



Investigación original

Efecto del biocarbón de raquis de maíz (*Zea mays* L.) en las propiedades químicas de dos suelos de HondurasMelvin David Rivera Monterroso melvin.rivera@est.zamorano.eduDepartamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Universidad Zamorano
HondurasJuan Esteban Giménez Benitez juan.gimenez@est.zamorano.eduDepartamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Universidad Zamorano
HondurasWilmer Alejandro Pineda Lemus wpineda@zamorano.eduInstructor Laboratorio de Suelos
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Universidad Zamorano
HondurasRicardo Alexander Peña Venegas rpena@zamorano.eduProfesor Asociado
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Universidad Zamorano
Honduras

Historial del artículo:

Recibido Noviembre 18, 2024. Aceptado Mayo 26, 2026. Publicado Junio 30, 2026.

Cómo citar: Rivera Monterroso, M. D.; Giménez Benitez, J. E.; Pineda Lemus, W. A. & Peña Venegas R. A. (2026). Efecto del biocarbón de raquis de maíz (*Zea mays* L.) en las propiedades químicas de dos suelos de Honduras. *Ceiba*, 59 (1), 29-39. <https://doi.org/10.5377/3vkmka24>

Resumen. El suelo es un recurso esencial para la agricultura, ya que proporciona el medio físico, químico y biológico para el desarrollo vegetal. Sin embargo, la acidez limita la productividad de numerosos suelos tropicales debido a la baja disponibilidad de nutrientes y la toxicidad del aluminio. El biocarbón surge como una alternativa sostenible para mitigar la acidez y mejorar la fertilidad del suelo. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto del biocarbón de raquis de maíz sobre algunas propiedades químicas de dos suelos ácidos de Honduras, bajo condiciones de laboratorio. Se utilizó un Diseño Completamente al Azar (DCA) con tres repeticiones y tres dosis de biocarbón (0, 20 y 40 t ha⁻¹), aplicadas a suelos procedentes de El Progreso y La Ceiba, ambos clasificados como muy fuertemente ácidos, con pH inicial de 4.74 y 4.57, respectivamente. Las unidades experimentales consistieron en macetas de 3 L con 800 g de suelo incubado a humedad cercana a capacidad de campo. El biocarbón se elaboró a partir de raquis de maíz mediante pirólisis lenta a 500–700 °C durante 3 h 30 min. Los resultados mostraron que la respuesta al biocarbón dependió del tipo de suelo y del tiempo de evaluación. En el suelo de El Progreso, el biocarbón incrementó el pH, especialmente con la dosis de 2 % a los 2 meses y con 1 y 2 % a los 4 meses; además, la CE aumentó a los 2 meses con 1 y 2 %, pero no se observaron efectos sobre Al ni CIC. En el suelo de La Ceiba, el pH no cambió a los 2 meses, pero aumentó significativamente a los 4 meses, con mayor efecto en la dosis de 2 % ($p < 0.0001$). En este suelo también se incrementó la CE con 2 % de biocarbón en ambos periodos

y se redujo el Al intercambiable con 1 y 2 %, mientras que la CIC no mostró cambios significativos. En términos generales, a los 4 meses el pH aumentó 1.10 % en el suelo de El Progreso y 6.12 % en suelo de La Ceiba.

Palabras clave: acidez, biocarbón, pirólisis, propiedades químicas, suelo

The effect of corn rachis biochar (*Zea mays* L.) on the chemical properties of two soils from Honduras

Abstract: Soil is an essential resource for agriculture, as it provides the physical, chemical, and biological medium required for plant development. However, soil acidity limits the productivity of many tropical soils due to low nutrient availability and aluminum toxicity. Biochar has emerged as a sustainable alternative to mitigate soil acidity and improve soil fertility. The objective of this study was to evaluate the effect of corn rachis biochar on selected chemical properties of two acidic soils from Honduras under laboratory conditions. A completely randomized design (CRD) was used with three replications and three biochar rates (0, 20, and 40 t ha⁻¹), applied to soils collected from El Progreso and La Ceiba, both classified as very strongly acidic, with initial pH values of 4.74 and 4.57, respectively. The experimental units consisted of 3 L pots containing 800 g of soil incubated at moisture levels close to field capacity. The biochar was produced from corn rachis through slow pyrolysis at 500–700 °C for 3 h and 30 min. The results showed that the response to biochar depended on soil type and evaluation time. In soil from El Progreso, biochar increased the pH, particularly at the 2% rate after 2 months and at the 1% and 2% rates after 4 months. Electrical conductivity also increased after 2 months with the 1% and 2% rates, whereas no effects were observed on exchangeable Al or cation exchange capacity. In soil from La Ceiba, pH did not change after 2 months but increased significantly after 4 months, with the greatest effect observed at the 2% rate ($p < 0.0001$). In this soil, electrical conductivity also increased with the 2% biochar rate in both evaluation periods, and exchangeable Al decreased with the 1% and 2% rates, while cation exchange capacity showed no significant changes. Overall, after 4 months, pH increased by 1.10% in soil from El Progreso and by 6.12% in soil from La Ceiba.

Keywords: acidity, biochar, chemical properties, pyrolysis, soil

Introducción

El suelo representa uno de los recursos fundamentales para la actividad agrícola, ya que brinda el entorno físico, químico y biológico necesario para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La comprensión de las propiedades y procesos asociados al suelo resulta de vital importancia para optimizar la productividad agrícola y asegurar la sustentabilidad a largo plazo (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2018).

La acidez del suelo tiene un impacto significativo en la disponibilidad de nutrientes para las plantas y en la actividad microbiana del suelo (McLaughlin et al., 2009). En general, los suelos ácidos son más comunes en regiones tropicales y subtropicales. Aproximadamente el 50 % de los suelos presentes en áreas tropicales a nivel global se caracterizan por su baja fertilidad y limitada capacidad productiva, asociadas a la alta acidez. Estas áreas suelen experimentar altos niveles de precipitación, generalmente en un rango de 1,500 a 3,000 mm anuales. Esta condición favorece la lixiviación de nutrientes básicos como el calcio, el magnesio y el potasio, dejando un exceso de iones de hidrógeno y de aluminio en el suelo, lo que contribuye a la acidez (Toledo, 2016).

