

Efecto de la pirólisis y temperatura sobre propiedades químicas superficiales de biocarbones de palma, bambú y ciprés

María Laura Quesada-Bermúdez¹ , Cristina Chinchilla-Soto¹ , Mayela Monge-Muñoz¹ ,
Wilson Beita-Sandí¹  & Juan Chin-Pampillo¹ 

1. Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA), Universidad de Costa Rica, San José 2060, Costa Rica; mauraquesada@gmail.com, cristina.chinchilla@ucr.ac.cr, mayela.monge@ucr.ac.cr, wilson.beita@ucr.ac.cr, juan.chin@ucr.ac.cr

Recibido 09-IV-2026 • Corregido 17-VI-2026 • Aceptado 22-VI-2026
DOI: <https://doi.org/10.22458/urj.v18i1.6499>

ABSTRACT. “Effect of pyrolysis and temperature on surface chemical properties of palm, bamboo and cypress biochars”. **Introduction:** Biochar is a carbonaceous material obtained through the pyrolysis of biomass under oxygen-limited conditions. Its potential for agricultural and environmental applications directly depends on its chemical and structural properties. Pyrolysis temperature and production methods dictate the proportion of oxygenated functional groups, the degree of aromaticity, and mineral content, thus modifying its stability and functionality. **Objective:** To determine the effect of pyrolysis conditions on the surface chemical properties of biochars derived from oil palm empty fruit bunches, cypress wood, and bamboo. **Methods:** We used a field-scale kiln (Kon-Tiki) and controlled laboratory conditions (muffle furnace at 400°C, 500°C, 600°C, and 700°C) together with proximal analysis, determination of pH and electrical conductivity, elemental analysis (CHNS/O), zeta potential measurement, Boehm titration, and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). **Results:** Increasing pyrolysis temperature reduced volatile matter while increasing fixed carbon and ash content; pH increased with temperature, whereas field-produced biochars exhibited higher electrical conductivity values. Elemental analysis showed a carbon increase up to 82% and a decrease in oxygen and hydrogen content. Atomic ratios H/C_{org} and O/C_{org} decreased progressively, indicating high aromatic stability. Oil palm empty fruit had more nitrogen than bamboo and cypress, with sulfur at trace or undetectable levels. The Zeta potential became less negative at higher temperatures due to surface deoxygenation (confirmed by FTIR and Boehm titration). Biochars retained higher active site density than activated carbon. **Conclusions:** Laboratory-produced biochars presented more homogeneous properties and structural stability, while field-produced materials exhibited a unique functional duality of a stable core and a reactive periphery. This biochar stands out for its potential nitrogen contribution to the edaphic system.

Keywords: agro-industrial waste, bioeconomy, soil amendment, pyrolysis, aromatic stability, Kon-Tiki kiln.

RESUMEN. Introducción: el biocarbón es un material carbonoso obtenido por pirólisis de biomasa en condiciones limitadas de oxígeno, cuyo potencial para aplicaciones agrícolas y ambientales depende directamente de sus propiedades químicas y estructurales. La temperatura de pirólisis y el método de producción influyen en la proporción de grupos funcionales oxigenados, el grado de aromaticidad y el contenido mineral, modificando así su estabilidad y funcionalidad. **Objetivo:** determinar el efecto de las condiciones de pirólisis sobre las propiedades químicas superficiales de biocarbones derivados de pinzote de palma africana, madera de ciprés y bambú. **Métodos:** empleamos dos modalidades de producción: una en un horno de campo Kon-Tiki y otra bajo condiciones controladas de laboratorio a cuatro temperaturas: 400 grados Celsius, 500 grados Celsius, 600 grados Celsius y 700 grados Celsius. Caracterizamos los biocarbones mediante análisis proximal, determinación de pH y conductividad eléctrica, análisis elemental de carbono,



hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno, medición del potencial zeta, titulación de Boehm y espectroscopía infrarroja, utilizando un carbón activado comercial como referencia. **Resultados:** el aumento de la temperatura redujo la materia volátil e incrementó el carbono fijo y las cenizas. El pH aumentó con la temperatura. El análisis elemental mostró un incremento de carbono hasta el 82% y una disminución de oxígeno e hidrógeno. Las proporciones atómicas entre hidrógeno y carbono orgánico y entre oxígeno y carbono orgánico disminuyeron progresivamente, indicando una alta estabilidad aromática. Se identificó el valor más elevado de nitrógeno en el pinzote de palma en comparación con el bambú y el ciprés, mientras que el azufre se mantuvo en niveles traza o indetectables. Los valores de potencial zeta se hicieron menos negativos con la temperatura debido a la desoxigenación superficial confirmada por espectroscopía infrarroja y titulación de Boehm. Frente al carbón activado, los biocarbones conservaron una mayor densidad de sitios activos. **Conclusiones:** los biocarbones de laboratorio presentaron propiedades más homogéneas y estabilidad estructural, mientras que los de campo mostraron mayor heterogeneidad química. Los criterios técnicos derivados de este estudio, como el gradiente de grupos funcionales, estabilidad aromática y carga superficial en función de la temperatura y la biomasa, constituyen una base para seleccionar el biocarbón más adecuado según el objetivo agronómico específico en condiciones tropicales.

Palabras clave: residuos agroindustriales, bioeconomía, enmienda, pirólisis, estabilidad aromática, horno Kon-Tiki.

El biocarbón es un material carbonoso obtenido mediante la pirólisis de biomasa en condiciones limitadas de oxígeno. En la última década, su estudio ha cobrado relevancia global por su capacidad para mejorar la salud del suelo, secuestrar carbono y promover la economía circular en la agricultura (Chin-Pampillo et al., 2021; Jeffery et al., 2017; Waheed et al., 2025;). Sin embargo, la eficacia del biocarbón como enmienda o adsorbente no es universal; depende intrínsecamente de su arquitectura química y estructural, la cual es moldeada por la interacción entre la naturaleza de la materia prima y las condiciones de operación, principalmente la temperatura y el tiempo de residencia (Lehmann & Joseph, 2015; Ok et al., 2015).

Durante el proceso termoquímico, la biomasa experimenta una transformación profunda: conforme aumenta la temperatura, se favorece la deshidratación y descarboxilación, lo que resulta en una pérdida progresiva de hidrógeno (H) y oxígeno (O) frente al enriquecimiento de carbono (C). Este fenómeno, reflejado en la disminución de las relaciones atómicas H/C y O/C, señala una transición de estructuras alifáticas reactivas hacia matrices aromáticas condensadas y recalcitrantes, fundamentales para la estabilidad del carbono en el ecosistema (Sahoo et al., 2021; Syguła et al., 2024; Zou et al., 2024). La naturaleza de estos cambios está íntimamente ligada a la degradación térmica de los componentes estructurales de la biomasa, lo cual determina la presencia de compuestos volátiles y la arquitectura final del material. Paralelamente, el análisis proximal (carbono fijo, materia volátil y cenizas) permite cuantificar este grado de carbonización y la estabilidad térmica del material producido (Lee et al., 2019; Sahoo et al., 2021).

Más allá de su composición elemental, la funcionalidad del biocarbón en el entorno edáfico está determinada por su química superficial. La presencia y tipo de grupos funcionales oxigenados, identificables mediante espectroscopía infrarroja (FTIR) y cuantificables por métodos como la titulación de Boehm, definen la reactividad del material. Estos grupos no solo influyen en la acidez o alcalinidad (pH) y la liberación de sales solubles (conductividad eléctrica, CE), sino que gobiernan el potencial zeta (PZ), un parámetro crítico para entender la estabilidad coloidal y la capacidad de intercambio catiónico en la interfaz sólido-líquido del suelo (McCall et al., 2025; Mukherjee et al., 2011).

En Costa Rica, la gestión de residuos lignocelulósicos representa un desafío ambiental crítico y, simultáneamente, una oportunidad estratégica de valorización. Cultivos de gran escala como la palma africana (*Elaeis guineensis*) generan volúmenes masivos de pinzote, cuyo manejo actual sigue siendo limitado (Soto-Muñoz et al., 2025), a lo que se suman los subproductos de la industria forestal como el ciprés (*Cupressus* sp.) y especies de rápido crecimiento como el bambú (*Guadua angustifolia*) (Gamboa-Gamboa & Hernández-Chaverri, 2025). Esta diversidad de biomásas ofrece características estructurales contrastantes que podrían dar lugar a biocarbones con propiedades fisicoquímicas radicalmente distintas. En este contexto, la búsqueda de alternativas sostenibles ha despertado un interés creciente (Ulate-Molina et al., 2025). A pesar de este potencial, la comprensión de cómo los métodos de producción locales y las variaciones en las condiciones de pirólisis afectan la química fina de la superficie de estos materiales sigue siendo un área que requiere una exploración más profunda para optimizar su uso como enmienda edáfica.

A pesar de que Espinoza-Marín et al. (2026) han contrastado la eficiencia y propiedades básicas de biocarbones producidos en sistemas Kon-Tiki y de laboratorio, la complejidad de su superficie activa requiere un estudio más exhaustivo. En este trabajo abordamos dicha brecha mediante la determinación de la predictibilidad del material en el suelo, analizando la dinámica de los grupos funcionales oxigenados (Goertzen et al., 2010), la estabilidad coloidal (potencial zeta) y la respuesta espectroscópica (FTIR) a través de un amplio gradiente de temperatura.

