48 horas, luego fue triturada y posteriormente tamizada a fin de obtener un tamaño de partícula mínimo de acuerdo con lo argumentado por Tsai *et al.* (2018); parámetro importante, ya que un tamaño grande podría disminuir la eficiencia de la transferencia de calor desde la superficie hasta su núcleo (Tripathi *et al.*, 2016). El contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa de los residuos orgánicos se analizó utilizando los métodos de fibra detergente ácida (ADF) y lignina detergente ácida (ADL) (ISO, 2008).

Producción de biocarbón

Se empleó el método de pirólisis asistida por hornomufa para realizar la transforma-

ción de la biomasa y producir biocarbón, siendo utilizadas tres temperaturas de 250, 300 y 350 °C. Así mismo, se utilizó una velocidad de calentamiento de 10 °C min⁻¹ y se mantuvo a la temperatura máxima durante una hora tal como lo describe Igalavithana *et al.* (2019), obteniendo tres tratamientos. Se calculó el rendimiento de producción de cada tratamiento (biocarbón) utilizando la Ecuación 1 proporcionada por Rehrah *et al.* (2014).

$$\text{Rendimiento de biomasa (\%)} = (\text{MBc} / \text{MBm}) \times 100 \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde MBc corresponde a la masa del biocarbón obtenido y MBm corresponde a la masa seca de las biomásas utilizadas para la producción del biocarbón.

Caracterización del biocarbón

Se determinaron los parámetros descritos en la Tabla 1 para cada una de las calidades de biocarbón obtenido siguiendo los argumentos de Singh *et al.* (2019).

Tabla 1.

Parámetros fisicoquímicos evaluados a los biocarbons

Parámetro	Método
Humedad (%)	40 y 70 °C / Gravimetría / NTC 5167
pH	Pasta de saturación / Potenciométrico / NTC 5167
Conductividad eléctrica dS m ⁻¹	Pasta de saturación / Conductimétrico / NTC 5167
Retención de humedad (%)	Pasta de saturación / Gravimétrico / NTC 5167
Cenizas (%)	700 °C / Gravimétrico / NTC 5167
Pérdidas por volatilización (%)	700 °C / Gravimétrico / NTC 5167
Capacidad de intercambio catiónico (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	Acetato de amonio / Volumétrico / NTC 5167
Densidad real (gcm ⁻³)	Directo / Gravimétrico / NTC 5167
Carbono orgánico oxidable (%)	Sol. Dicromato de Potasio / Colorimétrico / NTC 5167
Relación C/N	Relación matemática
Fosforo total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / Colorimetría / NTC 234
Nitrógeno total (%)	Micro-Kjeldahl / Volumetría / NTC 5167/ NTC 370
Potasio total (%)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ NTC 202
Calcio total (%)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Azufre total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / Turbidimetría / NTC 5167/ NTC 1154
Magnesio total (%)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Hierro total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Manganeso Total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Cobre total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Zinc total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ EPA7000B
Boro total (mg kg ⁻¹)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / Colorimétrico / NTC 5167/ NTC 1860
Sodio total (%)	MVH Ácido Nítrico: Ácido Perclórico / NTC 5167/ NTC 1146/ EPA7000B

Fuente: autores.

Análisis estadístico

Todas las pruebas se examinaron por triplicado mientras que los datos se analizaron

con un modelo lineal de análisis de varianza (ANOVA) para cada variable de interés usando la función “lm”; seguido a esto, se realizó prueba post hoc de Duncan para

identificar específicamente qué grupos difieren entre sí, empleando la función “duncan.test”; por último, se estableció correlación de Spearman entre las variables que muestra-

ron diferencias significativas, la cual fue graficada utilizando la librería corrplot. Todos los análisis fueron realizados en el software RStudio 2023.12.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La relación C/N de las biomásas evaluadas se situó en 93 ± 7.25 para raquis y en 24 ± 3.25 para pulpa de café. La Figura 1 muestra los porcentajes de lignina, hemicelulosa y celulosa encontrados en las biomásas de pulpa de café y raquis de palma. Se evidencia que, en ambas biomásas, la celulosa es el componente más abundante, seguida de la hemicelulosa en el raquis de palma y de la lignina en

la pulpa de café. El raquis de palma presenta un contenido medio de celulosa (46,47%) y hemicelulosa (23,99%), superando los valores de la pulpa de café, que tiene un 29,11% de celulosa y un 12,01% de hemicelulosa. En cuanto al contenido de lignina, la pulpa de café presenta un 17,86%, superando al raquis de palma (7,05%).

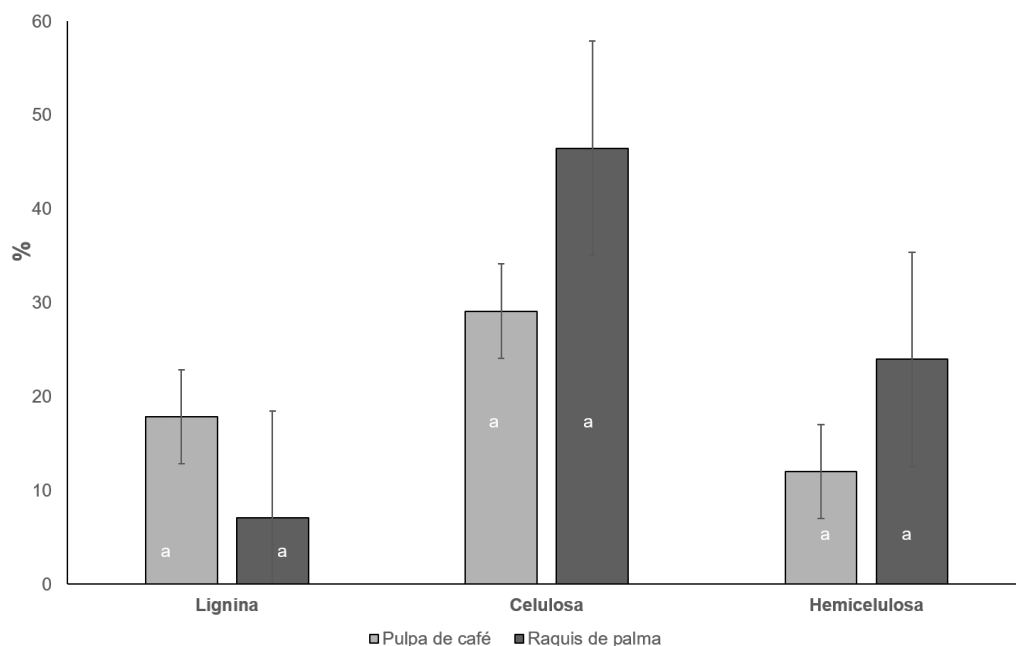


Figura 1. Contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa encontrados en raquis de palma de aceite y pulpa de café. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Fuente: autores.