En los últimos años, el uso del biocarbón o biochar como enmienda agrícola ha surgido como una alternativa prometedora para mejorar la salud del suelo. El biocarbón es un material orgánico obtenido mediante la pirólisis de biomasa residual, como restos de cultivos agrícolas o de residuos forestales (International Biochar Initiative [IBI], 2015). La pirólisis es un proceso de transformación termoquímica de la biomasa en ausencia de oxígeno a temperaturas inferiores a 700 °C. Se caracteriza por su alta porosidad y su capacidad de retención de agua y de nutrientes (Brantley et al., 2015). Estas propiedades hacen que el biocarbón mejore la estructura del suelo, aumente su capacidad de intercambio catiónico y promueva la diversidad y la abundancia microbiana (Verheijen et al., 2010). Varios estudios han demostrado los beneficios del biocarbón en la agricultura; por ejemplo, se ha observado que la aplicación de biocarbón en suelos ácidos puede elevar su pH, mejorando así la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Layek et al., 2022).

Además, es relevante destacar que el biocarbón también contiene diferentes elementos como potasio, fósforo, magnesio, calcio, cobre, zinc y hierro; los cuales tienen el potencial de actuar como fertilizantes. Estas concentraciones de elementos y su disponibilidad para las plantas varían en función de la temperatura de pirólisis y de

la materia prima que se utilizará (Escobar y Rodríguez, 2021).

A pesar del creciente interés por el biocarbón, aún existen vacíos de conocimiento sobre su comportamiento en distintos tipos de suelo y en condiciones tropicales, especialmente en Honduras. En este país, los suelos presentan una amplia variabilidad en textura y acidez, lo que podría influir en la respuesta a la aplicación de biocarbón. Este estudio busca contribuir a llenar este vacío evaluando su efecto en dos suelos contrastantes: uno arenoso de El Progreso, Yoro, y otro franco-arcilloso de La Ceiba, Atlántida, lo que permite analizar cómo el tipo de suelo modula la respuesta del biocarbón, respecto de las propiedades químicas.

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de biocarbón de raquis de maíz sobre las propiedades químicas de dos suelos ácidos de Honduras, bajo condiciones de laboratorio, con el fin de identificar su potencial como enmienda para el manejo sostenible de la acidez del suelo y la valorización de los residuos agrícolas. Adicionalmente, el estudio busca darles valor agregado a los residuos generados por la Planta de Semillas de la Universidad Zamorano, de manera que convertidos en biocarbón y aplicados como enmienda a los suelos degradados contribuyendo a la economía circular y la sostenibilidad agrícola.

Metodología

Localización

El estudio se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Zamorano, ubicada en el Valle del río

Yeguaré a 30 km al sureste de Tegucigalpa, Honduras. Las muestras de suelos fueron extraídas de los municipios de La Ceiba en el Centro Universitario Regional del Litoral Atlántico UNAH Curra (15°44'04.69"N 86°51'06.66"W), y El Progreso, Yoro, en las instalaciones de Hondupalma (15°31'56.68"N 87°42'07.12"W).

El suelo procedente de El Progreso se clasificó como de textura arenoso, mientras que el de La Ceiba correspondió a una textura franco arcilloso. Ambos suelos presentaron una reacción fuertemente ácida, con valores de pH de 4.74 y 4.57 para El Progreso y La Ceiba, respectivamente. La conductividad eléctrica (CE) evidenció valores relativamente más elevados en El Progreso (3.38 dS m⁻¹), en contraste con baja salinidad en el suelo de La Ceiba (0.27 dS m⁻¹). Asimismo, las concentraciones de aluminio intercambiable fueron de 0.08 y 0.75 cmol(+) kg⁻¹ para El Progreso y La Ceiba, respectivamente. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue alta en El Progreso (47.4 cmol(+) kg⁻¹) y moderada en La Ceiba (17 cmol(+) kg⁻¹). Ambos suelos se caracterizaron por presentar bajos contenidos de materia orgánica y bases intercambiables, así como una limitada disponibilidad de fósforo.

Diseño y establecimiento del experimento

Se utilizó un diseño completamente al azar (DCA), en el que se trabajó con tres dosis de biocarbón aplicadas a dos tipos de suelos de Honduras: uno del municipio de El Progreso y otro de La Ceiba. El diseño contó con 3 repeticiones y la unidad experimental correspondió a macetas de plástico de 3 L, las cuales fueron llenadas con 800 g de suelo cada una, teniendo así un total de 18 unidades experimentales (Figura 1).

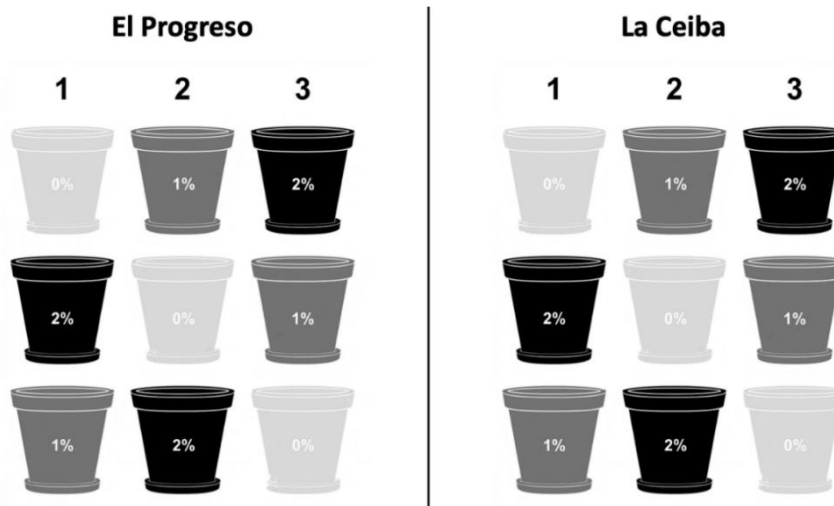


Figura 1. Representación esquemática del diseño experimental.

Tabla 1. Tratamientos usados en la investigación. Dosis de biocarbón aplicada en cada uno de los tratamientos.

Tratamientos	Factor 1	Factor 2	Aplicación (g)
	Dosis de biocarbón	Suelo (800 g)	Dosis de biocarbón
1	0%	El Progreso	0
2	1%	El Progreso	8
3	2%	El Progreso	16
1	0%	La Ceiba	0
2	1%	La Ceiba	8
3	2%	La Ceiba	16

Los suelos utilizados en el experimento fueron extraídos de los municipios de El Progreso, departamento de Yoro y La Ceiba, departamento de Atlántida; caracterizados en laboratorio mediante análisis químico y clasificados de acuerdo con la escala de acidez propuesta por el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (USDA). Tanto el suelo de El Progreso como el de La Ceiba presentaron un pH muy fuertemente ácido, con valores de 4.74 y 4.57, respectivamente, ambos medidos a 23.8 °C.