Por tanto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto del método de producción y de un rango de temperaturas más amplio (400°C, 500°C, 600°C y 700°C) sobre la funcionalización superficial y la estabilidad de biocarbones derivados de pinzote de palma, ciprés y bambú. Con esto, buscamos complementar la evidencia existente y establecer criterios técnicos de mayor precisión sobre la reactividad química de estos materiales para su futura aplicación como enmiendas sostenibles en condiciones tropicales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Producción de biocarbón: obtuvimos biocarbón a partir de biomasa de madera de ciprés (*Cupressus* sp.) (CI), pinzote de palma africana (*Elaeis guineensis*) (P) y bambú (*Guadua angustifolia*) (B). La selección de las materias primas se basó en su disponibilidad y en que presentan diferencias estructurales y composicionales relevantes, particularmente en su contenido de lignina, celulosa y fracción mineral, lo que influye directamente en su comportamiento térmico durante la pirólisis. Por ello, constituyen materiales adecuados para analizar cómo la naturaleza de la materia prima condiciona las propiedades fisicoquímicas del biocarbón resultante.

Realizamos la pirólisis en dos tipos de hornos: (i) un horno abierto tipo “Kon-Tiki” en campo, operado con cortina de llama, donde el proceso lo desarrollamos de manera discontinua mediante la adición progresiva de biomasa. En este sistema no establecimos un tiempo de residencia fijo, ya que depende de la dinámica de alimentación y de la combustión parcial del material; sin embargo, cada lote permaneció en la zona de pirólisis activa durante aproximadamente 40–60min, con temperaturas estimadas entre 500 y 600°C, según lo reportado por Cornelissen et al. (2017) para este tipo de sistema. Estas condiciones reflejan la naturaleza operativa del sistema, caracterizado por una distribución térmica heterogénea; (ii) un horno de laboratorio tipo mufla, operado bajo condiciones controladas a 400°C, 500°C, 600°C y 700°C, con un tiempo de residencia constante de 1h (TABLA 1).

La selección de este rango de temperaturas nos permitió evaluar de manera sistemática el efecto de la severidad térmica sobre las propiedades del biocarbón, incluyendo condiciones más



bajas (400°C) asociadas a mayor retención de grupos funcionales, y más altas (700°C) vinculadas a mayor aromatización y estabilidad.

Posteriormente, trituramos los biocarbones en mortero y los tamizamos utilizando mallas N°14 y N°20 (aberturas de 1,41mm y 0,84mm, respectivamente). La selección de este rango de tamaño de partícula siguió los criterios establecidos por el International Biochar Initiative (IBI, 2015) para la estandarización de muestras de biocarbón destinadas a caracterización fisicoquímica. Realizamos todas las evaluaciones para cada combinación material/horno.

TABLA 1

Descripción de combinaciones de biomasa y tipo de pirólisis para obtención de biocarbón

Experimento	Horno	Biomasa	Tratamiento
1	Campo (C, Kon-Tiki)	Pinzote de palma (P)	CP
2	Laboratorio (L, Mufla)	Pinzote de palma(P)	LP
3	Campo (C, Kon-Tiki)	Ciprés (CI)	CCI
4	Laboratorio (L, Mufla)	Ciprés (CI)	LCI
5	Campo (C, Kon-Tiki)	Bambú (B)	CB
6	Laboratorio (L, Mufla)	Bambú (B)	LB

Uso de carbón activado como material de referencia: como material de referencia utilizamos carbón activado en polvo de grado analítico (Merck, 2026). Este estándar presenta un contenido de cenizas $\leq 1\%$ (600°C), una capacidad de adsorción de yodo $\geq 70\text{ml/g}$ y un pH en solución acuosa de 4,0 a 7,0. Su incorporación permite verificar la adecuación y sensibilidad de los métodos empleados, como el PZ, la determinación de grupos funcionales y los análisis texturales, ya que estos procedimientos se desarrollaron y optimizaron originalmente para materiales altamente porosos como el carbón activado. Al incluir este material de referencia, aseguramos que las metodologías aplicadas a los biocarbones sean comparables, reproducibles y capaces de detectar diferencias reales entre muestras con características físicas y químicas contrastantes. Además, el uso del carbón activado proporciona un punto de referencia para interpretar el desempeño de los biocarbones en relación con un material adsorbente reconocido, permitiendo contextualizar su potencial funcional en aplicaciones ambientales o agrícolas.

Caracterización del biocarbón: la selección de las propiedades fisicoquímicas analizadas se fundamentó en su relevancia para evaluar la calidad y funcionalidad del biocarbón en aplicaciones agrícolas y ambientales. La determinación del pH y la CE permitió evaluar la alcalinidad y la concentración de sales solubles, propiedades relevantes para su aplicación en suelos. La cuantificación de compuestos orgánicos volátiles (COV), cenizas y carbono fijo (CF) brindó información sobre el grado de carbonización y la estabilidad térmica de los materiales. El PZ se analizó para estimar la carga superficial de las partículas y su estabilidad coloidal en medios acuosos. El análisis elemental (CHNS/O) permitió establecer la composición química del biocarbón y su grado de aromatización, mientras que la determinación de grupos funcionales oxigenados, carboxílicos, lactónicos y fenólicos aportó evidencia sobre la naturaleza de las superficies reactivas, fundamentales para entender la interacción del biocarbón con el entorno y su potencial uso ambiental o agrícola. Para cada variable realizamos tres réplicas (n=3).

pH y conductividad eléctrica: para cada tratamiento, preparamos una suspensión sólido-líquido en una relación 1:10 (m/v) con agua desionizada. Las suspensiones se sometieron a agitación constante durante 1h en un agitador rotativo de 360°. Posteriormente, realizamos una filtración simple con papel filtro cualitativo P4 (Fisherbrand). El filtrado resultante se empleó para la medición directa de pH y CE, utilizando un medidor multiparámetro portátil (Thermo Scientific-Orion Star A329, EE.UU.).

Análisis proximal: determinamos el COV, cenizas, y el contenido de CF. Pesamos 1,0g de biocarbón en crisoles de porcelana y determinamos el COV mediante calentamiento en mufla a 950°C durante 10min, y las cenizas mediante calentamiento en mufla a 750°C durante 6h. Después de cada calentamiento, colocamos las muestras en un desecador hasta su enfriamiento y las pesamos para calcular COV (ecuación [1]) y Cenizas (ecuación [2]). Calculamos el porcentaje de CF por diferencia entre COV y Cenizas (ecuación [3]).

$$\text{COV (\%)} = \left(\frac{m_{\text{COV}}}{m_{\text{seca}}} \right) \times 100 \quad [1]$$

$$\text{Cenizas (\%)} = \left(\frac{m_{\text{cenizas}}}{m_{\text{seca}}} \right) \times 100 \quad [2]$$

$$\text{Carbono fijo (\%)} = \left(\frac{m_{\text{seca}} - m_{\text{COV}} - m_{\text{cenizas}}}{m_{\text{seca}}} \right) \times 100 \quad [3]$$

Donde, m_{seca} : masa seca de la muestra (g), m_{COV} : masa correspondiente a la fracción volátil (g), calculada como $m_{\text{seca}} - m_{\text{remanente}}$, m_{cenizas} : masa de la fracción de cenizas obtenida tras calcinación (g).

Potencial zeta: determinamos el PZ de los biocarbones producidos en campo y en laboratorio (400 y 600°C). Preparamos suspensiones de 1g L^{-1} en una solución de NaCl 0,005M como electrolito de soporte para asegurar una conductividad adecuada y mantener una fuerza iónica constante, estableciendo una fuerza iónica uniforme entre muestras que permite longitudes de Debye comparables y valores de potencial zeta reproducibles, de acuerdo con los principios de la doble capa eléctrica. El pH de las suspensiones fue medido en equilibrio para considerar su influencia directa sobre el PZ, sin realizar ajustes químicos externos. Las mediciones se efectuaron en un analizador Zetasizer Ultra (Malvern Panalytical, Reino Unido) en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica. El potencial zeta fue determinado con una única preparación por muestra; la variabilidad reportada ($\pm 0,01\text{mV}$) corresponde a la repetibilidad instrumental, por lo que los resultados deben interpretarse como exploratorios.

Análisis elemental (CHNS/O): realizamos el análisis elemental (CHNS/O) para determinar la composición de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N), azufre (S) y oxígeno (O) en los biocarbones producidos en campo y en laboratorio a 400°C y 600°C. Tomamos aproximadamente un gramo de cada muestra y efectuamos las determinaciones siguiendo los métodos estándar del equipo, que especifican las condiciones de operación para los análisis de CHNS y O. Utilizamos compuestos patrón de referencia para construir la curva de calibración y asegurar el control de calidad (QC): 2,5-bis-(5-terc-butyl-benzoxazol-2-il) tiopeno (BBOT) para CHNS y ácido benzoico para oxígeno. Llevamos a cabo el análisis en un analizador elemental CHNS/O FlashSmart (Thermo Scientific, EE. UU.) en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de Costa Rica.

El análisis elemental y la medición de potencial zeta se realizaron para los tratamientos de campo, 400°C y 600°C, debido a limitaciones económicas. Seleccionamos todos los de campo y



400°C y 600°C, ya que estos puntos representan un extremo y el valor intermedio del gradiente estudiado, lo que nos permitió identificar tendencias generales.