Respecto a la pulpa de café, las cantidades de lignina, celulosa y hemicelulosa presentaron valores diferentes a los reportados por otras investigaciones. En este estudio, la pulpa de café contenía 17,86% de lignina, 29,11% de celulosa y 12,01% de hemicelulosa. En comparación, Opedun *et al.* (2023) reportaron 35,3% de lignina, 40,1% de celulosa y 20,62% de hemicelulosa. Paredes *et al.* (2022) encontraron 21,04% de lignina, 20,33% de celulosa y 17,35% de hemicelulosa. Por su parte, Veiga *et al.* (2017) reportaron 29,55% de lignina. Las diferencias observadas pueden atribuirse a variaciones en los métodos de análisis, el tipo y estado de la biomasa, las condiciones climáticas o de la estación de cosecha y los métodos de cultivo, entre otros factores (Paredes *et al.*, 2022).

En el raquis de palma, se presentaron diferencias en los contenidos lignocelulósicos respecto a otros reportes. En el análisis realizado, se encontró que el raquis de palma contenía 23,99% de hemicelulosa, 46,47% de celulosa y 7,05% de lignina. Distintos a los resultados de Lee *et al.* (2017), quienes encontraron 14,20% de hemicelulosa, 27,51% de celulosa y 58,30% de lignina. Por otro lado, los contenidos de celulosa y hemicelu-

losa obtenidos son muy similares a los reportados por Ma *et al.* (2015), quienes encontraron 23,82% de hemicelulosa, 33,03% de celulosa y 45,59% de lignina. Se observa en ambos reportes una notable disparidad en el contenido de lignina, superior a 30 puntos porcentuales. Al igual que el caso anterior, la pulpa de café varía respecto a los resultados diferencia que se atribuye a la fuente de biomasa y métodos de análisis (Lee *et al.*, 2017).

Con respecto al rendimiento (porcentaje de biocarbón producido a partir de una cantidad determinada de biomasa), obtenido a partir de la Ecuación 1, se observaron disparidades significativas. El biocarbón obtenido de la pulpa de café, con un rendimiento del 70,2% en BPT1, destacó como el de mayor eficiencia, seguido por BPT2 (60,6%) y BPT3 (48,2%). En contraste, los rendimientos de los biocarbons derivados del raquis de palma fueron considerablemente menores, con BRT1 alcanzando el 33,3%, seguido por BRT2 (26,7%) y BRT3 (20%). Se evidenció una relación inversa entre la temperatura de pirólisis y el rendimiento, reflejada en la disminución progresiva de este último a medida que aumenta la temperatura (Tabla 2).

Tabla 2.

Rendimientos de biocarbons obtenidos de raquis de palma de aceite y pulpa de café. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Biocarbón	MBc (kg)	MBm (kg)	Rendimiento (%)
BPT1	4	5,7	70,2 f
BPT2	4	6,6	60,6 e
BPT3	4	8,3	48,2 d

BRT1	4	12	33,3 c
BRT2	4	15	26,7 b
BRT3	4	20	20,0 a

BP- Biocarbón pulpa de café; BR- Biocarbón pulpa de Raquis; MBc – Masa biocarbón; MBm–biomasa

Fuente: autores.

En la Tabla 3, se observan los resultados respecto a humedad, donde el mayor registro lo presentó el biocarbón de raquis de palma BRT1 (4,6 %), seguido del BRT2 y BRT3 con 3.59 y 3.19 respectivamente, superando al biocarbón de pulpa de café. Ameloot *et al.* (2013) reportan que un alto contenido de humedad en los biocarbonos ayuda a retener más agua y crea un ambiente adecuado para la actividad microbiana y el crecimiento de las plantas.

No se presentó diferencia significativa por pérdidas de volatilización; el valor más alto en la variable lo mostró el BPT2 con 87,6 %.

En lo referente a cenizas, se encontró que BPT3 presentó mayor contenido (33,3 %), seguido de BRT1 (23,1%), BPT1, BRT2 y BRT3 con valores similares (13 -14%) y, por último, el menor porcentaje fue reportado por BPT2 con 10,2%. Investigaciones anteriores informaron que el contenido de cenizas de los biocarbonos juega un papel importante en la adsorción de metales (Yuan *et al.*, 2019); además, esta es rica en potasio, calcio y magnesio, que son adecuados para el crecimiento de las plantas (Berek y Hue, 2016; Weyers y Spokas, 2014) y contribuyen a la adsorción y degradación de contaminantes (Shackley *et al.*, 2012).

Tabla 3.

Análisis proximal de los biocarbonos obtenidos de raquis de palma de aceite y pulpa de café. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0.05$)

Parámetro	Biocarbón					
	BPT1	BPT2	BPT3	BRT1	BRT2	BRT3
Humedad (%)	1,77 a	2,18 ab	2,14 ab	4,62 d	3,59 cd	3,19 bc
Cenizas (%)	14,5 b	10,2 a	33,3 d	23,1 c	13,3 b	13,8 b
Pérdidas por Volatilización (%)	83,7 c	87,6 d	64,6 a	72,3 b	83,1 c	83 c
Cox (%)	34,8 e	36,3 f	29,1 d	24 c	21,3 b	18,7 a
NT (%)	3,83 b	5,13 b	4,34 b	1,78 a	1,49 a	1,35 a
Relación C/N	9,1 b	7,1 a	6,7 a	13 c	14 c	14 c

Fuente: autores.

Respecto al contenido de carbono oxidable (Cox), fue más alto en los tratamientos de pulpa de café con promedio de 33.4% respecto a los de raquis de palma con promedio de 21.3 %. Los resultados fueron mayores a los obtenidos por Belalcázar (2013) quien reportó 17% de Cox del biocarbón obtenido mediante pirólisis controlada a 500 °C de cascarilla de arroz en un horno de combustión en la Arrocería La Esmeralda en Jamundí-Valle del Cauca.

El (Cox) podría utilizarse como una estimación del CT, esto sin desconocer la diferencia de otras formas de C. Así mismo, Cox pueden indicar no sólo la labilidad del C frente a la oxidación y a la hidrólisis, sino también mayor o menor facilidad de acceso físico de los oxidantes y microorganismos a los compuestos orgánicos, lo que algunos autores denominan “protección física” al estabilizar la micro agregación del suelo asociada a partículas de limo o arcilla, además coadyuva y fija bioquímicamente la formación de compuestos de materia orgánica recalcitrantes (Macías *et al.*, 2004; Domingo *et al.*, 2016). Desde este argumento, los porcentajes de Cox podrían ser estimación de la protección física del biocarbón al suelo y del carbono disponible para suplir las necesidades de los organismos, en tal caso los tratamientos con BPT tendrían mejor acción protectora y fomento a la biota.