Determinación de la dosis de biocarbón

Para determinar la dosis de biocarbón con relación a la cantidad de suelo utilizado en cada unidad experimental, se estimó un peso de capa arable (Pca) de 2,000,000 kg ha⁻¹, basado en una densidad aparente de 1 g cm⁻³ y una profundidad de laboreo 0.20 m. Teniendo en cuenta el peso estimado de la capa arable, se calculó el porcentaje para cada dosis de biocarbón aplicada. La primera dosis representó 0 % p/p (peso de suelo/peso de biocarbón), es decir, 0 g de biocarbón en 800 g de suelo, la segunda dosis representó 1 % p/p de dosis de biocarbón, equivalente a 8 g de biocarbón en los 800 g de suelo, representando 20 t ha⁻¹ de biocarbón y, finalmente la tercera dosis representada como 2 % p/p de biocarbón, equivalente a 16 g de biocarbón en los 800 g de suelo, lo que representaba alrededor de 40 t ha⁻¹ de biocarbón (Tabla 1).

Establecimiento de las unidades experimentales

Los suelos utilizados en la investigación fueron extraídos de los primeros 20 cm en un área determinada de 100 m² de 2 lotes, cuya localización fue previamente descrita. Los suelos extraídos se dejaron secar a temperatura ambiente en bandejas, hasta que alcanzaron un peso constante, aproximadamente 72 horas. Posteriormente, se pasaron por un tamiz de 10 mm y 5 mm para eliminar partículas extrañas como restos vegetales, raíces o pequeñas piedras.

Para lograr mantener una humedad constante en las unidades experimentales, se prepararon las macetas cubriendo los orificios en el fondo con silicona caliente y se

dejó secar por 24 horas. Finalmente, se le agregó plástico al fondo de cada maceta para asegurar la máxima impermeabilización.

La enmienda de biocarbón fue molida y tamizada a 10 mm y 5 mm. Esto se hizo con el objetivo de tener el mismo tamaño de partículas que nuestro suelo. Después, se realizó una mezcla uniforme de los 800 g de suelo con la cantidad de biocarbón correspondiente a cada tratamiento en cada uno de los suelos. Finalmente, la mezcla de suelo y biocarbón fue humedecida mediante riego manual hasta alcanzar la capacidad de campo, estimada en aproximadamente 30 % de humedad volumétrica para el suelo de El Progreso y 33 % para el suelo de La Ceiba. Después del llenado y el humedecimiento, la parte superior de las macetas fue cubierta con papel parafinado para evitar la pérdida de humedad. El nivel de humedad del suelo fue monitoreado permanentemente mediante el peso inicial de estas y ajustado a capacidad de campo periódicamente de acuerdo con diferencias de peso, cuando fue necesario.

Preparación del biocarbón

Proceso de pirólisis: El biocarbón se elaboró mediante pirólisis lenta, proceso que consiste en la degradación térmica de la materia prima, en ausencia de oxígeno, pero sin que se llegue a producir reacciones de combustión de la materia prima (Michael Klug, 2012). El proceso de la pirólisis consta de tres etapas: la dosificación y alimentación de la materia prima, la transformación de la materia prima y, la obtención y separación de los productos.

Procedimiento: Para la preparación del biocarbón, se utilizó como materia prima el raquis de maíz (*Zea mays*), extraído de la Unidad de Planta de Semillas de la Universidad Zamorano. El raquis de maíz se llevó al módulo de Conservación y Manejo de Suelos, y se sometió a un proceso de transformación termoquímica utilizando un horno pirolítico construido *in situ*. Se utilizaron dos barriles metálicos, uno de 210 L y otro de 115 L, como barril exterior e interior, respectivamente. Además, se empleó un tubo de aluminio con un diámetro de 90 mm, el cual cumplió la función de chimenea para la salida de compuestos volátiles producidos durante este proceso (Figura 2). El espacio entre los barriles se llenó con residuos de madera, que cumplieron la función de fuente energética, y el barril interior se llenó con raquis de maíz, utilizados como fuente de biomasa. Se dejó pirolizar durante 3 horas y 30 minutos, a 500-700 °C, asegurando que el horno estuviera totalmente sellado para evitar el escape de gases y lograr así una pirólisis homogénea. Finalizado el proceso de pirólisis, se extrajo el biocarbón, se pasó a un recipiente, se humedeció y se dejó secar a temperatura ambiente durante 24 horas, hasta que alcanzó un peso constante.