Determinación de los grupos funcionales oxigenados: pesamos 10g de biocarbón y los suspendimos en 500mL de HCl (0,05mol L⁻¹). Ajustamos el pH entre uno y dos mediante la adición controlada de HCl concentrado y mantuvimos la mezcla en agitación durante 24h a temperatura ambiente. Luego filtramos la suspensión al vacío y sometimos el sólido recuperado a dos lavados con CaCl₂ un mol L⁻¹, 15min cada uno, seguidos por dos lavados con agua destilada y uno con agua desionizada (10min cada uno), hasta alcanzar un pH cercano a cinco. Secamos las muestras en incubadora a 25°C durante siete días.

Posteriormente, pesamos 0,5g de biocarbón seco y tratado, y lo colocamos en tubos de centrífuga junto con 25mL de una de las soluciones básicas de Boehm (NaOH, NaHCO₃ o Na₂CO₃, todas a 0,05mol L⁻¹). Preparamos seis réplicas por tipo de base, para un total de 18 muestras. Agitamos las suspensiones durante 24h y filtramos los sólidos. Tomamos 10mL de los filtrados. Al filtrado de NaOH adicionamos 10mL de BaCl₂ (1mol L⁻¹), a los extractos de Na₂CO₃ añadimos 10mL de BaCl₂ (1mol L⁻¹) y 10mL de NaOH (0,05mol L⁻¹). Centrifugamos las soluciones a 4 000rpm por 10min y extrajimos alícuotas de 10mL de cada extracto para la titulación (Goertzen et al., 2010).

Realizamos la titulación directa de las muestras tratadas con NaOH usando HCl (0,05mol L⁻¹) como titulante. Para las soluciones de NaHCO₃ y Na₂CO₃, efectuamos valoraciones indirectas: añadimos 10mL de HCl (0,05mol L⁻¹) antes de titular con NaOH (0,05mol L⁻¹). Todas las soluciones ácidas y básicas fueron previamente estandarizadas con ftalato ácido de potasio. Calculamos la concentración de grupos funcionales superficiales (n_iCSF_i) a partir del consumo de titulante, diferenciando entre valoraciones directas e indirectas según las ecuaciones [4] y [5].

$$n_{CSF} = \frac{n_{HCl}}{n_B} [B]V_B - ([HCl]V_{HCl} - [NaOH]V_{NaOH}) \frac{V_B}{V_a} \quad [4]$$

$$n_{CSF (NaOH)} = [NaOH]V_{NaOH} - ([HCl]V_{HCl}) \frac{V_{NaOH}}{V_a} \quad [5]$$

Donde, **n_iCSF_i**: cantidad de grupos funcionales superficiales (mmol g⁻¹ de biocarbón), **[B]**: concentración de la base de reacción de Boehm (mol L⁻¹). **V_B**: volumen de base de reacción añadido a la muestra (L). **[HCl]**: concentración de ácido clorhídrico utilizado en la valoración (mol L⁻¹). **V_{HCl}**: volumen de HCl añadido en la valoración (L), **[NaOH]**: concentración de NaOH utilizado como titulante en la valoración indirecta (mol L⁻¹). **V_{NaOH}**: volumen de NaOH consumido en la valoración (L). **V_a**: volumen de la alícuota extraída para la titulación (L).

Asignamos los grupos funcionales de la siguiente manera:

$$\text{Ácidos carboxílicos} = n_{CSF (NaHCO_3)} \quad [6]$$

$$\text{Ácidos lactónicos} = n_{CSF (Na_2CO_3)} - n_{CSF (NaHCO_3)} \quad [7]$$

$$\text{Ácidos fenólicos} = n_{CSF (NaOH)} - n_{CSF (Na_2CO_3)} \quad [8]$$

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier: realizamos el análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) con el propósito de identificar los

diferentes grupos funcionales oxigenados presentes en la superficie de los biocarbones obtenidos en campo y en laboratorio. Utilizamos un espectrómetro Nicolet 6700 FTIR (Thermo Scientific, EE.UU.), equipado con un accesorio de reflectancia difusa (DR-FTIR). Los espectros se registraron en el rango de 4 000 a 450 cm^{-1} , con una resolución espectral de 4 cm^{-1} y seis barridos por espectro. Las bandas se asignaron según (McCall et al., 2025). Para la medición, pulverizamos las muestras de biocarbón hasta obtener partículas finas y las colocamos en copas de aluminio de 9mm de diámetro y 2mm de profundidad. Cada copa la posicionamos cuidadosamente en el soporte del accesorio DR-FTIR, donde registramos los espectros correspondientes bajo las condiciones operativas del equipo.

Análisis estadístico: realizamos el análisis de los datos mediante la técnica Bootstrap, adecuada para conjuntos de datos no paramétricos y con un número limitado de réplicas ($n=3$ por tratamiento), ya que permite estimar intervalos de confianza sin asumir una distribución específica (Navidi, 2006). Este enfoque se aplicó a los resultados de titulación de Boehm, pH, conductividad eléctrica y análisis proximal. Dado el número limitado de réplicas, el análisis permitió comparaciones dentro de cada biocarbón, pero no inferencias formales entre sistemas de producción. La comparación entre tratamientos se realizó evaluando el solapamiento de intervalos de confianza: cuando los intervalos no se superponen, hay evidencia de diferencia significativa; cuando se solapan, no es posible afirmarla (Navidi, 2006). Los resultados se presentan como barras de error que representan estos intervalos. La implementación se realizó con el paquete boot en RStudio versión 4.2.2

RESULTADOS

pH y conductividad eléctrica (CE)

El análisis mediante remuestreo Bootstrap permitió identificar tendencias robustas y diferenciar el comportamiento de los biocarbones según la biomasa y el sistema de producción (Fig. 1).

En cuanto a la CE, el biocarbón de bambú mostró los valores más elevados y una separación clara de sus intervalos de confianza respecto a las demás biomásas. El valor máximo se registró en el tratamiento de laboratorio a 700°C (LB 700: $3\,598 \pm 26,87\mu\text{S cm}^{-1}$). Al comparar los sistemas de producción, el LB 700 superó significativamente al biocarbón de campo (CB: $2\,137,67 \pm 1048,41\mu\text{S cm}^{-1}$); sin embargo, el amplio intervalo de confianza observado en el CB refleja la alta heterogeneidad inherente a la pirólisis en sistemas abiertos, donde la concentración de sales no es uniforme. Por el contrario, los biocarbones de ciprés y pinzote mostraron una CE consistentemente baja, con los valores mínimos en el ciprés a 400°C (LCI 400: $84,94 \pm 3,32\mu\text{S cm}^{-1}$) (Fig. 1A).

Respecto al pH, se determinó un incremento en la alcalinidad asociado a la temperatura en el bambú y el ciprés, con intervalos que se desplazan hacia valores $> 9,0$ a partir de los 500°C. Los máximos se alcanzaron en el bambú (LB 500: $10,18 \pm 0,41$ y CB: $10,04 \pm 0,06$). En contraste, el pinzote y el ciprés a 400°C mantuvieron valores cercanos a la neutralidad (LP 400: $6,98 \pm 0,75$; LCI 400: $6,51 \pm 0,08$) (Fig. 1B). Un hallazgo distintivo es la estabilidad del pH en el pinzote de palma, cuyos intervalos de confianza se traslapan en los diferentes niveles de temperatura, indicando que, para esta biomasa, el método de producción y la intensidad térmica tienen un efecto marginal sobre la alcalinidad final.