Los tratamientos presentaron valores normales de NT (Nitrógeno total), que oscilan entre el 3 % y el 5%, siendo BPT2 el más alto con valor de (5,13 %). Esto, contrastado con el biocarbón producido con raquis de palma y pulpa de café reportado por Rivera (2021)

quien encontró 2.2 % y 3.4 % de N, respectivamente a una temperatura de pirólisis de 450 °C. Resultados superiores a los reportes de Cho *et al.* (2017) quienes en cinco biocarbones elaborados a partir de astillas de pino, viruta de roble, piña de pino, cascarilla de arroz y caparazón de cangrejo, encontraron concentraciones de N que oscilaron entre 0.07 % - 3.63 % con temperaturas de pirólisis superiores a los 600 °C, pero estarían acordes con Trujillo *et al.* (2019) quienes reportaron para biocarbón elaborado a 500°C con gallinaza y pollinaza 2.48 % - 2.37 % de N, respectivamente.

Lo anterior, deja entrever resultados dispares respecto al material que se someterá a pirólisis, reportes que afectan directamente la relación C/N donde las relaciones encontradas para pulpa de café presentan en promedio 7.6 y para raquis de palma 13,6, datos que varían respecto a los reportados de Rivera (2021) y Rivera *et al.* (2022) para estos mismos materiales quienes encontraron relación C/N de 26,2 en raquis de palma y 17,11 en pulpa de café evidenciando diferencia significativa respecto al % carbono de los biocarbones obtenidos. Por otra parte, Trujillo *et al.* (2019) encontró (C/N) entre 9,27 – 8,9 para biocarbón de gallinaza y pollinaza, respectivamente. En la misma línea, las características propias de los materiales obtenidos, traducidas en reducción de la densidad, incremento de la porosidad y de la retención de humedad y el aporte de nutrientes, pueden modificar las propiedades de este y en tal sentido, se consideran como enmienda física, química y orgánica como lo mencionan Alonso-Gómez *et al.* (2016). Pero la reducción de la relación C/N

respecto al material original, no es deseable si lo que se desea es capturar carbono como estrategia para mitigación del cambio climático.

En la Tabla 4, se aprecian las características físicas y químicas de los biocarbonos obtenidos durante la investigación. Los valores más altos Dr (densidad real) lo reporto biocarbón de pulpa de café, con promedio de $0,45 \text{ g cm}^{-3}$, mientras que los de raquis de palma no superan los $0,28 \text{ g cm}^{-3}$, valores que difieren de los reportados por López *et al.* (2015) quienes encontraron valores de $1.2\text{-}1.5 \text{ g cm}^{-3}$, pero coinciden con los valores reportados por Rivera (2021) y que, está de acuerdo con la norma vigente NTC-5167 donde se expresa que la densidad real de un producto orgánico usado como abono no debe exceder 0.6 g cm^{-3} . Hussain *et al.* (2020) afirman que la densidad real baja en los bio-

carbonos se debe a la disminución del tamaño de los poros entre sus partículas, es decir, el aumento de su porosidad, lo que mejora la acción capilar, aumentando así la retención de agua.

Así mismo, la presencia de partículas muy pequeñas proporciona disminución de la porosidad total y aumento de la retención de la cantidad de agua. Un sustrato con tamaño de partículas muy pequeñas en el tiempo se compacta y cuando está húmedo impide la circulación de aire (Noguera *et al.*, 2003), por lo que es conveniente mezclarlo. En este caso, teniendo en cuenta la Dr al igual que el porcentaje de retención de humedad superior al 100% de la masa de los biocarbonos obtenidos, se deben realizar aplicaciones en dosis moderadas para permitir un correcto anclaje de la planta y evitar su volcamiento.

Tabla 4.

Caracterización física y química de los biocarbonos obtenidos de raquis de palma de aceite y pulpa de café. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p>0.05$)

Parámetro	Biocarbón					
	BPT1	BPT2	BPT3	BRT1	BRT2	BRT3
Dr (g cm^{-3})	0,421 b	0,453 b	0,5 b	0,286 a	0,264 a	0,283 a
Retención de Humedad (%)	124 b	128 b	107 a	180 c	296 e	213 d
pH	6,73 a	6,96 ab	7,66 abc	8,65 c	8,1 bc	8,59 c
CE (dS m^{-1})	7,68 ab	6,53 a	8,32 b	38,6 e	23,1 d	20,8 c
CIC ($\text{cmol}_{(+) } \text{kg}^{-1}$)	43,1 b	41,4 a	47,6 c	70,4 f	51,3 d	54,5 e

Fosforo Total (mg kg⁻¹)	0,619 c	0,805 e	0,574 b	1,06 f	0,643 d	0,438 a
K (%)	1,64 a	1,44 a	1,32 a	6,93 b	4,64 b	4,92 c
Ca (%)	2,51 bc	2,8 c	3,2 c	1,45 ab	1,04 a	1,41 ab
S (%)	0,279 ab	0,343 b	0,213 ab	0,264 ab	0,154 a	0,157 a
Mg (%)	0,491 a	0,713 b	0,706 b	0,698 b	0,587 ab	0,578 ab
Fe (%)	0,356 c	0,172 b	0,616 d	0,191 b	0,0151 a	0,00501 a
Na (%)	0,081 a	0,081 a	0,192 a	0,144 a	0,074 a	0,099 a
Mn (mg kg⁻¹)	101 e	92 d	170 f	90,2 c	58,5 b	56,9 a
Cu (mg kg⁻¹)	20,6 a	27,2 b	31,5 c	43,1 d	30,9 c	31 c
Zn (mg kg⁻¹)	85,8 d	54 a	256 f	94,1 e	70,3 c	66 b
Bo (mg kg⁻¹)	64,3 c	142 f	97,8 e	88,2 d	16,8 a	23,7 b

Fuente: autores.

Los valores de pH de los biocarbones de pulpa de café oscilaron entre 6,73 y 7,66 mostrando tendencia hacia la neutralidad, los biocarbones de raquis de palma presentan pH más alcalinos con valores entre los 8,1 y 8,65. Premalatha *et al.* (2023) revisando varios trabajos evidenció que este parámetro es fluctuante según el material utilizado, pero hay tendencia hacia pH alcalino.

Li *et al.* (2018) mencionan que el aumento del pH se debe principalmente a la ruptura de enlaces débiles dentro de la estructura del biocarbón cuando este se somete a altas temperaturas de pirólisis; no obstante, aunque la mayoría de los biocarbones tienden a

presentar un pH alcalino, también es posible encontrar biocarbón con pH entre neutro y ligeramente ácido, en especial cuando se utilizan temperaturas inferiores 400 °C (Li *et al.*, 2019), como es el caso particular presentado en los biocarbones de pulpa de café, los cuales mostraron contenido de lignina más alto, lo que hace que sea menos vulnerable a la descomposición térmica y cuya correlación con la variable pH es fuertemente negativa.