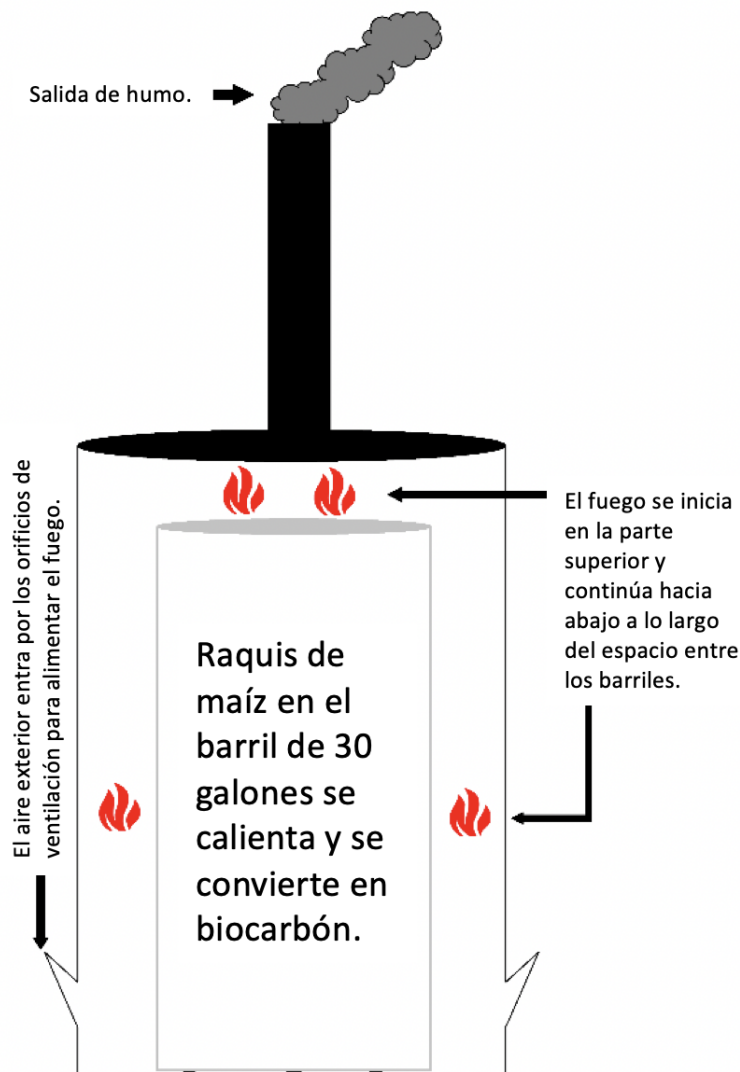


Figura 2. Esquema del horno pirolítico utilizado en la investigación (Two Barrel-Nested Retort / Drum Method) propuesto por Pollnow en 2014. Figura tomada y adaptada de Pollnow (2014).

Variables medidas

Los parámetros evaluados en el experimento fueron el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC, $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$), la conductividad eléctrica (CE, dS m^{-1}) y la acidez intercambiable (AI, $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$). La medición del pH se realizó por el método de potenciometría en equipo Orion Star A211, relación 1:1 suelo y agua expresado adimensionalmente y con dos decimales (por su tipo de escala), a partir del método oficial de análisis establecido por la Asociación Científica Dedicada a la Excelencia Analítica (Kalra, 1995), adoptada por Zamorano, descrito en la referencia LSZ-MT-P01 pH. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) fue analizada por el método de acetato de amonio (Gumbara et al., 2019), adoptada por

Zamorano, descrito en la referencia LSZ-MT-P17 Capacidad de Intercambio Catiónico. La conductividad eléctrica (CE) fue evaluada por el método de pasta saturada (Maas y Hoffman, 1977), adoptada por Zamorano, descrito en la referencia LSZ-MT-P07 Conductividad Eléctrica. Finalmente, la acidez intercambiable (AI) fue evaluada mediante titulación en tres etapas. El procedimiento está descrito en la referencia LSZ-MT-P16 Aluminio Intercambiable.

Se hicieron un total de dos mediciones a través del tiempo en cada parámetro evaluado, la primera medición de los parámetros se realizó a los 2 meses después de la aplicación de cada dosis de biocarbón y la segunda medición se realizó al final del experimento, es decir, a los

4 meses después de la aplicación de los tratamientos. Se compararon los resultados, considerando también el grupo control, y se analizó su comportamiento con el tiempo en cada variable y en cada suelo.

Análisis estadístico

Para realizar el análisis estadístico, se utilizó el software JMP® en su versión 18.0.1 Pro. Con el fin de determinar si los datos presentaban una distribución normal, se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk ($p > 0.05$). De la misma manera, se verificó la homogeneidad de varianzas mediante las pruebas de Levene y de Bartlett ($p > 0.05$). Posteriormente, se empleó un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba post hoc de Tukey (HSD) con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$, considerando diferencias significativas cuando $p \leq 0.05$. Finalmente, se utilizó una prueba t de Student para comparar los tiempos de muestreo, con el fin de evaluar el efecto entre los dos periodos posaplicación dentro de cada dosis de biocarbón.

Resultados y discusión

Efecto de las dosis de biocarbón en las propiedades químicas evaluadas

Los resultados del suelo del municipio de El Progreso mostraron que el pH del suelo varió en función de la dosis de biocarbón aplicada a los 2 y 4 meses (Figura 3a). A los 2 meses, la aplicación al suelo de 2 % de biocarbón mostró un aumento significativo en el pH en comparación con la aplicación de 0 % y 1 %, lo cual puede atribuirse a la capacidad del biocarbón de neutralizar protones en la solución del suelo mediante sus grupos funcionales superficiales. A los 4 meses, tanto la aplicación de 1 % como de 2 % de biocarbón incrementaron significativamente el pH respecto al control, sin diferencias entre ambas dosis, lo que sugiere que, a mediano plazo, el efecto amortiguador del biocarbón tiende a estabilizarse y que el sistema alcanza un equilibrio químico en el que incrementos adicionales de dosis no generan cambios proporcionales en la reacción del suelo.

En el suelo del municipio de La Ceiba, la aplicación de biocarbón no mostró efectos significativos sobre el pH a los 2 meses (Figura 3b), lo cual podría estar asociado a una mayor capacidad tampón del suelo y a la retención inicial de cationes ácidos en los sitios de intercambio, lo que retrasa la expresión del efecto de la enmienda. Sin embargo, a los 4 meses se observó un efecto estadísticamente significativo ($p < 0.0001$), donde la dosis de 2 % de biocarbón presentó los valores más altos de pH, seguida por las dosis de 1 % y 0 % (Figura 3b). Este comportamiento sugiere que el efecto del biocarbón en

suelos más ácidos y con menor CIC efectiva se manifiesta de forma más gradual, probablemente debido a procesos de oxidación superficial del biocarbón, liberación progresiva de bases intercambiables y reducción paulatina de la actividad de Al^{3+} en la solución del suelo.

Tanto en el suelo del municipio de El Progreso como en La Ceiba, hubo un incremento en el pH a los 4 meses del 1.10 % y 6.12 %, respectivamente. Estos resultados fueron consistentes con los reportados por Geng et al. (2022), quienes demostraron que el pH aumentó significativamente al aplicar biocarbón a un suelo clasificado como extremadamente ácido (pH de 4), observando un incremento del 79.25 %. Resultados similares fueron reportados por González (2024), quien encontró que la adición de biocarbón en el suelo en una dosis de 2 % aumentó el pH en un 3.6 % en relación con el suelo donde no se incorporó biocarbón. Sin embargo, aunque numerosas investigaciones demuestran que el pH aumenta tras la aplicación de biocarbón, Hematimatin et al. (2024), en una investigación realizada en 2017, reportaron que no se observaron cambios significativos en el pH después de la aplicación de biocarbón. El aumento en el pH del suelo con la incorporación de biocarbón se pudo haber debido al pH de este biocarbón (10 en KCL) y a la mejora en la retención de cationes presentes en el suelo (Escobar y Rodríguez, 2021).