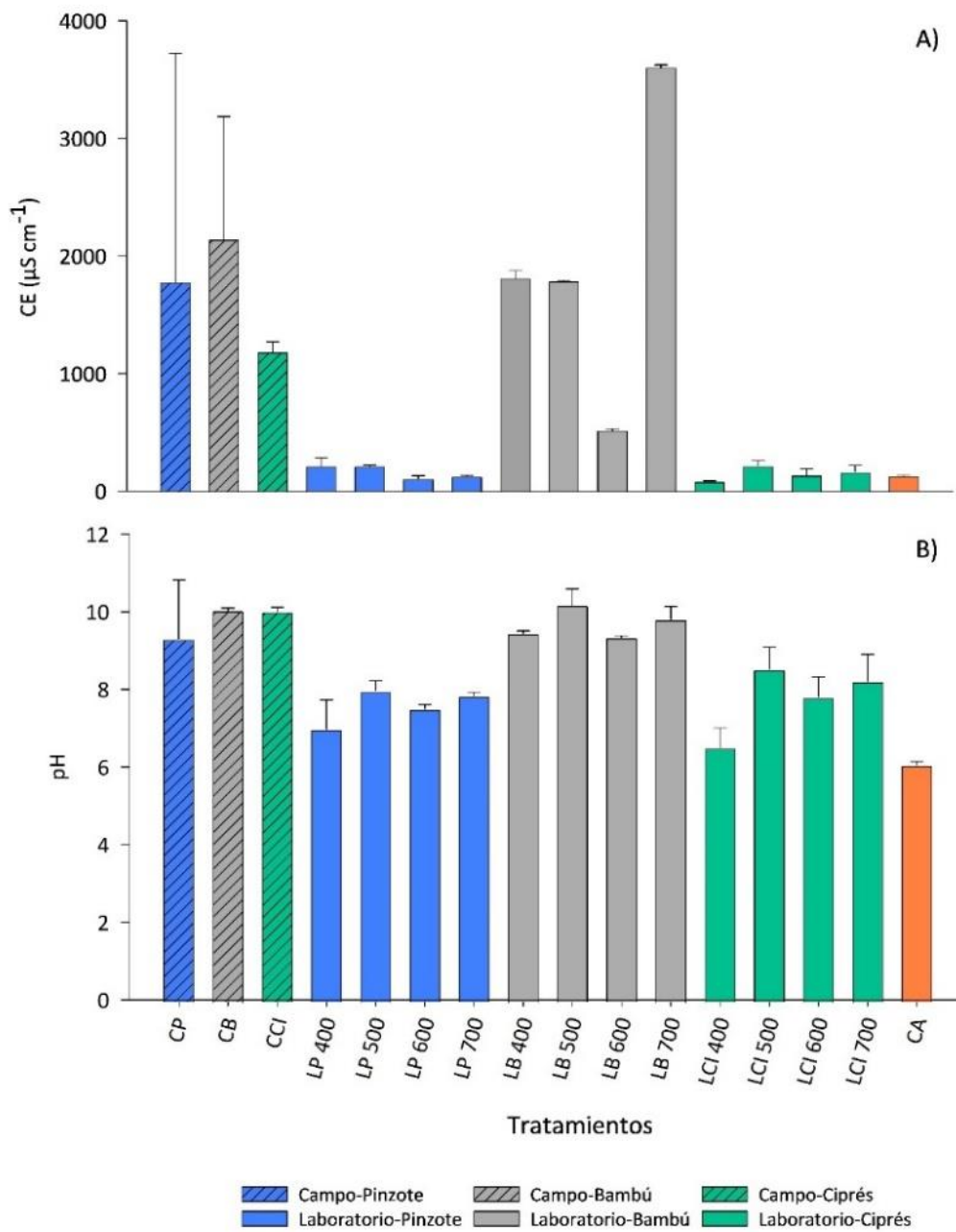


Fig. 1. A) Conductividad eléctrica (CE) ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y B) pH. Hornos de pirólisis (primera letra): C: horno abierto en campo, L: horno de laboratorio. Biomásas (segunda letra): P: pinzote de palma, CI: ciprés, B: bambú. CA: carbón activado. Los números después del código corresponden a las temperaturas de pirólisis ($^{\circ}\text{C}$). Las barras de error corresponden a los intervalos de confianza. $n=3$.

Análisis proximal: carbono fijo, cenizas y materia volátil

Los componentes del análisis proximal mostraron una dependencia marcada tanto de la temperatura como de la naturaleza estructural de la biomasa (Fig. 2).

El CF, indicador directo del grado de carbonización y recalcitrancia, alcanzó sus niveles máximos en los biocarbones de ciprés a altas temperaturas. Los tratamientos LCI 700 ($87,55 \pm 0,89\%$) y LCI 600 ($86,45 \pm 0,35\%$) presentaron intervalos de confianza superiores e independientes de las demás biomásas, superando incluso al estándar de carbón activado ($85,45 \pm 5,30\%$). Por el contrario, el pinzote de campo (CP) registró el CF más bajo ($45,85 \pm 5,61\%$), lo que, sumado a su alta variabilidad, confirma una transformación incompleta de la biomasa bajo condiciones de pirólisis no controlada.

En cuanto al contenido de cenizas, se observó un contraste drástico entre biomásas. Los biocarbones de pinzote exhibieron los valores más elevados, con intervalos que se solapan entre la producción de campo ($26,16 \pm 8,60\%$) y la de laboratorio a 700°C ($23,52 \pm 0,53\%$), sugiriendo que la acumulación de material inorgánico en esta especie es intrínseca y poco dependiente del método de calentamiento. En el extremo opuesto, el ciprés destacó por su pureza orgánica, con contenidos de cenizas mínimos ($0,72 \pm 0,05\%$), similares a los del carbón activado comercial ($0,26 \pm 0,21\%$).

Finalmente, los COV mostraron una relación inversamente proporcional a la temperatura de producción. Los niveles más altos de COV se concentraron en los tratamientos de 400°C (LCI 400: $32,03 \pm 0,96\%$; LP 400: $31,27 \pm 0,99\%$), donde la degradación de la hemicelulosa y celulosa es aún parcial. A 700°C , la liberación de estos compuestos fue casi total, especialmente en el bambú ($5,57 \pm 1,68\%$), lo que indica la formación de una estructura carbonosa más porosa y estable.



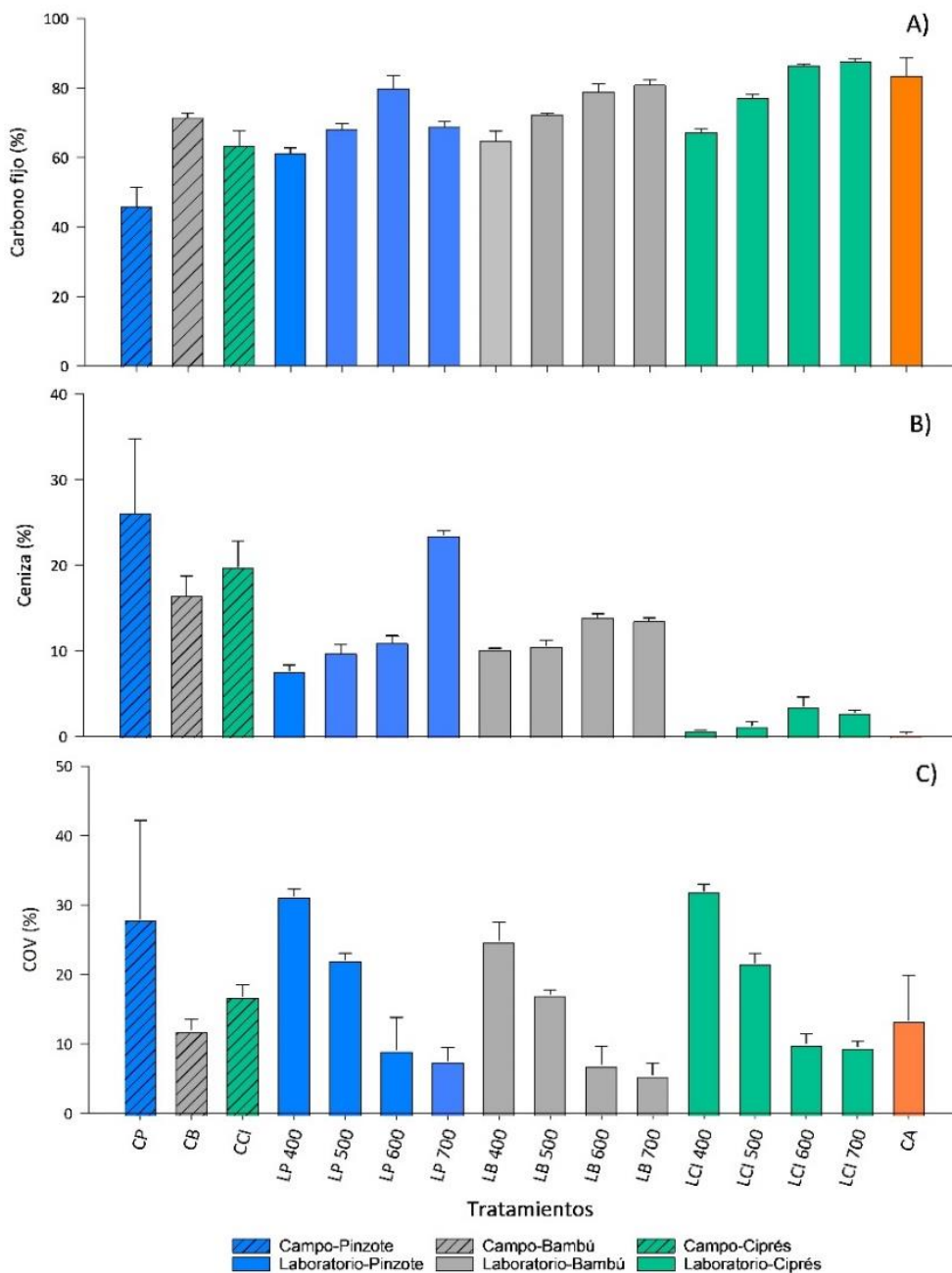


Fig. 2. A) Carbono fijo (%), B) Cenizas (%) y C) Carbono orgánico volátil (COV) (%). Hornos de pirólisis (primera letra): C: horno abierto en campo, L: horno de laboratorio. Biomásas (segunda letra): P: pinzote de palma, Cl: ciprés, B: bambú. CA: carbón activado. Los números después del código corresponden a las temperaturas de pirólisis (°C). Las barras de error corresponden a los intervalos de confianza n=3.

Potencial zeta

El PZ mostró cambios críticos en la densidad de carga superficial condicionados por la temperatura y el sistema de pirólisis (TABLA 2). En condiciones de laboratorio, los biocarbones de pinzote y bambú mostraron una pérdida de carga negativa al aumentar la temperatura de 400°C a 600°C (de -13,16 a -7,35mV en pinzote y de -4,87 a -2,43mV en bambú). Sin embargo, el biocarbón de ciprés exhibió un comportamiento anómalo e inverso: a 400°C presentó una carga casi neutra (-1,15mV), mientras que a 600°C incrementó significativamente su carga negativa hasta alcanzar -13,00mV.