El comportamiento de la conductividad eléctrica obtenida es alto, y está por encima de lo reportado por Premalatha *et al.* (2023). Los tratamientos de pulpa de café muestra-

ron valores de CE promedio de $7,5 \text{ (dS m}^{-1}\text{)}$, siendo más bajos que los de raquis de palma donde su valor más alto fue el presentado por BRT1 con $38,6 \text{ dS m}^{-1}$. Resultados contrastantes a lo reportado por Belalcázar (2013), quien consiguió pH de 8,72 del biocarbón derivado de pirólisis controlada a 500°C sin que presentaran diferencias, no obstante, este parámetro evidencia alto contenido de sales hidrosolubles, que para las condiciones de la zona de estudio (árido y semiárido) son inconvenientes. Al respecto, Pérez-Cabrera *et al.* (2021) argumentaron que la adición de ácido cítrico, maleico y propiónico como catalizadores iniciales y en concentraciones de 5 y 10%, son los mejores tratamientos para reducir la CE, logrando una conductividad eléctrica ($0,30\text{-}0,46 \text{ dS m}^{-1}$), acción que puede ser considerada en futuras investigaciones. Por otro lado, Thomas *et al.* (2013) consiguieron atrapamiento de sales en los poros del biocarbón, teniendo como consecuencia la reducción de la CE en suelos afectados por sales, esto explicaría en gran medida los contenidos altos de CE en el biocarbón.

Cabe mencionar que el hecho de que se presenten altas CIC en los biocarbones les permite mejorar esta propiedad en el suelo y, por ende, mejorar su retención de nutrientes (Hale *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2013) como también de otros iones. En concordancia, estos exhibieron CIC elevadas, principalmente en aquellos provenientes de raquis de palma, con un máximo de $70,4 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$, mientras que los de pulpa de café presentaron CIC con variaciones entre $41,4$ y $47,6 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$, valores que son similares a los reportados por Rivera *et al.* (2022), pero difieren de los reportados por Pituya *et al.* (2017), quie-

nes obtuvieron resultados de $127,45 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ en biocarbón de madera de acacia a temperatura de pirólisis de 300°C . Los rangos anteriores confirman que es un material con alta capacidad de intercambio iónico lo que representa la cantidad de cationes que las superficies logran retener, indicador del uso potencial que puede llegar a tener.

Como se aprecia, los contenidos de nutrientes de los tratamientos fueron muy variables. Para el caso del fósforo, el valor más alto lo obtuvo BRT1 con $1,06 \text{ mg kg}^{-1}$ seguido por BPT2 con $0,805 \text{ mg kg}^{-1}$. El porcentaje de K presentó diferencias, en el caso de los biocarbón de pulpa de café los valores oscilaron entre 1,32 y 1,64 %, mientras que en el raquis de palma estos mostraron valores superiores con oscilaciones entre los 4,64 y los 6,93 %, concentraciones que pueden relacionarse con el mayor contenido de celulosa del raquis de palma respecto a la pulpa de café.

Los contenidos de Mg y Na no presentaron diferencias. El Mg varió entre 0,491 y 0,713 %, mostrando tanto el valor más alto como el más bajo en los biocarbones de pulpa de café; pero su comportamiento fue más homogéneo en raquis de palma. El Na logró concentraciones bajas tanto en pulpa de café como raquis de palma, el valor más alto lo mostró BPT3 (0,192%), seguido de BRT1 (0,144%). En Ca se exhibió mayor diferencia (2,51 - 3,2 %) en pulpa de café, en raquis de palma la variación fue entre 1,04 y 1,45%, con menor contenido respecto al biocarbón de pulpa de café.

Rivera (2021) obtuvo, a una temperatura de 450°C , biocarbón del raquis de palma con contenidos de $9,1 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ de Ca, 18,9

$\text{cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de Mg, $0,21 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de Na y $0,06 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de K; y en pulpa de café, consiguió $23,5 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de Ca, $9,2 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de Mg, $0,84 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de Na y $7,41 \text{ cmol}_{(+)}\text{kg}^{-1}$ de K. Valores diferentes a los obtenidos en esta investigación. Por otro lado, Trujillo *et al.* (2019) reportaron resultados muy superiores en Ca, Mg, K y Na a los encontrados, derivados de biocarbón de gallinaza y pollinaza, no obstante, Jien y Wang (2013) citados por Alazzaz *et al.* (2020) argumentan que el biocarbón que más contribuye con K, Ca y Mg son los derivados de desechos animales.

Los porcentajes más altos de azufre fueron reportados por los biocarbones de pulpa de café BPT2 = 0,343 % y BPT1 = 0,279 %, seguidos por el biocarbón de raquis de palma BRT1 = 0,264 % y de pulpa de café BPT3 = 0,213 %; los biocarbones BRT2 y BRT3 presentaron valores más bajos con una diferencia casi del doble en comparación con el valor más alto 0,154 y 0,157 %, respectivamente.

El contenido Fe presentó una gran discrepancia en las muestras de biocarbón de raquis de palma BRT2 (0,0151%) y BRT3 (0,00501 %) en comparación con las demás, las cuales presentaron valores con oscilaciones entre los 0.172 % y 0,616 %, presentando el valor más alto el biocarbón de pulpa de café BPT3.

Con respecto a los contenidos de elementos menores, el biocarbón de pulpa de café BPT3 obtuvo los valores más altos de Mn

(170 mg kg^{-1}) y Zn (256 mg kg^{-1}). Por su parte, el contenido de boro más alto lo presentó el biocarbón de raquis de palma con un valor de $43,1 \text{ mg kg}^{-1}$.

Relación de características de la biomasa con las calidades de biocarbones obtenidas. El análisis de varianza reportó diferencias ($p < 0.05$) entre el contenido de lignina, la temperatura de pirólisis, el rendimiento y las propiedades químicas del biocarbón (pH, CE, CO, NO, Ca, K y RCN). De esta manera, se puede entender que tanto el contenido de lignina como la temperatura en la pirólisis y el rendimiento, tienen impacto significativo en varias propiedades químicas del biocarbón (Tabla 5), incluyendo el pH, la conductividad eléctrica (CE), el contenido de carbono (CO), el nitrógeno orgánico (NO), el calcio (Ca), el potasio (K) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Lo anterior resalta la importancia de considerar estos factores en la producción y caracterización del biocarbón para diversos usos.

Se reportaron diferencias significativas entre el pH y CE, CIC, CO, NO, contenido de Cu y K (Tabla 5). Así mismo, en la Tabla 6 se puede verificar que existen diferencias significativas entre la CE y varias propiedades químicas del biocarbón, incluyendo la CIC, el contenido de cobre (Cu), el contenido de potasio (K) y el contenido de calcio (Ca); esto podría indicar que tanto el pH como la CIC pueden estar asociados con varias características químicas del producto.

Tabla 5

Análisis de varianza entre el pH, el rendimiento y otras propiedades químicas del biocarbón. Niveles de significancia: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Variable	GL	SC	PC	F	Pr (>F)
R	1	2,931	2,931	31,425	0,004**
CE	1	2,370	2,370	10,144	0,033*
CIC	1	2,389	2,389	10,443	0,031*
CO	1	2,837	2,837	24,277	0,007**
NO	1	2,370	2,370	10,156	0,033*
Cu	1	2,228	2,228	8,281	0,045*
K	1	2,564	2,564	13,858	0,020*

Fuente: autores.