La conductividad eléctrica (CE, $dS\ m^{-1}$) en el suelo del municipio de El Progreso evaluada a los 2 meses, mostró un aumento significativo con la aplicación del 1 % y 2 % de biocarbón en comparación con el suelo que no recibió biocarbón (Figura 3c). En contraste, los resultados a los 4 meses no mostraron cambios significativos con la aplicación de biocarbón. Resultados similares fueron reportados por Chugñay y Zambrano (2019), quienes observaron que la CE no presentó diferencias significativas entre dos tratamientos de biocarbón aplicados a dos parcelas evaluadas. En cuanto al suelo del municipio de La Ceiba, los resultados de CE mostraron que, a los 2 y 4 meses, la aplicación al suelo de 2 % de biocarbón fue significativamente mayor (< 0.001) que el suelo que no recibió biocarbón. Por otra parte, aplicar 1 % de biocarbón a los 2 y 4 meses no presentó diferencias significativas respecto a no aplicar biocarbón o a la aplicación de 2% de biocarbón (Figura 3d). Estos resultados coinciden con lo reportado por Da Silva Mendes et al. (2021), quienes mencionan que la adición de biocarbón puede aumentar la conductividad eléctrica del suelo, principalmente debido a la liberación de componentes solubles (minerales y orgánicos) cuando el biocarbón reacciona con el agua.

La evaluación del Al ($cmol(+) kg^{-1}$) en el suelo del municipio de El Progreso mostró que las dosis de biocarbón

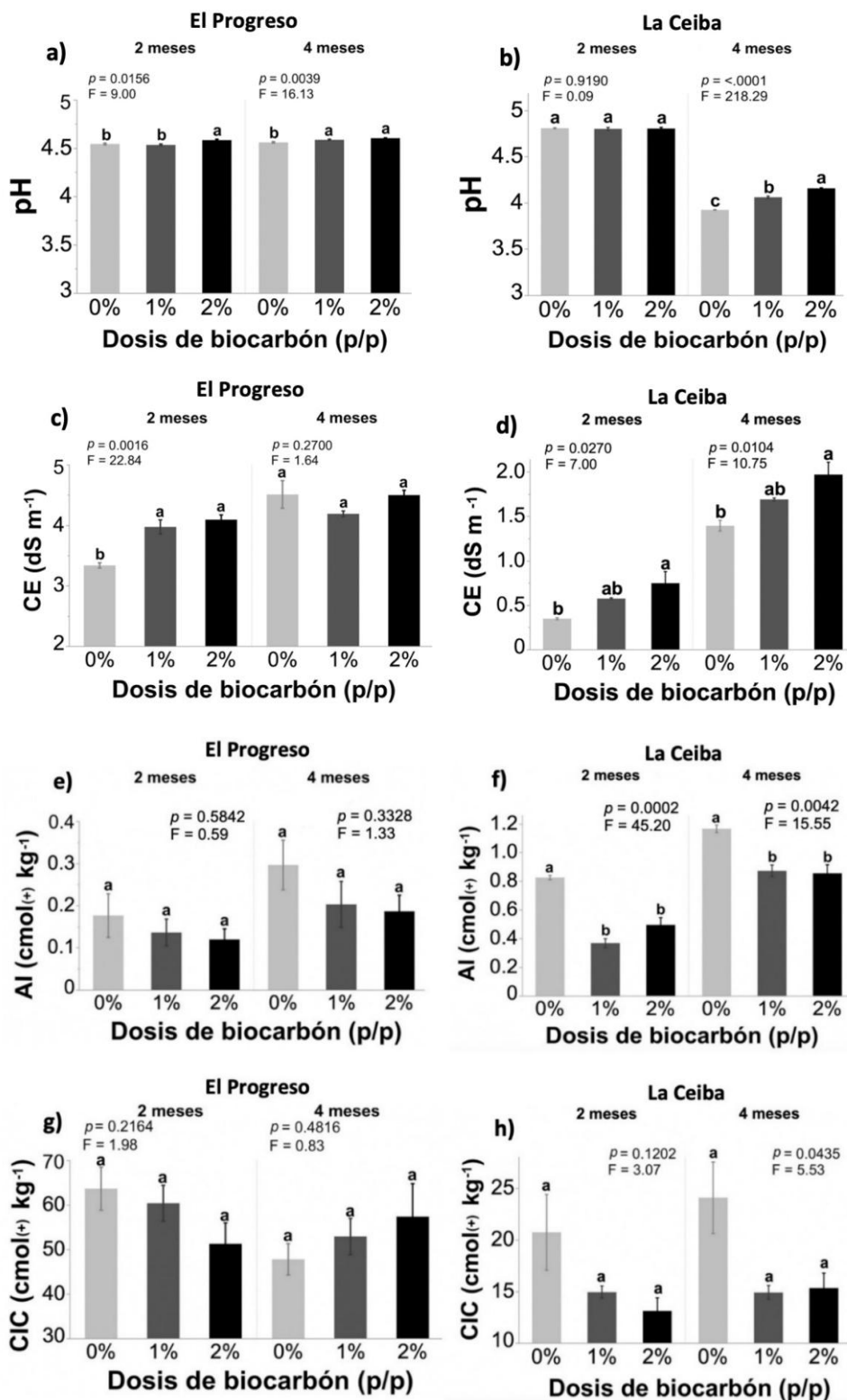


Figura 3. Efecto de las dosis de biocarbón (0%, 1% y 2% p/p) en (a) pH, (b) CE (dS m⁻¹), (c) AI (cmol(+) kg⁻¹) y (d) CIC (cmol(+) kg⁻¹) del suelo, evaluadas a los 2 meses y 4 meses, en suelos del municipio de El Progreso y La Ceiba, Honduras. Las barras de error representan ±SE. Medias con diferentes letras son significativamente diferentes de acuerdo con la prueba de comparación de medias de Tukey (p < 0.05).

no tuvieron ningún efecto sobre esta propiedad en ninguno de los periodos posaplicación (Figura 3e). En contraste, al evaluar el Al ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$) en el suelo del municipio de La Ceiba, se observó que aplicar 1 % o 2 % de biocarbón disminuyó el contenido de Al del suelo en comparación con no aplicar biocarbón. Sin embargo, entre las dosis de 1 % y 2 % de biocarbón no se observaron diferencias significativas. Este comportamiento se observó a los 2 y 4 meses (Figura 3f). Los resultados encontrados en el suelo de La Ceiba coinciden con los reportados por Geng et al. (2022), quienes indicaron que hubo una reducción del 94.95 % en esta propiedad. Resultados similares fueron reportados por Chan et al. (2008), quienes demostraron que el Al disminuyó a cero incluso con la dosis más baja de biocarbón aplicada (10 t ha^{-1}). Probablemente, la diferencia en el efecto del biocarbón entre los dos suelos se deba a que, en uno de los suelos, la capacidad de adsorción del biocarbón tuvo mayor influencia en la reducción de Al, ya que, por su naturaleza alcalina, permite que el Al se transforme en formas menos tóxicas como $\text{Al}(\text{OH})_3$ y $\text{Al}(\text{OH})_4$ (González, 2024).