En los sistemas de campo, los resultados divergen drásticamente de los de laboratorio. El biocarbón de bambú (CB) mantuvo una carga negativa (-6,25mV), pero el pinzote de campo (CP) registró una inversión de carga hacia valores positivos (+11,24mV). Por su parte, el ciprés de campo (CCI) alcanzó el punto isoeléctrico (0,00mV), indicando una superficie eléctricamente neutra y una tendencia a la floculación en medio acuoso.

TABLA 2

Potencial zeta de biocarbones obtenidos a partir de diferentes biomásas y condiciones de pirólisis.

Tratamiento	Potencial zeta ($\pm 0,01$) mV
CP	11,24
CB	-6,25
CCI	0,00
LP 400	-13,16
LP 600	-7,35
LB 400	-4,87
LB 600	-2,43
LCI 400	-1,15
LCI 600	-13,00

Nota: los códigos indican el tipo de horno utilizado (primera letra: C = horno abierto en campo; L = horno de laboratorio) y la biomasa de origen (segunda letra: P = pinzote de palma, CI = ciprés, B = bambú). Los números después del código corresponden a las temperaturas de pirólisis (°C). Los valores se expresan en milivoltios (mV) con una repetibilidad instrumental de $\pm 0,01$.

Análisis elemental

La composición elemental de los biocarbones (TABLA 3) reflejó una carbonización avanzada, con contenidos de C_{org} que incrementaron significativamente con la temperatura, alcanzando un máximo de $82 \pm 1\%$ en el ciprés de laboratorio a 600°C (LCI 600). En contraste, el hidrógeno y el oxígeno disminuyeron drásticamente, lo que resultó en relaciones atómicas H: C_{org} entre 0,26 y 0,60, y O: C_{org} entre 0,04 y 0,18.

Un hallazgo relevante fue la variabilidad en el contenido de Nitrógeno (N), donde el pinzote de palma (LP 600) destacó con el valor más alto ($1,61 \pm 0,01\%$), superando considerablemente al bambú ($0,31 \pm 0,08\%$) y al ciprés ($0,21 \pm 0,02\%$). Por su parte, el azufre (S) se mantuvo en concentraciones traza ($<0,07\%$) o por debajo del límite de detección en el caso de las muestras de ciprés, lo que subraya la baja carga mineral de azufre en esta especie forestal.

TABLA 3

Análisis elemental (CHNS/O) y relaciones atómicas de biocarbones de pinzote de palma, bambú y ciprés producidos bajo condiciones de campo y laboratorio.

Muestra	Contenido (%masa)					^b H:C _{org}	^b O:C _{org}
	C _{org}	H	O	N	S		
CP	63 ± 1	2,1 ± 0,3	10,0 ± 0,3	0,82 ± 0,03	0,07 ± 0,01	0,40	0,12
LP 400	71 ± 1	3,6 ± 0,2	16,8 ± 0,5	1,31 ± 0,04	0,03 ± 0,01	0,60	0,18
LP 600	79 ± 2	2,2 ± 0,1	5,7 ± 0,5	1,61 ± 0,01	0,04 ± 0,01	0,33	0,05
CB	70 ± 2	1,9 ± 0,7	9,0 ± 0,2	0,71 ± 0,06	0,06 ± 0,01	0,32	0,10
LB 400	69 ± 1	3,5 ± 0,2	15,3 ± 0,5	0,44 ± 0,06	0,03 ± 0,01	0,60	0,17
LB 600	79 ± 2	2,1 ± 0,2	4,7 ± 0,5	0,31 ± 0,08	0,02 ± 0,01	0,32	0,04
CCI	78 ± 1	1,7 ± 0,2	9,4 ± 0,3	0,15 ± 0,01	<LD ^a	0,26	0,09
LCI 400	73,4 ± 0,2	3,6 ± 0,2	15,1 ± 0,5	0,15 ± 0,01	<LD ^a	0,58	0,15
LCI 600	82 ± 1	2,4 ± 0,1	7,0 ± 0,4	0,21 ± 0,02	<LD ^a	0,35	0,06

Nota: los valores representan el promedio ± desviación estándar.

^aLD: por debajo del límite de detección / ^b Las relaciones calculadas sobre una base molar (atómica).

Nota: el carbono reportado corresponde a carbono total determinado por análisis elemental CHNS. No se realizó corrección por fracción inorgánica (carbonatos); dado el alto contenido de cenizas en el pinzote, el valor de C_{org} podría estar sobreestimado para esta biomasa

El análisis elemental reveló una transformación de la estructura orgánica en función de la intensidad térmica y el origen de la biomasa (Fig. 3). Bajo condiciones de laboratorio, se observó que a 600°C existe una mayor concentración de carbono orgánico (C_{org}) en comparación con los tratamientos a 400°C. En contraste, las concentraciones de H y O fueron significativamente superiores en los biocarbones elaborados a baja temperatura (400°C), lo que refleja una presencia mayor de estructuras alifáticas y grupos funcionales oxigenados que aún no se han volatilizado.

Respecto a la pirólisis de campo, los biocarbones generados en el horno Kon-Tiki (CP, CB, CCI) exhibieron valores de C_{org}, H y O intermedios entre los tratamientos de 400°C y 600°C de laboratorio, con una tendencia marcada hacia las propiedades de los materiales producidos a la temperatura más elevada. Este hallazgo indica que, a pesar de las diferencias operativas entre ambos sistemas, temperatura estimada y residencia variable en el Kon-Tiki frente a condiciones controladas en la mufla, los productos finales obtenidos en campo mostraron composición elemental intermedia entre los tratamientos de 400°C y 600°C de laboratorio, lo que sugiere un grado de carbonización avanzado bajo estas condiciones específicas de producción.

La evolución de las relaciones atómicas se visualiza en el diagrama de Van Krevelen (Fig. 3). Los biocarbones de 600°C y los de campo se agruparon en la zona de mayor aromaticidad (relaciones H/C_{org} y O/C_{org} próximas a cero), lo que indica una estructura altamente condensada y recalcitrante. Por el contrario, los tratamientos a 400°C se ubicaron en una región de menor madurez térmica, caracterizada por una estructura menos condensada, lo que les confiere una mayor reactividad potencial pero una menor estabilidad a largo plazo en el suelo.

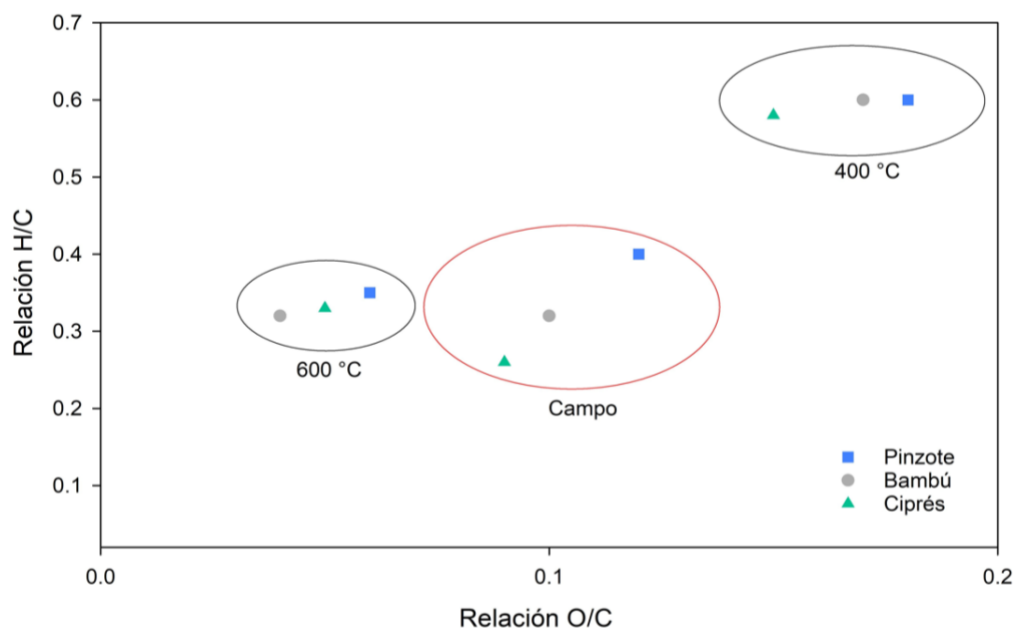


Fig. 3. Diagrama Van Krevelen para las relaciones atómicas de H/C_{org} y O/C_{org} de biocarbones obtenidos a partir de Pinzote, Bambú y Ciprés, producidos bajo campo y en laboratorio a 400°C y 600°C.

Determinación de los grupos funcionales oxigenados

La distribución de los grupos funcionales oxigenados mostró una dependencia crítica de la biomasa y las condiciones térmicas (Fig. 4).