Tabla 6.

Análisis de varianza entre CE y otras propiedades químicas del biocarbón. Niveles de significancia: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Variable	GL	SC	PC	F	Pr (>F)
CIC	1	731,72	731,72	51,55	0,001**
Cu	1	577,49	577,49	10,95	0,029*
K	1	756,45	756,45	94,35	0,0006***
Ca	1	492,33	492,33	6,65	0,061
Na	1	9,91	9,91	0,05	0,83

Fuente: autores.

Por último, se percibió diferencia entre la densidad real y la retención de humedad (Tabla 7), lo que sugiere que estas dos pro-

piedades pueden estar relacionadas y pueden influir en las características físicas del biocarbón.

Tabla 7.

Análisis de varianza entre Densidad real y Retención de humedad. Niveles de significancia: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$

Variable	GL	SC	PC	F	Pr (>F)
RH	1	0,04	0,04	12,86	0,023*

Fuente: autores.

En la Figura 2, se indica la correlación entre contenidos de lignina, celulosa y hemicelulosa de las biomásas y la caracterización fisicoquímica de los biocarbón. Se muestra correlación positiva de 0,88 entre el contenido de lignina de la biomasa con el rendimiento final de los biocarbonos, al mismo tiempo, los contenidos de carbono orgánico (Cox) presentaron correlación fuerte positiva con el rendimiento de los biocarbonos ($r=0,94$). Contenido de 0,88 entre la lignina y los contenidos de carbono, N y Ca.

Variables como el pH presentaron fuertes correlaciones con la conductividad eléctrica ($r=0,89$) y la CIC ($r=0,94$); así mismo, la CE y la CIC presentaron también una fuerte correlación de 0,94. Además, las propiedades físicas de densidad real y retención de humedad se correlacionaron negativamente ($r=-0,94$), verificando que en la medida en que la densidad se reduce, el material aumenta su capacidad de retención de humedad.

En síntesis, en el presente estudio el contenido de celulosa y hemicelulosa de la muestra de raquis de palma fue superior casi que el doble a la pulpa de café, mientras que en el caso de la lignina fue lo contrario, la pulpa de café presentó un contenido que dobló al de raquis de palma. Collazo-Bigliardi *et al.* (2018) mencionan que este particular hallazgo puede deberse a la diferencia en la naturaleza de cada biomasa. De allí que de conformidad con el análisis proximal y la caracterización fisicoquímica del biocarbón, se observó que los biocarbonos obtenidos a partir de pulpa de café (BPT1, BPT2, BPT3) tienen un rendimiento más alto que los de raquis de palma (BRT1, BRT2, BRT3) mientras que, en términos de contenido de nutrientes, presenta valores más elevados de C, N y bases, proporcionando nutrientes para el suelo y las plantas.

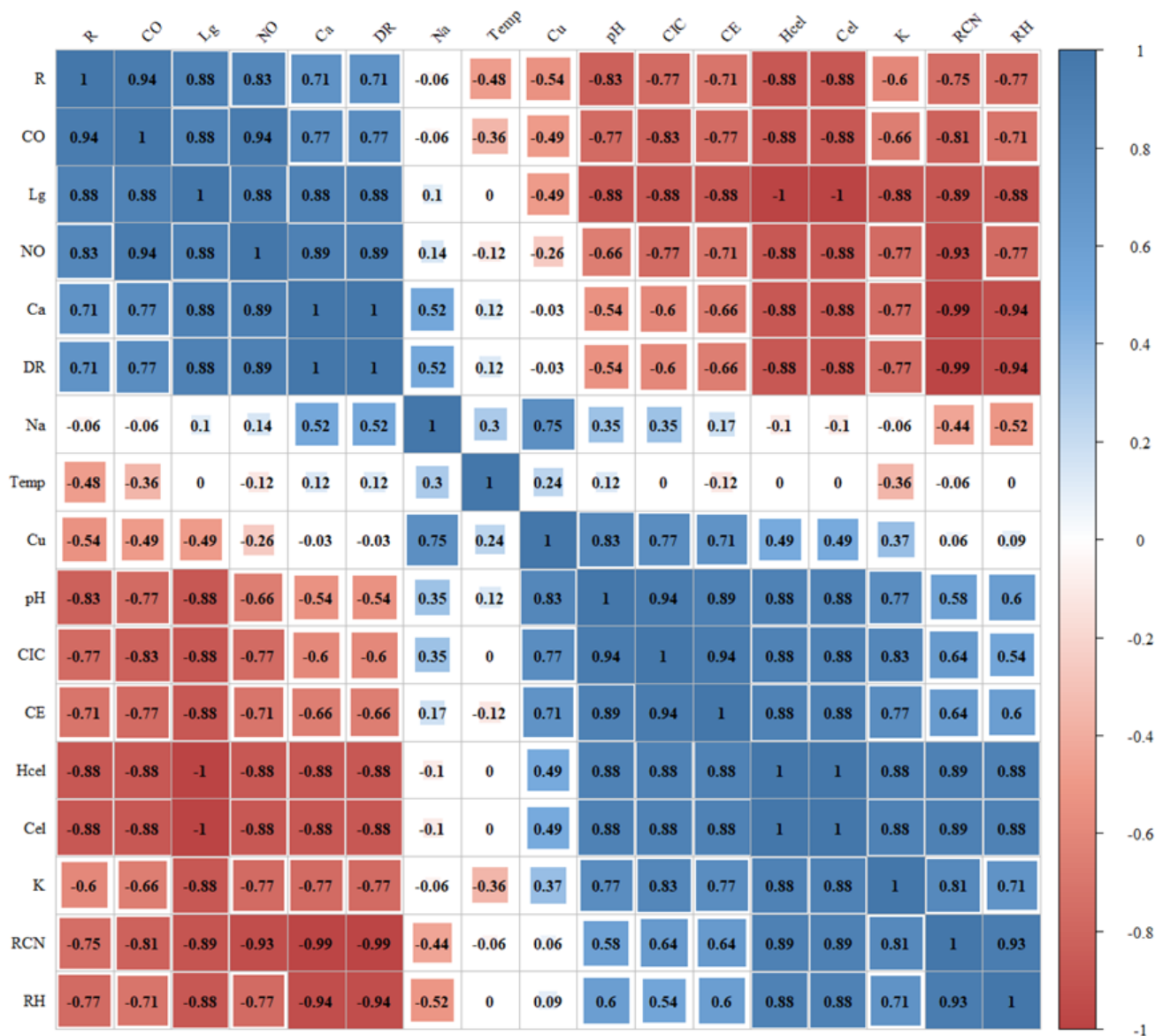


Figura 2. Matriz de correlación de Spearman entre características de la biomasa y calidades de biocarbons obtenidas en la evaluación de la composición fisicoquímica del producto obtenido de raquis de palma de aceite y pulpa de café

Fuente: autores.