La capacidad de intercambio catiónico (CIC, $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$) en el suelo de El Progreso mostró que la dosis de biocarbón aplicada al suelo no tuvo ningún efecto sobre los valores de esta propiedad en ninguno de los periodos posaplicación evaluados (Figura 3g). Estos mismos resultados se observaron en la CIC del suelo del municipio de La Ceiba, que tampoco mostró diferencias significativas (Figura 3h). Resultados similares fueron reportados por González (2024), quien no observó efecto alguno con las aplicaciones de biocarbón durante un periodo de 120 días (4 meses). Sin embargo, estos resultados difieren de los presentados por Elkhilfi et al. (2021), quienes demostraron que la aplicación de biocarbón aumentó significativamente la CIC, observando un incremento de 66.28 % en comparación con el tratamiento que no recibió biocarbón. De igual forma, los resultados de Li et al. (2023) indican que la adición de biocarbón aumentó la CIC del suelo entre un 34 % y un 57 %. Segura (2018) señaló que existe una relación entre la temperatura de carbonización durante el proceso de pirólisis y la CIC: a temperaturas más bajas, las concentraciones de CIC aumentaron. Es importante mencionar también que otras variables que pudieron interferir en los resultados de CIC son el pH, los grupos funcionales superficiales y el contenido de metales (Fuertes et al., 2010).

Efecto del periodo posaplicación en las propiedades químicas evaluadas

Se evaluó el efecto del periodo posaplicación (2 y 4 meses) sobre las propiedades del suelo estudiadas, en cada una de las dosis de biocarbón aplicadas. Los resultados del

suelo de El Progreso mostraron que no hubo efecto del periodo post aplicación en el pH del suelo en las dosis de 0 % y 2 % de biocarbón. Sin embargo, el pH del suelo que recibió la dosis de 1 % de biocarbón sí se vio afectado por el tiempo, observándose valores más altos a los 4 meses (Figura 4a). Estos resultados coinciden con los reportados por Major et al. (2010), quienes mostraron que el pH aumentó significativamente tras la aplicación de 20 t ha^{-1} de biocarbón durante los 4 años de la investigación. En cuanto al suelo del municipio de La Ceiba, se observó que el pH se vio afectado significativamente durante el periodo posaplicación evaluado, en todas las dosis de biocarbón (Figura 4b). Los valores de pH más altos se observaron a los 2 meses. Esto puede explicarse con los resultados de Jin et al. (2024), quienes evaluaron el efecto a largo plazo de la aplicación de biocarbón sobre las propiedades químicas del suelo durante 6 años (2017–2022). Observaron que en 2017 hubo un incremento en esta propiedad después de la aplicación de biocarbón; sin embargo, con el tiempo, el pH disminuyó significativamente en 2021 y 2022, con reducciones de 4.15 % y 4.43 %, respectivamente. Esta disminución probablemente se debió al contenido de sal en el suelo, ya que un aumento de la CE puede reducir significativamente el pH (Zhao et al., 2020).

Al evaluar la conductividad eléctrica (CE, dS m^{-1}), en el municipio de El Progreso, encontramos diferencias significativas como efecto del periodo posaplicación en las dosis de 0 % y 2 % de biocarbón, con un mayor valor a los 4 meses. En contraste, la CE del suelo que recibió 1 % de biocarbón no varió significativamente a lo largo del tiempo (Figura 4c). Por otro lado, la CE del suelo de La Ceiba aumentó significativamente a los 4 meses en todas las dosis de biocarbón aplicadas (Figura 4d). Estos resultados son consistentes con los reportados por Gutiérrez et al. (2021), quienes mostraron que la CE aumentó de 0.76 a 1.56 dS m^{-1} en un periodo de 70 días. Sin embargo, difieren de la investigación de Jin et al. (2024), quienes mostraron que, a mayor tiempo transcurrido desde la aplicación del biocarbón, más significativa era la disminución de la CE. En promedio, la CE disminuyó en un 48.91 % durante el experimento de 4 años. Esta disminución también se observó al aumentar la dosis de biocarbón (Jin et al., 2024).

Los valores de Al ($\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$) del suelo de El Progreso no hubo una variación en el tiempo de muestreo en ninguna de las dosis aplicadas (Figura 4e). Sin embargo, en el suelo de La Ceiba se observó un efecto del tiempo de muestreo sobre el Al, con un aumento significativo entre los periodos de muestreo en todas las dosis de biocarbón aplicadas (Figura 4f). Estos cambios en el Al intercambiable pudieron deberse a que, hacia los 4 meses, se registraron altas temperaturas en el laboratorio, que no pudieron