En cuanto a los grupos carboxílicos (Fig. 4A), el biocarbón de pinzote de palma presentó las concentraciones más elevadas, destacando el tratamiento de campo (CP: $0,78 \pm 0,64 \text{ mmol g}^{-1}$) y el de laboratorio a 500°C (LP 500: $0,29 \pm 0,06 \text{ mol g}^{-1}$), si bien la alta variabilidad en el sistema de campo sugiere una funcionalización heterogénea. El ciprés mostró valores intermedios y una notable estabilidad térmica ($0,08 - 0,17 \text{ mmol g}^{-1}$), mientras que en el bambú la presencia de estos grupos fue prácticamente nula. Por su parte, el carbón activado (CA) exhibió una concentración baja pero detectable, situándose por debajo de los niveles del pinzote y el ciprés ($0,21 \pm 0,18 \text{ mmol g}^{-1}$).

Respecto a los grupos lactónicos (Fig. 4B), estos resultaron ser más abundantes en los biocarbones de bambú, con valores máximos registrados en el sistema de campo (CB: $0,39 \pm 0,06 \text{ mmol g}^{-1}$) y a 500°C en laboratorio (LB 500: $0,38 \pm 0,01 \text{ mmol g}^{-1}$). En contraste, el ciprés mostró niveles intermedios, mientras que el pinzote de palma presentó la menor densidad de este grupo funcional, con valores cercanos a cero o por debajo del límite de detección en el caso del tratamiento de campo (CP). El carbón activado se situó en un rango intermedio ($0,30 \pm 0,16 \text{ mmol g}^{-1}$), siendo superado por el bambú.

Finalmente, los grupos fenólicos constituyeron la fracción predominante en todos los materiales (Fig. 4C). Se observó una reducción de estos grupos al aumentar la temperatura, con máximos a 400°C en pinzote (LP 400: $1,58 \pm 0,17 \text{ mmol g}^{-1}$) y bambú (LB 400: $1,49 \pm 0,01 \text{ mmol g}^{-1}$). Es importante resaltar que todos los biocarbones producidos, incluso a 600°C, superaron

significativamente la concentración de grupos fenólicos del carbón activado ($0,43 \pm 0,05 \text{ mmol g}^{-1}$), lo que confirma una mayor densidad de sitios reactivos en los materiales evaluados.

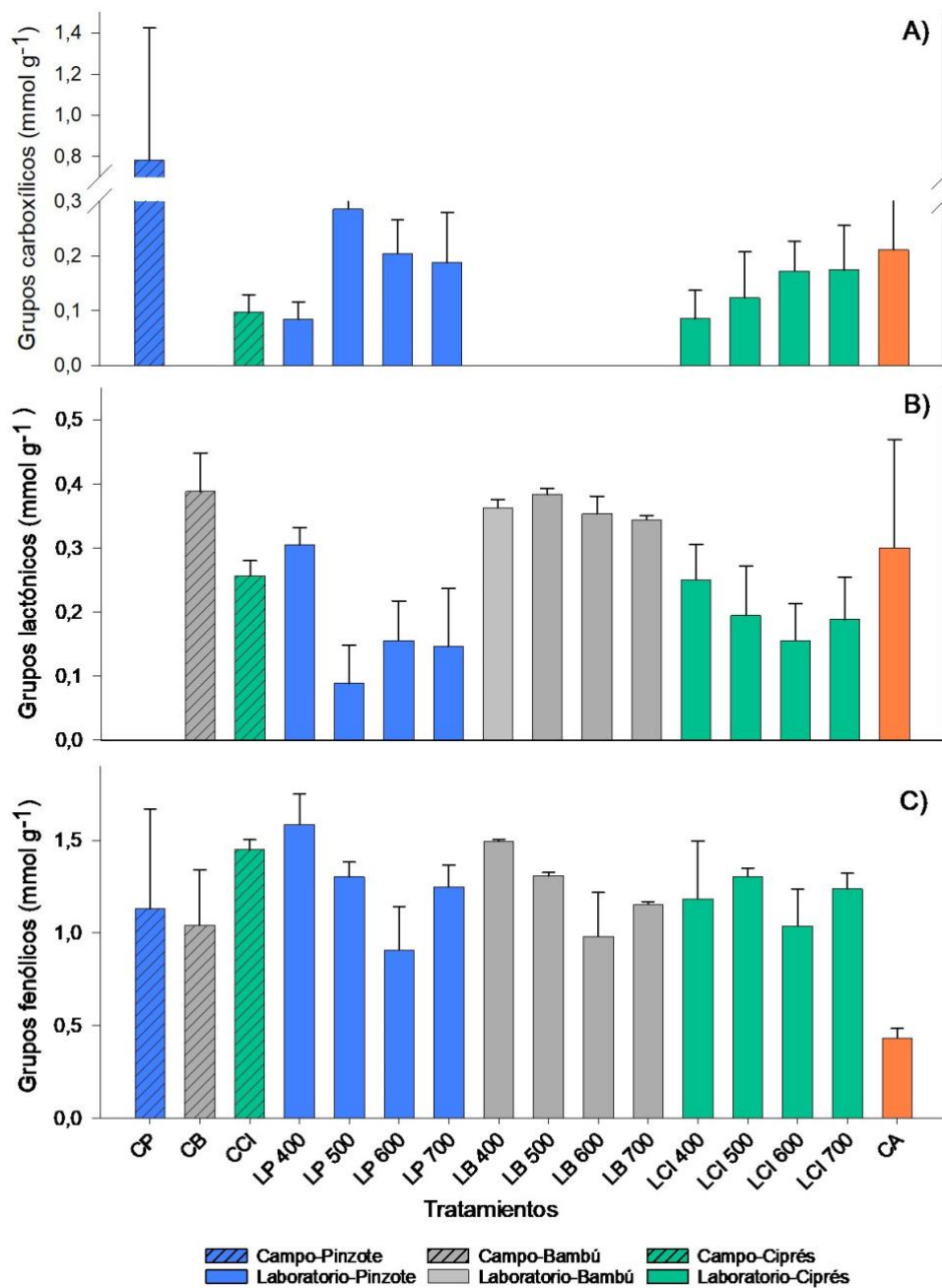


Fig. 4. A) Grupos oxigenados carboxílicos (mmol g^{-1}), B) Grupos lactónicos (mmol g^{-1}) y C) Grupos fenólicos (mmol g^{-1}) en la superficie del biocarbón. Hornos de pirólisis (primera letra): C: horno abierto en campo, L: horno de laboratorio. Biomásas (segunda letra): P: pinzote de palma, Cl: ciprés, B: bambú. CA: carbón activado. Los números después del código corresponden a las temperaturas de pirólisis ($^{\circ}\text{C}$). Las barras de error corresponden a los intervalos de confianza. $n=3$.

Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros FTIR permitieron identificar la evolución de los enlaces químicos en los biocarbones, evidenciando cambios estructurales profundos condicionados por la temperatura de pirólisis y el sistema de producción (Fig. 5).

En el gradiente de laboratorio de 400°C a 600°C (Fig. 5b-5d), se confirmó una reducción progresiva en la intensidad de las bandas de grupos oxigenados. A 400°C, los espectros presentan señales intensas en la región de 3 400cm⁻¹ (estiramiento O–H) y picos en torno a 2 930cm⁻¹ (C–H alifáticos), junto con bandas definidas entre 1 700 y 1 600cm⁻¹ (C=O y C=C) y en la región de 1 300–1 200cm⁻¹ (C–O de ésteres y lactonas). A 500°C, estas bandas comienzan a atenuarse debido a la deshidratación térmica. Al alcanzar los 600°C, las señales asociadas a O–H y C–O prácticamente desaparecen, consolidando una estructura carbonosa más estable donde las bandas de flexión C–H (≈830cm⁻¹) alcanzan su máxima expresión.

Los espectros a 700°C (Fig. 5e) presentaron ausencia de bandas definidas en las regiones de O–H (3 400cm⁻¹) y C=O (1 700cm⁻¹), reflejando una matriz altamente carbonizada con mínima presencia de grupos funcionales oxigenados.

En contraste, los biocarbones producidos bajo condiciones de campo mostraron una composición funcional más heterogénea (Fig. 5a). A diferencia de la linealidad observada a 700°C, las muestras de campo conservaron picos de absorción definidos, incluyendo bandas amplias entre 3 400 y 3 500cm⁻¹ (O–H) y señales en el rango de 1 270–1 300cm⁻¹ (C–O de ésteres y lactonas). Es especialmente notoria la separación de la línea del bambú de campo, la cual presentó una mayor intensidad de absorbancia (entre 1,3 y 1,5) a lo largo del espectro. Finalmente, las bandas cercanas a 800–820cm⁻¹ (flexión C–H) confirman la presencia de estructuras aromáticas condensadas de forma similar en los tres materiales de campo, lo que sugiere un grado de aromaticidad comparable en el sistema abierto para todas las biomásas.