La alta correlación mostrada entre el contenido de carbono de los biocarbons y la lignina de la biomasa ($r=0,88$), podría implicar que la lignina, al ser una macromolécula rica en carbono y poseer alta estabilidad térmica, puede contribuir significativamente

a la formación de biocarbón con altos niveles de carbono durante el proceso de pirólisis (Leng y Huang, 2018). En referencia a las concentraciones de N en las muestras de biocarbons, también se relacionan con la existencia de lignina de la biomasa (Li *et*

al., 2019) y la presencia de proteínas en los tejidos vegetales (Rivera, 2021) que al descomponerse dan lugar a la liberación de nitrógeno.

El pH, CE y CIC son propiedades químicas para tener en cuenta a la hora de evaluar el poder agronómico del biocarbón. En el estudio se observó una fuerte correlación entre estas variables, lo cual puede estar relacionado a múltiples factores. La alta conductividad eléctrica en los biocarbonos puede estar asociada al alto contenido de sales, en especial sodio (Li *et al.*, 2019), lo que podría aumentar la salinidad del suelo (Ferreira *et al.*, 2019). Sin embargo, los contenidos de sodio de las muestras de biocarbón fueron bajos, por tanto, se atribuye la alta CE a cationes menos hidrosolubles. La CIC, es promovida por grupos funcionales de superficie relacionados a la presencia de abundantes elementos (K, Na, Ca, Mg y P) (Agrafioti *et al.*, 2013; El-Naggar *et al.*, 2019), esta afirmación se puede corroborar con la correlación firmemente positiva que tiene la CIC con algunos de estos nutrientes. De conformidad con lo expuesto, los valores de CIC fueron

generalmente altos en todos los biocarbones en estudio, por lo que se considera que todos tienen la capacidad de retener y liberar nutrientes de manera efectiva para las plantas; mientras que con relación al pH, el raquis de palma es alcalino, por lo que podría ser usado para enmendar suelos ácidos; en cuanto a los biocarbones de pulpa de café, estos tienen un pH más neutro en comparación con los de raquis de palma, lo que puede ser favorable para una amplia gama de cultivos y suelos.

Por su parte, la baja densidad real del biocarbón muestra alta porosidad, no obstante, es importante mencionar que esta característica es más eficiente si el biocarbón se mezcla con suelos de textura arenosa que permiten altas tasas de infiltración.

Finalmente, teniendo en cuenta el rendimiento de producción, el contenido nutricional, el pH, la densidad real, la CE y la CIC, los biocarbones de pulpa de café (BPT1, BPT2 y BPT3) son más favorables como enmiendas físicas, químicas y orgánicas para el suelo en comparación con los de raquis de palma (BRT1, BRT2 y BRT3).

4 CONCLUSIONES

Por las características fisicoquímicas del biocarbón obtenido de pulpa de café y raquis de palma, se evidencia su potencial para ser usado como enmienda física, química y orgánica en los suelos, demostrando ser un proceso efectivo para transformar residuos

agroindustriales e incorporarlos al manejo agrícola en diferentes zonas y condiciones.

Los resultados muestran que el contenido de lignina de la biomasa es de importancia a la hora de seleccionar la pirólisis, toda vez que esta propiedad influye en el rendimiento

del biocarbón final, en su contenido de C y N, al igual que en la variabilidad del pH, la CE y la CIC.

Igualmente, entre los biocarbones, el proveniente de pulpa de café BPT1, se destaca como la mejor opción debido a su mayor rendimiento y su significativo contenido nutricional. Pero es importante mencionar que factores como las necesidades específicas del suelo y los cultivos, deben ser considerados al elegir el biocarbón más adecuado.

Es necesario realizar más investigaciones sobre las características químicas de biocarbones para ser utilizado como enmienda física, química y orgánica de suelos, sobre todo cuando se usan nuevos materiales vegetales, ya que las propiedades del biocarbón son afectadas por la composición de la materia prima, las técnicas termoquímicas empleadas en su elaboración, el intervalo de calentamiento, temperatura, presión del reactor y uso de catalizadores.

CONTRIBUCIÓN DE LA AUTORÍA

Sonia Esperanza Aguirre Forero: metodología, investigación, análisis de datos, borrador original. **José Villa Parejo:** investigación, conceptualización, análisis de datos, escritura.

Nelson Virgilio Piraneque Gambasica: revisión y edición, análisis de datos.

AGRADECIMIENTOS

A la Vicerrectoría de investigación de la Universidad del Magdalena por la financiación del proyecto.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo se derivó de la investigación “Biochar: una alternativa para el manejo de suelos en el trópico seco a partir de la transformación de residuos de la producción

agrícola (*Coffea arabica* y *Elaeis guineensis*)” financiada por el Fondo de Investigación FONCIENCIAS con código VIN2022165 de la Universidad del Magdalena.

LITERATURA CITADA

- Abrishamkesh, S., Gorji, M., Asadi, H., Bagheri-Marandi, G.H., & Pourbabaee, A.A. (2015). Effects of rice husk biochar application on the properties of alkaline soil and lentil growth. *Plant, Soil and Environment*, 61(11), 475-482. <https://doi.org/10.17221/117/2015-PSE>
- Aguirre, S. E., Gambasica, N. V. P., y Parejo, J. A. V. (2023). Biocarbón: Estado del arte, avances y perspectivas en el manejo del suelo. *Revista EIA*, 20(39), 39. <https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.1651>
- Agrafioti, E., Bouras, G., Kalderis, D., & Diamadopoulos, E. (2013). Biochar production by sewage sludge pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 101, 72–78. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.02.010>
- Alazzaz, A., Usman, A. R. A., Ahmad, M., Ibrahim, H. M., Elfaki, J., Sallam, A. S., Akanji, M. A. & Al-Wabel, M. I. (2020). Potential short-term negative versus positive effects of olive mill-derived biochar on nutrient availability in a calcareous loamy sand soil. *PLOS one*, 15, e0232811. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232811>
- Alonso-Gómez, A., Cruz-Domínguez, A., Jiménez-Madrid, D., Ocampo-Duran, Á., y Parra-González, S. (2016). Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento de maíz. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 19(2), 341-349. <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v19n2/v19n2a11.pdf>
- Ameloot, N., Graber, E. R., Verheijen, F. G. A., & De Neve, S. (2013). Interactions between biochar stability and soil organisms: review and research needs. *European Journal of Soil Science*, 64(4), 379–390. <https://doi.org/10.1111/ejss.12064>
- Beiyuan, J. Z., Awad, Y. M., Beckers, F., Wang, J. X., Tsang, D. C. W., Ok, Y. S., Wang, S. L., Wang, H. L., & Rinklebe, J. (2020). (Im)mobilization and speciation of lead under dynamic redox conditions in a contaminated soil amended with pine sawdust biochar. *Environment International*, 135. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105376>
- Belalcázar, S. (2013). Evaluación del biocarbón derivado de cascarilla de arroz como potenciador del establecimiento y proliferación de bacterias en suelos no perturbados, [Trabajo de grado]. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad ICESI, Santiago de Cali. https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/76991/1/belalcazar_evaluacion_biocarbon_2014.pdf
- Berek, A.K., Hue, N. V. (2016). Characterization of biochars and their use as an amendment to acid soils. *Soil Science*, 181, 412–426. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000177>
- Biederman, L. A., & Harpole, W. S. (2013). Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *Global Change Biology Bioenergy*,