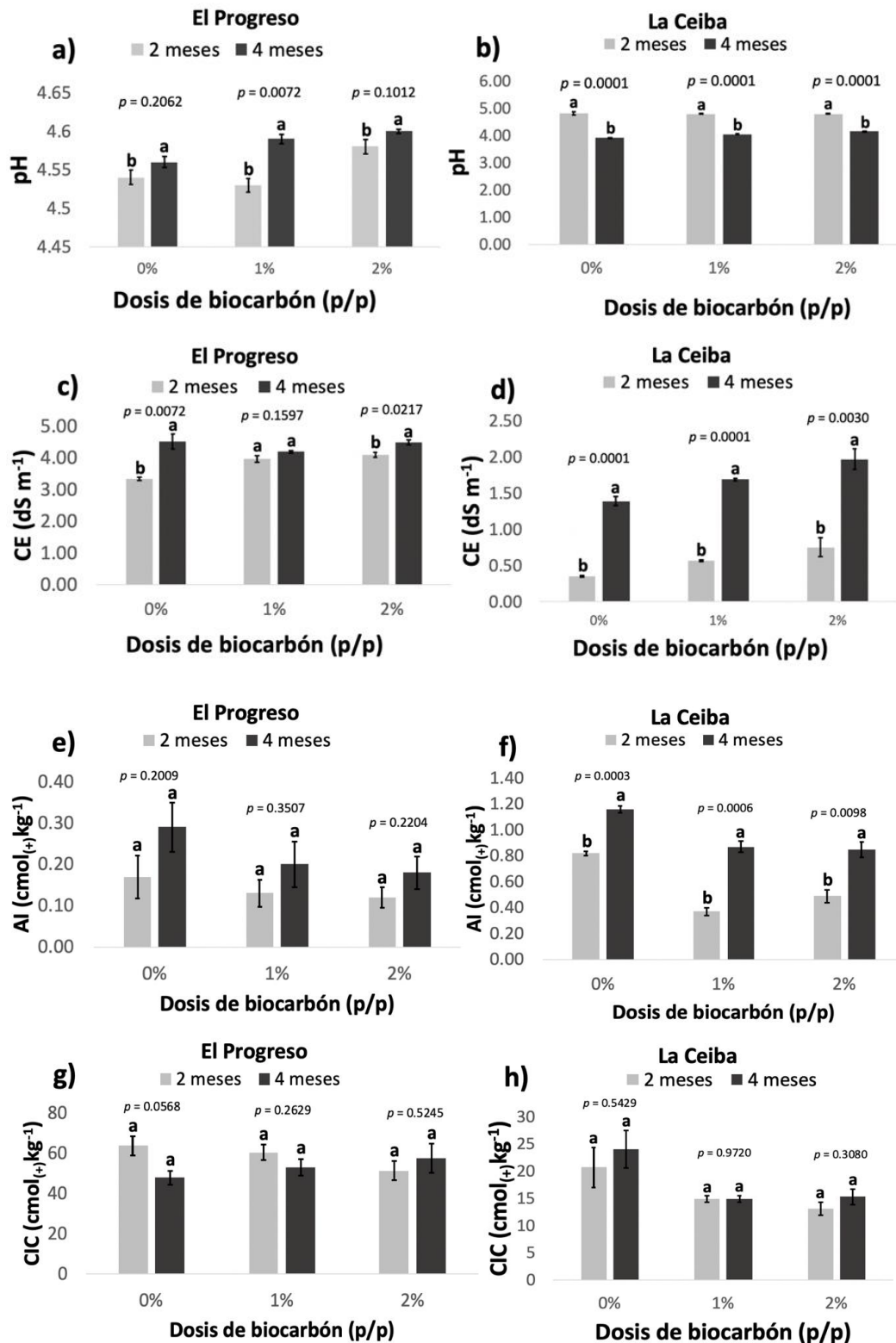


Figura 4. Efecto del periodo posaplicación (2 y 4 meses) en el pH, CE (dS m⁻¹), AI (cmol(+) kg⁻¹) y CIC (cmol(+) kg⁻¹) del suelo, dentro de cada dosis de biocarbón aplicada, en suelos del municipio de El Progreso y La Ceiba, Honduras. Las barras de error representan ±SE. Las medias con diferentes letras difieren significativamente según la prueba de comparación de medias de Tukey (p < 0.05).

controlarse, lo que generó rompimiento de enlaces y liberación de Al en forma intercambiable. Roshan et al. (2023) aseguran que, a altas temperaturas, el biocarbón puede alterarse más rápidamente, liberando ácidos orgánicos y otros compuestos que podrían movilizar más aluminio en el suelo. Sin embargo, estos resultados difieren de los reportados por Nguyen et al. (2022), quienes evaluaron el comportamiento del Al intercambiable a diferentes dosis de biocarbón durante 100 días, mostrando una reducción del 93 % durante el periodo de evaluación.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC, $\text{cmol}(+) \text{kg}^{-1}$) del suelo El Progreso y La Ceiba, mostró no verse afectada de forma significativamente por el tiempo, en ninguna de las dosis aplicadas (Figura 4g, 4h). Estos resultados son similares por los reportados por Gonzáles (2024), quien tampoco mostró cambios significativos en esta propiedad durante los 120 días de evaluación. No obstante, se contraponen con los resultados encontrados por Islami et al. (2011). En su evaluación de la CIC en un suelo degradado en Indonesia, la cual llevó 2 años de evaluación, demostraron que la aplicación de biocarbón aumentó la CIC; esto se atribuyó a una alta carga negativa resultante de la oxidación de los grupos carboxílicos y fenólicos del biocarbón. Lo que probablemente sugiere que, cambios en la CIC del suelo como resultados de la aplicación de biocarbón podrían ser observados a largo plazo.

Conclusiones

La aplicación de biocarbón elaborado a partir de raquis de maíz, en dosis de 1% y 2%, modificó las propiedades químicas de los suelos evaluados, aunque la magnitud de la respuesta dependió del tipo de suelo. En ambos suelos, el biocarbón incrementó el pH y la conductividad eléctrica; sin embargo, en el suelo de La Ceiba también redujo el aluminio intercambiable. Asimismo, el momento de muestreo influyó significativamente sobre el pH y la conductividad eléctrica en ambos suelos, y sobre el aluminio intercambiable en el suelo de La Ceiba. Estos resultados evidencian el potencial del biocarbón de raquis de maíz como una enmienda eficaz para el manejo de la acidez en suelos tropicales, particularmente en aquellos con altos niveles de aluminio intercambiable. Además, su utilización representa una alternativa sostenible para la valorización de residuos agrícolas, contribuyendo a la reducción de desechos y al fortalecimiento de estrategias de economía circular en los sistemas de producción agrícola.

Contribuciones de los autores

M. D. Rivera Monterroso: Conceptualización de la investigación; planificación y supervisión de la

investigación; recolección, procesamiento y análisis de datos; redacción de borrador original y artículo final. **J. E. Giménez Benítez:** Conceptualización de la investigación; planificación y supervisión de la investigación; recolección, procesamiento y análisis de datos; redacción de borrador original y artículo final. **W. A. Pineda Lemus:** Conceptualización de la investigación; planificación y supervisión de la investigación; revisión de borrador original y artículo final. **R. A. Peña Venegas:** Conceptualización de la investigación; planificación y supervisión de la investigación; revisión de borrador original y artículo final.