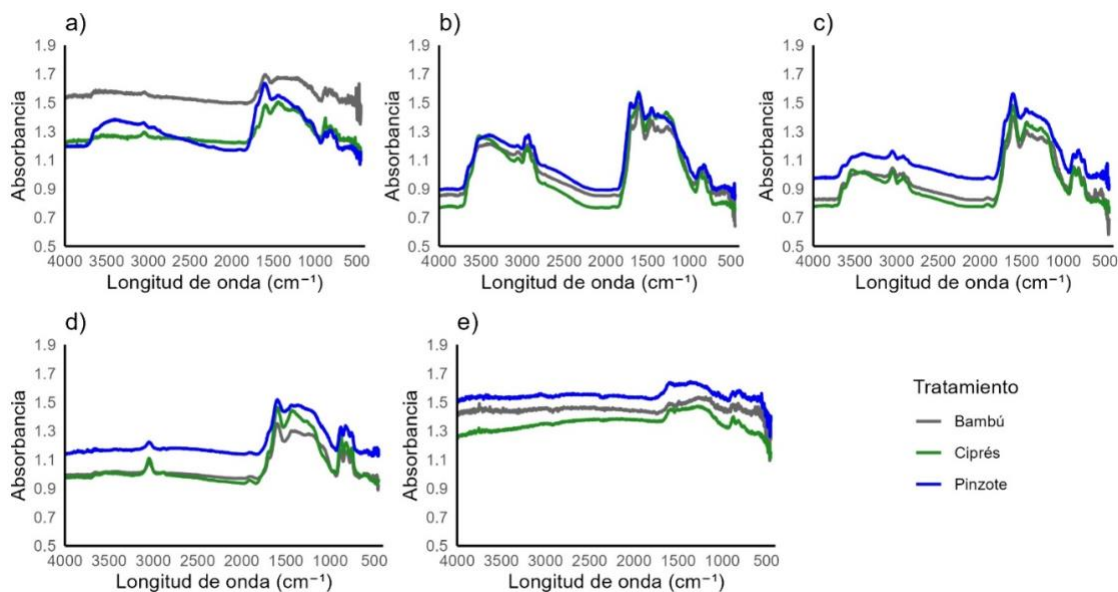


Fig. 5. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) de los biocarbones producidos bajo condiciones de a) campo, b) laboratorio a 400°C, c) laboratorio a 500°C, d) laboratorio a 600°C y e) laboratorio a 700°C. Hornos de pirólisis (primera letra): C: horno abierto en campo, L: horno de laboratorio. Biomásas (segunda letra): P: pinzote de palma, Cl: ciprés, B: bambú.

DISCUSIÓN

El pH y la CE de los biocarbones reflejan el efecto combinado de la temperatura, la biomasa y el método de pirólisis sobre su composición química y mineral. El incremento de la temperatura condujo a valores de pH más alcalinos, alcanzando el máximo en el biocarbón de bambú a 500°C, mientras que los valores más bajos se observaron en pinzote y ciprés a 400°C. Este comportamiento se atribuye a la descomposición térmica de la materia orgánica y a la formación de carbonatos, óxidos e hidróxidos alcalinos derivados de la fracción mineral (Singh et al., 2017; Tomczyk et al., 2020). En paralelo, la CE presentó los valores más altos en el biocarbón de bambú elaborado en laboratorio a 700°C y en el biocarbón de ciprés producido en condiciones de campo, lo que evidencia una mayor acumulación de sales solubles como Na^+ , K^+ y Ca^{2+} bajo condiciones de pirólisis más severas o menos controladas (Gabhi et al., 2020; Świechowski et al., 2022). La alta desviación estándar observada en los biocarbones de campo confirma la heterogeneidad térmica del proceso, mientras que los materiales obtenidos en laboratorio mostraron menor variabilidad.

Esta evolución mineral corre de forma paralela a la transformación de la matriz orgánica observada en los análisis proximales y elementales (TABLA 3). La reducción de los COV y el incremento correlativo del CF y las cenizas concuerdan con lo reportado por otros autores (Ronsse et al., 2013; Syguła et al., 2024 y Tomczyk et al., 2020), reflejando la pérdida de compuestos inestables y la condensación de la estructura carbonosa. El elevado contenido de cenizas del pinzote de palma (~26%) implica que carbonatos, óxidos e hidróxidos presentes en la fracción mineral podrían consumir parte de los reactivos ácidos y básicos de la titulación de Boehm, sobreestimando la densidad de grupos superficiales. En ausencia de blancos de cenizas y corrección por carbonatos, los valores deben interpretarse con cautela para esta biomasa.

Nuestros hallazgos concuerdan con lo reportado previamente para estas mismas biomásas, donde se determinó que el rendimiento de carbonización depende directamente de la composición lignocelulósica original y de la especie evaluada (Espinoza-Marín et al., 2026; Puma-Vaque, 2023). Un hallazgo distintivo en la composición elemental fue la concentración de N en el pinzote de palma, que alcanzó un máximo de 1,61% en la muestra LP 600, superando significativamente al bambú (0,31%) y al ciprés (0,21%). Esta diferencia sugiere que, mientras las biomásas forestales y gramíneas se orientan hacia la estabilidad estructural, el pinzote conserva una reserva proteica y de aminoácidos remanente de la biomasa original, lo que podría favorecer una menor relación C/N en el suelo y mitigar el efecto de "inmovilización" de nitrógeno tras su aplicación (Marhani et al., 2022). Por otro lado, las concentraciones de azufre se mantuvieron en niveles traza o por debajo del límite de detección (en el caso del ciprés), lo que minimiza el riesgo de acidificación por oxidación de azufre tras la incorporación de estos materiales al ecosistema edáfico. El desarrollo textural de estos biocarbones fue evaluado previamente por Espinoza-Marín et al. (2026), quienes reportaron áreas superficiales BET entre 28 y 329 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ para las mismas biomásas y sistemas de producción, con el ciprés de campo (CCI) mostrando el mayor desarrollo estructural. Estos datos contextualizan los resultados de grupos funcionales del presente estudio, donde la mayor densidad de sitios reactivos por masa no implica necesariamente mayor área superficial, sino una distribución diferencial de grupos oxigenados según la biomasa y la temperatura.

En el caso del ciprés (*C. lusitanica*), se ha documentado que temperaturas superiores a los 450°C son críticas para lograr una reducción sustancial de material volátil y alcanzar contenidos de carbono superiores al 80% (Rodríguez-Rosales, 2023), lo cual valida la alta estabilidad observada en nuestras muestras de laboratorio a 600°C. Al contrastar estos resultados con el carbón activado, se observa que este representa el límite superior de carbonización, un estado al que los biocarbones



de laboratorio a 700°C se aproximan, pero del cual los biocarbones de campo se alejan deliberadamente para preservar su reactividad superficial.

Según el diagrama de Van Krevelen, las relaciones atómicas H/C_{org} y O/C_{org} disminuyeron con la temperatura hacia valores de alta estabilidad (IBI, 2015; Spokas, 2010). Estos cambios en la arquitectura del carbono dictan directamente la reactividad de la superficie. La titulación de Boehm y el análisis FTIR coinciden en señalar la pérdida de grupos oxigenados conforme aumenta el calor, donde los grupos carboxílicos se reducen por deshidratación y formación de lactonas (Rivera-Prieto et al., 2021; Tsechansky & Graber, 2014). Esta caída en la acidez fuerte se vincula con el comportamiento del PZ; en el bambú y el pinzote, el PZ se volvió menos negativo al pasar de 400°C a 600°C debido a la eliminación de sitios de carga identificada en el FTIR mediante la atenuación de las bandas O–H y C=O (Agweh et al., 2024; Hong et al., 2019).

Para el pinzote de palma, se ha indicado que la intensidad de las vibraciones de hidroxilos y carbonilos disminuye progresivamente con el tratamiento térmico, marcando una transición hacia materiales con mayor grado de aromaticidad y estabilidad estructural (Marhani et al., 2022). Investigaciones recientes en esta misma biomasa subrayan que el aumento de la temperatura de pirólisis no solo reduce la funcionalidad superficial, sino que promueve la formación de estructuras de carbono nanocristalino, lo que explica la alta estabilidad química observada en materiales producidos por encima de los 500°C (Nugroho et al., 2025). Por el contrario, la tendencia opuesta del ciprés sugiere que el calor puede exponer superficies internas o liberar minerales retenidos que aportan carga negativa, compensando la pérdida química de grupos superficiales (Mitchell et al., 2013). Este fenómeno es consistente con la alta hidrofobicidad y el cambio estructural reportado para esta especie al superar los 450°C (Rodríguez-Rosales, 2023).

Finalmente, al contrastar los métodos de producción, los biocarbones de campo presentan una dualidad funcional única. Aunque su estabilidad estructural es comparable a la del laboratorio (Espinoza-Marín et al., 2026), conservan una mayor heterogeneidad química. En el bambú de campo, la coexistencia de alta aromaticidad con bandas intensas de O–H y C=O indica que el método Kon-Tiki produce partículas con un núcleo condensado pero una periferia funcionalizada. Esta distinción indica que, bajo las condiciones analíticas del método aplicado, los biocarbones evaluados retuvieron mayor densidad de grupos funcionales oxigenados por unidad de masa que el carbón activado de referencia; una comparación funcional más amplia requeriría normalización por área superficial (Espinoza-Marín et al., 2026) y mediciones de desempeño en suelo. No obstante, los datos de grupos funcionales y potencial zeta permiten diferenciar aplicaciones específicas: materiales como LP 400 y LCI 600, con valores de PZ más negativos, presentan mayor potencial para la retención de cationes (Farhangi-Abriz & Ghassemi-Golezani, 2023), mientras que materiales más estables como LB 600 o CCI son idóneos para el secuestro de carbono. Así, la superficie del biocarbón refleja un equilibrio entre la materia prima y el historial térmico que define su aptitud para aplicaciones agronómicas específicas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el financiamiento recibido de parte del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Costa Rica mediante el fondo FI-043B-19 y a la Universidad de Costa Rica, por medio del Proyecto C0518 BIOECODES: el biocarbón como estrategia de economía circular: valorización de residuos agroindustriales para la descarbonización y la protección de los recursos.