- 5(2), 202–214. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12037>.
- Biswas, B., Pandey, N., Bisht, Y., Singh, R., Kumar, J., & Bhaskar, T. (2017). Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. *Bioresource Technology*, 237, 57–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.046>.
- Brassard, P., Godbout, S., & Raghavan, V. (2016). Soil biochar amendment as a climate change mitigation tool: Key parameters and mechanisms involved. *Journal of Environmental Management*, 181, 484–497. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.063>.
- Cheng, F., Bayat, H., Jena, U., & Brewer, C. E. (2020). Impact of feedstock composition on pyrolysis of low-cost, protein- and lignin-rich biomass: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 147, 104780. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104780>.
- Cho, D. W., Kwon, G., Ok, Y. S., Kwon, E. E., & Song, H. (2017). Reduction of Bromate by Cobalt-Impregnated Biochar Fabricated via Pyrolysis of Lignin Using CO₂ as a Reaction Medium. *ACS applied materials & interfaces*, 9(15), 13142–13150. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b00619>.
- Collazo-Bigliardi, S., Ortega-Toro, R., & Chiralt Boix, A. (2018). Isolation and characterization of microcrystalline cellulose and cellulose nanocrystals from coffee husk and comparative study with rice husk. *Carbohydrate Polymers*, 191, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.022>.
- Ding, Y., Liu, Y. G., Liu, S. B., Li, Z. W., Tan, X. F., Huang, X. X., Zeng, G. M., Zhou, L., & Zheng, B. H. (2016). Biochar to improve soil fertility. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(2). <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0372-z>.
- Dissanayake, P. D., You, S. M., Igalavithana, A. D., Xia, Y. F., Bhatnagar, A., Gupta, S., Kua, H. W., Kim, S., Kwon, J. H., Tsang, D. C. W., & Ok, Y. S. (2020). Biochar-based adsorbents for carbon dioxide capture: A critical review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 119. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109582>.
- Domingo-Olive, F., Bosch-Serra, A. D., Yague, M. R., Poch, R. M., and Boixadera, J. (2016). Long term application of dairy cattle manure and pig slurry to winter cereals improves soil quality. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 104, 39–51. <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9757-7>.
- El-Naggar, A., Lee, S. S., Rinklebe, J., Farooq, M., Song, H., Sarmah, A. K., Zimmerman, A. R., Ahmad, M., Shaheen, S. M., & Ok, Y. S. (2019). Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536–554. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.034>.
- Ferreira, S. D., Manera, C., Silvestre, W. P., Pauletti, G. F., Altafini, C. R., & Godinho, M. (2019). Use of Biochar Produced from Elephant Grass by Pyrolysis in a Screw Reactor as a Soil Amendment. *Waste and Biomass Valorization*, 10(10), 3089–3100.

<https://doi.org/10.1007/s12649-018-0347-1>.

Hale, S. E., Nurida, N. L., Jubaedah, Mulder, J., Sørmo, E., Silvani, L., Abiven, S., Joseph, S., Taherymoosavi, S., & Cornelissen, G. (2020). The effect of biochar, lime and ash on maize yield in a long-term field trial in a Ultisol in the humid tropics. *Science of The Total Environment*, 719, 137455. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137455>.

Hoseini, M., Cocco, S., Casucci, C., Cardelli, V., & Corti, G. (2021). Coffee by-products derived resources. A review. *Biomass and Bioenergy*, 148, 106009. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106009>.

Hussain, R., Ravi, K., & Garg, A. (2020). Influence of biochar on the soil water retention characteristics (SWRC): Potential application in geotechnical engineering structures. *Soil and Tillage Research*, 204, 104713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104713>.

Igalavithana, A. D., Kwon, E. E., Vithanage, M., Rinklebe, J., Moon, D. H., Meers, E., Tsang, D. C. W., & Ok, Y. S. (2019). Soil lead immobilization by biochar in short-term laboratory incubation studies. *Environment International*, 127, 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.031>.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (1976). *Norma Técnica Colombiana – NTC 1146 Método de determinación del sodio por espectrofotometría*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (1996). *Norma Técnica Colombiana – NTC 234 Abonos o fertilizantes. Método de ensayo para la determinación cuantitativa del fósforo*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (2001). *Norma Técnica Colombiana – NTC 202 Métodos cuantitativos para la determinación de potasio soluble en agua, en abonos o fertilizantes y fuentes de materias para su fabricación*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (2005). *Norma Técnica Colombiana – NTC 1154 Fertilizantes y acondicionadores de suelos. Determinación de azufre*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (2011a). *Norma Técnica Colombiana - NTC 370 Abonos o fertilizantes. Determinación del nitrógeno total*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (2011b). *Norma Técnica Colombiana - NTC 5167 Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*. ICONTEC.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. [ICONTEC]. (2013). *Norma Técnica Colombiana – NTC 1860 Productos químicos para uso agrícola. Abonos o fertilizantes. Método de ensayo para determinar el contenido de boro. Método de Azometina-H*. ICONTEC.

- International Organization for Standardization. [ISO]. (2008). ISO 13906 - Determinación del contenido de fibra en detergente ácido (ADF) y de lignina en detergente ácido (ADL).
- Lee, X. J., Lee, L. Y., Gan, S., Thangalazhy-Gopakumar, S., & Ng, H. K. (2017). Biochar potential evaluation of palm oil wastes through slow pyrolysis: Thermochemical characterization and pyrolytic kinetic studies. *Bioresource Technology*, 236, 155–163. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.105>.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for Environmental Management Science, Technology and Implementation* (Routledge, Ed.; 2nd Edition).
- Leng, L., & Huang, H. (2018). An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. *Bioresource Technology*, 270, 627–642. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.030>.
- Li, S., Barreto, V., Li, R., Chen, G., & Hsieh, Y. P. (2018). Nitrogen retention of biochar derived from different feedstocks at variable pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 133, 136–146. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.04.010>
- Li, S., Harris, S., Anandhi, A., & Chen, G. (2019). Predicting biochar properties and functions based on feedstock and pyrolysis temperature: A review and data syntheses. *Journal of Cleaner Production*, 215, 890–902. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.106>
- López, M. A., Crespo, Y. A., López, G. G., Quintana, Y. G., Abreu, L. C., y Martínez, I. D. L. C. C. (2015). Características de sustratos orgánicos acondicionados con bio carbón: Influencia en la calidad de plantas de *Talipariti elatum* (Sw.) Fryxell cultivada en tubetes. *Revista Cubana de Ciencias Forestales: CFORES*, 3(1), 1-16. <https://dialnet.unirioja.es/revista/23626/V/3>
- Ma, Z., Chen, D., Gu, J., Bao, B., & Zhang, Q. (2015). Determination of pyrolysis characteristics and kinetics of palm kernel shell using TGA-FTIR and model-free integral methods. *Energy Conversion and Management*, 89, 251–259. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.074>
- Macías, F., Calvo de Anta, R., Rodríguez, L., Verde, R., Pena, X., y Camps, M. (2004). El sumidero de carbono de los suelos de Galicia. *Edafología*, 11(3), 341-376. <http://www.edafologia.net/revista/tomo11c/articulo341.pdf>
- Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X. Y., Korai, P. K., & Pan, G. X. (2016). Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma*, 274, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029>.
- Opedun, J. C., Wanasolo, W., Apita, A. O., & Omara, T. (2023). Optimization of Pyrolysis and Selected Physicochemical Properties of Groundnut Shells, Coffee and Rice Husks for Biochar Production. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 17(3), 441–452. <https://doi.org/10.59038/jjmie/170313>.