ÉTICA, CONFLICTO DE INTERESES Y DECLARACIÓN DE FINANCIAMIENTO

Declaramos haber cumplido con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la producción del manuscrito; que no existen conflictos de intereses de ningún tipo; que todas las fuentes financieras estén completa y claramente indicadas en la sección de agradecimientos; y que están totalmente de acuerdo con la versión final editada del artículo. Un documento firmado ha sido archivado en los archivos de la revista.

La declaración de la contribución de cada autor al manuscrito es la siguiente: M.L.Q.B y J.S.C.P: diseño del estudio, recopilación y análisis de datos. Todos los coautores: preparación y aprobación final del manuscrito.

REFERENCIAS

- Agweh, K., Snowdon, M. R., Mishra, R. K., Chen, G., Vivekanandhan, S., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2024). Production and characterization of waste nutshells derived biocarbon through slow pyrolysis: An investigation on the effects of pyrolysis temperature. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*(24), 28619–28633. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-03851-4>
- Chin-Pampillo, J. S., Alfaro-Vargas, A., Rojas, R., Giacomelli, C. E., Perez-Villanueva, M., Chinchilla-Soto, C., Alcañiz, J. M., & Domene, X. (2021). Widespread tropical agrowastes as novel feedstocks for biochar production: characterization and priority environmental uses. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *11*(5), 1775–1785. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00714-0>
- Cornelissen, G., Pandit, N. R., Taylor, P., Pandit, B., Sparrevik, M., & Schmidt, H. P. (2017). *Data from: Emissions and char quality of flame-curtain “Kon-Tiki” kilns for farmer-scale charcoal/biochar production* [Data set]. Dryad. <https://doi.org/10.5061/DRYAD.58M6>
- Espinoza-Marín, I., Chinchilla-Soto, C., Monge-Muñoz, M., Beita-Sandí, W., & Chin-Pampillo, J. (2026). Producción y caracterización fisicoquímica y textural de biocarbonos: influencia del tipo de horno de pirólisis. *UNED Research Journal*, *18*(1), Artículo e6173. <https://doi.org/10.22458/urj.v18i1.6173>
- Farhangi-Abriz, S., & Ghassemi-Golezani, K. (2023). Improving electrochemical characteristics of plant roots by biochar is an efficient mechanism in increasing cations uptake by plants. *Chemosphere*, *313*, 137365. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137365>
- Gabhi, R. S., Basile, L., Kirk, D. W., Giorcelli, M., Tagliaferro, A., & Jia, C. Q. (2020). Electrical conductivity of wood biochar monoliths and its dependence on pyrolysis temperature. *Biochar*, *2*(3), 323–335. <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00056-0>
- Gamboa-Gamboa, E., & Hernández-Chaverri, R. A. (2025). Potencial de obtención de materiales carbonosos a partir de bambú: caso de Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, *36*. <https://doi.org/10.15517/r68t4z48>



- Goertzen, S. L., Oickle, A. M & Andreas, H. A. (2010). Standardization of the Boehm titration. Part I. CO₂ expulsion and endpoint determination. *Carbon*, 48(4), 1252–1261.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.11.050>
- Hong, M., Zhang, L., Tan, Z., & Huang, Q. (2019). Effect mechanism of biochar's zeta potential on farmland soil's cadmium immobilization. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(19), 19738–19748. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05298-5>
- International Biochar Initiative [IBI]. (2015). Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil. *International Biochar Initiative*, Version 2.1, 1–47.
- Jeffery, S., Abalos, D., Prodana, M., Bastos, A. C., van Groenigen, J. W., Hungate, B. A., & Verheijen, F. (2017). Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters*, 12(5), 053001.
- Lee, J. W., Kidder, M., Evans, B. R., Paik, S., Buchanan, A. C., Garten, C. T., & Brown, R. C. (2019). Proximate analyses for characterising biochars. En B. Singh, M. Camps-Arbestain, & J. Lehmann (Eds.), *Biochar: A Guide to Analytical Methods* (pp. 9–22). CSIRO Publishing.
- Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.
<https://doi.org/10.4324/9780203762264>
- Marhani, Sahur, A., Laban, S. ., & Musa, Y. (2022). Characterization of biochar empty fruit Bunches OPEFB at various temperatures and burning time. *Journal of Experimental Biology and Agricultural Sciences*, 10(3), 599–606.
[https://doi.org/10.18006/2022.10\(3\).599.606](https://doi.org/10.18006/2022.10(3).599.606)
- McCall, M. A., Watson, J. S., Tan, J. S. W., & Sephton, M. A. (2025). Biochar stability revealed by FTIR and machine learning. *ACS Sustainable Resource Management*, 2(5), 842–852.
<https://doi.org/10.1021/acssusresmg.5c00104>
- Merck. (2026). *Safety Data Sheet: Activated charcoal powder pro analysis (Art. 2186)*. Merck KGaA. <https://www.merckmillipore.com>
- Mitchell, P. J., Dalley, T. S. L., & Helleur, R. J. (2013). Preliminary laboratory production and characterization of biochars from lignocellulosic municipal waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 99, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.10.025>
- Mukherjee, A., Zimmerman, A. R., & Harris, W. (2011). Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 163(3–4), 247–255.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.021>
- Navidi, W. (2006). *Estadística para ingenieros y científicos*. McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.



- Nugroho, F. G., Ansari, A. S., Rochman, N. T., Khadtare, S. S., Sree, V. G., Shrestha, N. K., Hafiyyan, A. F., Im, H., & Ahmed, A. T. A. (2025). Utilizing Indonesian empty palm fruit bunches: Biochar synthesis via temperatures dependent Pyrolysis. *Nanomaterials*, 15(1), 50. <https://doi.org/10.3390/nano15010050>
- Ok, Y.S., Uchimiya, S.M., Chang, S.X., & Bolan, N. (Eds.). (2015). Biochar: Production, characterization, and applications (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18920>
- Puma-Vaque, L. H. (2023). *Biochar de residuos de Guadua angustifolia Kunth: efecto de la temperatura y el tiempo de residencia en la pirólisis lenta*. (Tesis de pregrado). Universidad Regional Amazónica Ikiam, Tena, Ecuador.
- Rivera-Prieto, A. M., León-Corredor, C. D., & Villalba-Bareño, O. A. (2021). *Montaje del método analítico Boehm, para la determinación de la química superficial en sólidos porosos y aplicación en el estudio de carbones activados obtenidos a partir de cáscara de mangostino* [Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio Institucional UniPiloto. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/10294>
- Rodríguez-Rosales, A. X. (2023). *Comportamiento del biocarbón de Cupressus lusitanica (Mill) producido a diferentes temperaturas de pirólisis, Cartago, Costa Rica* [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio Institucional TEC.
- Ronsse, F., van Hecke, S., Dickinson, D., & Prins, W. (2013). Production and characterization of slow pyrolysis biochar: Influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *GCB Bioenergy*, 5(2), 104–115. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12018>
- Sahoo, S. S., Vijay, V. K., Chandra, R., & Kumar, H. (2021). Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. *Cleaner Engineering and Technology*, 3, 100101. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100101>
- Singh, B., Camps-Arbestain, M., & Lehmann, J. (2017). *Biochar: A guide to analytical methods*. In Csiro publishing.
- Soto-Muñoz, G., Chin-Pampillo, J. S., Villagra-Mendoza, K., & Chinchilla-Soto, C. (2025). Investigación y uso del biocarbón en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 49(2), 2907. <https://doi.org/10.15517/sh3x5e25>
- Spokas, K. A. (2010). Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, 1(2), 289–303. <https://doi.org/10.4155/cmt.10.32>
- Świechowski, K., Matyjewicz, B., Telega, P., & Białowiec, A. (2022). The influence of low-temperature food waste biochars on anaerobic digestion of food waste. *Materials*, 15(3), Artículo 945. <https://doi.org/10.3390/ma15030945>
- Syguła, E., Ciolkosz, D., & Białowiec, A. (2024). The significance of structural components of lignocellulosic biomass on volatile organic compounds presence on biochar: A review. *Wood Science and Technology*, 58(3), 859–886. <https://doi.org/10.1007/s00226-024->



01557-y

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 19(1), 191–215. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3>

Tsechansky, L., & Graber, E. R. (2014). Methodological limitations to determining acidic groups at biochar surfaces via the Boehm titration. *Carbon*, 66, 730–733. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.09.044>

Ulate-Molina, R. E., Masís-Meléndez, F., & Villagra-Mendoza, K. (2025). Biocarbón: Importancia como alternativa para el desarrollo sostenible en Costa Rica. Una revisión bibliográfica. *E-Agronegocios*, 11(1), 66–95. <https://doi.org/10.18845/ea.v11i1.7568>

Waheed, A., Xu, H., Qiao, X., Aili, A., Yiremaikeybayi, Y., Haitao, D., & Muhammad, M. (2025). Biochar in sustainable agriculture and climate mitigation: Mechanisms, challenges, and applications in the circular bioeconomy. *Biomass and Bioenergy*, 193, 107531. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107531>

Zou, X., Debiagi, P., Amjed, M. A., Zhai, M., & Faravelli, T. (2024). Impact of high-temperature biomass pyrolysis on biochar formation and composition. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 179, Artículo 106463. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106463>