- Paredes, J., Pretell, V., Pilco, A., Ramos, W., & Ubillas, C. (2022). Characterization of Two Lignocellulosic Biomasses *Coffea Arabica* L. for the production of Biochar. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 2022-July. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.344>
- Pérez-Cabrera, C. A., Juárez-López, P., Anzaldo-Hernández, J., Alia-Tejagal, I., Salcedo-Pérez, E., Guillén-Sánchez, D., Balois-Morales, R., López Martínez, V. y Castro-Brindis, R. (2021). Caracterización química de biocarbón de ápices de caña de azúcar elaborado mediante carbonización hidrotérmica y adición de catalizadores orgánicos. *Terra Latinoamericana*, 39. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.936>
- Pituya, P., Sriburi, T., & Wijitkosum, S. (2017). Optimization of biochar preparation from Acacia wood for soil amendment. *Engineering Journal*, 21(2), 99–105. <https://doi.org/10.4186/ej.2017.21.2.99>
- Premalatha, R. P., Poorna Bindu, J., Nivetha, E., Malarvizhi, P., Manorama, K., Parameswari, E., & Davamani, V. (2023). A review on biochar's effect on soil properties and crop growth. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1092637>
- Rajendiran, N., Ganesan, S., Weichgrebe, D., & Venkatachalam, S. S. (2023). Optimization of pyrolysis process parameters for the production of biochar from banana peduncle fibrous waste and its characterization. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(10), 3189–3201. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02592-2>
- Rehrah, D., Reddy, M. R., Novak, J. M., Bansode, R. R., Schimmel, K. A., Yu, J., Watts, D. W., & Ahmedna, M. (2014). Production and characterization of biochar's from agricultural by-products for use in soil quality enhancement. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 108, 301–309. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.03.008>
- Rivera, J. C., Silva Contreras, L. V., Cuervo, J., Agamez Pertuz, Y. Y., Martínez-Cordón, M. J., & Zamudio, A. (2022). Characterization of biochars obtained from rose stems, coffee pulp, palm, and wood residues as an environmental alternative for cadmium immobilization in soil. *agriRxiv*, 20220490856. <https://doi.org/10.31220/agriRxiv.2022.00160>
- Rivera, J. C. (2021). *Efecto de enmiendas con biocarbones sobre propiedades físicas, químicas y Fitoabsorción de Cadmio en suelos disímiles sembrados con lechuga* [Tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80523>
- Serna-Jiménez, J. A., Torres-Valenzuela, L. S., Martínez Cortínez, K., y Hernández Sandoval, M. C. (2018). Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos. *Revista ION*, 31(1), 37–42. <https://doi.org/10.18273/revion.v31n1-2018006>
- Shackley, S., Carter, S., Knowles, T., Middelink, E., Haefele, S., Sohi, S., ... & Haszeldine, S. (2012). Sustainable gasification–

- biochar systems A case-study of rice-husk gasification in Cambodia, Part I: Context, chemical properties, environmental and health and safety issues. *Energy Policy*, 42, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.026>
- Singh, A., Singh, A. P., & Purakayastha, T. J. (2019). Characterization of biochar and their influence on microbial activities and potassium availability in an acid soil. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 65(9), 1302–1315. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1563291>.
- Sukartono, Utomo, W. H., Kusuma, W. Z., & Nugroho, W. H. (2011). Soil fertility status, nutrient uptake, and maize (*Zea mays* L) yield following biochar and cattle manure application on sandy soils of Lombok, Indonesia. *Journal of Tropical Agriculture*, 49, 47–52. <https://jtropag.kau.in/index.php/ojs2/article/view/236/236>
- Thomas, S. C., Frye, S., Gale, N., Garmon, M., Launchbury, R., Machado, N., Melamed S., Murray, J., Petroff, A & Winsborough, C. (2013). Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species. *Journal of Environmental Management*, 129, 62–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.057>
- Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Trujillo, E., Valencia, A., y Cecilia Alegría, M. (2019). Producción y caracterización química de biocarbón a partir de residuos orgánicos avícolas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(4), 489-504. <http://dx.doi.org/10.37761/rsqp.v85i4.262>
- Tsai, C. H., Tsai, W. T., Liu, S. C., & Lin, Y. Q. (2018). Thermochemical characterization of biochar from cocoa pod husk prepared at low pyrolysis temperature. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 8(2), 237–243. <https://doi.org/10.1007/s13399-017-0259-5>.
- Veiga, T. R. L. A., Lima, J. T., Dessimoni, A. L. de A., Pego, M. F. F., Soares, J. R., & Trugilho, P. F. (2017). Caracterização de diferentes biomassas vegetais para produção de biocarvões. *Cerne*, 23(4), 529–536. <https://doi.org/10.1590/01047760201723042373>.
- Weyers, S. L., & Spokas, K. A. (2014). Crop residue decomposition in Minnesota biochar-amended plots. *Solid Earth*, 5(1), 499–507. <https://doi.org/10.5194/se-5-499-2014>
- Yuan, P., Wang, J., Pan, Y., Shen, B., & Wu, C. (2019). Review of biochar for the management of contaminated soil: Preparation, application and prospect. *Science of The Total Environment*, 659, 473-490. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.400>
- Zhang, Q., Du, Z., Lou, Y., & He, X. (2015). A one-year short-term biochar application improved carbon accumulation in large macroaggregate fractions. *Catena*, 127, 26–31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.009>

Zhao, L., Cao, X., Wang, Q., Yang, F., & Xu, S. (2013). Mineral Constituents Profile of Biochar Derived from Diversified Waste Biomasses: Implications for Agricultu-

ral Applications. *Journal of Environmental Quality*, 42(2), 545–552. <https://doi.org/10.2134/jeq2012.0232>

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.



Licencia de Creative Commons

Revista de Investigación Agraria y Ambiental is licensed under a Creative Commons Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual 4.0 Internacional License.