Referencias

- Brantley, K. E., Brye, K. R., Savin, M. C. y Longer, D. E. (2015). Biochar Source and Application Rate Effects on Soil Water Retention Determined Using Wetting Curves. *Open Journal of Soil Science*, 05(01), 1–10. [\[En línea\]](#)
- Chan, K. Y., van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. y Joseph, S. (2008). Using poultry litter biochars as soil amendments. *Soil Research*, 46(5), 437. [\[En línea\]](#)
- Chugñay, M. R. y Zambrano, D. A. (2019). *Variación de condiciones edáficas en el proceso de restauración con enmiendas de biocarbón* [Tesis de Pregrado, Universidad Estatal Amazónica, Pastaza, Ecuador]. repositorio.uea.edu.ec. [\[En línea\]](#)
- Brantley, K. E., Brye, K. R., Savin, M. C. y Longer, D. E. (2015). Biochar Source and Application Rate Effects on Soil Water Retention Determined Using Wetting Curves. *Open Journal of Soil Science*, 05(01), 1–10. [\[En línea\]](#)
- Chan, K. Y., van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A. y Joseph, S. (2008). Using poultry litter biochars as soil amendments. *Soil Research*, 46(5), 437. [\[En línea\]](#)
- Chugñay, M. R. y Zambrano, D. A. (2019). *Variación de condiciones edáficas en el proceso de restauración con enmiendas de biocarbón* [Tesis de Pregrado, Universidad Estatal Amazónica, Pastaza, Ecuador]. repositorio.uea.edu.ec. [\[En línea\]](#)
- Da Silva Mendes, J., Fernandes, J. D., Chaves, L. H. G., Guerra, H. O. C., Tito, G. A. y Brito Chaves, I. de (2021). Chemical and Physical Changes of Soil Amended with Biochar. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(8), 1–13. [\[En línea\]](#)
- Elkhlifi, Z., Kamran, M., Maqbool, A., El-Naggar, A., Ifthikar, J., Parveen, A., Bashir, S., Rizwan, M., Mustafa, A., Irshad, S., Ali, S. y Chen, Z. (2021). Phosphate-lanthanum coated sewage sludge biochar improved the soil properties and growth of ryegrass in an alkaline soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 216, 112173. [\[En línea\]](#)
- Escobar, T. C. y Rodríguez, A. (2021). Impacto del biocarbón en el suelo agrícola. *Avances Investigación En Ingeniería*, 18(2). [\[En línea\]](#)
- Fuertes, A. B., Arbestain, M. C., Sevilla, M., MacLá-Agulló, J. A., Fiol, S., López, R., Smernik, R. J.,

- Aitkenhead, W. P., Arce, F. y Macías, F. (2010). Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pyrolysis and hydrothermal carbonisation of corn stover. *Soil Research*, 48(7), 618. [\[En línea\]](#)
- Geng, N., Kang, X., Yan, X., Yin, N., Wang, H [Hui], Pan, H., Yang, Q., Lou, Y. y Zhuge, Y. (2022). Biochar mitigation of soil acidification and carbon sequestration is influenced by materials and temperature. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 232, 113241. [\[En línea\]](#)
- González, G. D. (2024). *Efecto a corto plazo del biocarbón en las características químicas de un suelo fuertemente ácido y la productividad de tomate* [Tesis de Posgrado]. Zamorano, Honduras. [\[En línea\]](#)
- Gumbara, R. H., Darmawan y Sumawinata, B. (2019). A comparison of cation exchange capacity of organic soils determined by ammonium acetate solutions buffered at some pHs ranging between around field pH and 7.0. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 393(1), 12015. [\[En línea\]](#)
- Gutiérrez, G., Telez, L., Espinosa, A. y Cervantes, J. F. (2021). Biocarbón de bambú como mejorador de la fertilidad del suelo en caña de azúcar. *Revista Mexicana De Ciencias Forestales*, 12(65). [\[En línea\]](#)
- Hematimatin, N., Igaz, D., Aydın, E. y Horák, J. (2024). Biochar application regulating soil inorganic nitrogen and organic carbon content in cropland in the Central Europe: A seven-year field study. *Biochar*, 6(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s42773-024-00307-4>
- International Biochar Initiative. (2015). *Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil*. [\[En línea\]](#)
- Islami, T., Guritno, B., Basuki, N. y Suryanto, A. (2011). Biochar for sustaining productivity of cassava based cropping systems in the degraded lands of East Java, Indonesia. *Journal of Tropical Agriculture*, 49(1-2), 40–46. [\[En línea\]](#)
- Jin, F., Piao, J., Miao, S., Che, W., Li, X [Xiang], Li, X [Xuebin], Shiraiwa, T., Tanaka, T., Taniyoshi, K., Hua, S. y Lan, Y. (2024). Long-term effects of biochar one-off application on soil physicochemical properties, salt concentration, nutrient availability, enzyme activity, and rice yield of highly saline-alkali paddy soils: Based on a 6-year field experiment. *Biochar*, 6(1), 1–22. [\[En línea\]](#)
- JMP Statistical Discovery LLC. (2024). *Software estadístico* [Software de computación]. Sas. [\[En línea\]](#)
- Kalra, Y. P. (1995). Determination of pH of Soils by Different Methods: Collaborative Study. *Journal of AOAC International*, 78(2), 310–324. [\[En línea\]](#)
- Layek, J., Narzari, R., Hazarika, S., Das, A., Rangappa, K., Devi, S., Balusamy, A., Saha, S., Mandal, S., Idapuganti, R. G., Babu, S., Choudhury, B. U. y Mishra, V. K. (2022). Prospects of Biochar for Sustainable Agriculture and Carbon Sequestration: An Overview for Eastern Himalayas. *Sustainability*, 14(11), 6684. [\[En línea\]](#)
- Lehmann, J., Gaunt, J. y Rondon, M. (2006). Bio-char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(2), 403–427. [\[En línea\]](#)
- Lehmann, J. y Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (Second edition). EUR. Scientific and technical research series. Routledge Taylor & Francis Group. <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.4324/9780203762264/biochar-environmental-management-johannes-lehmann-stephen-joseph> [\[En línea\]](#)
- Li, Y., Abdo, A. I., Shi, Z., Merwad, A.-R. M. A. y Zhang, J. (2023). Biochar derived from invasive plants improved the pH, macronutrient availability and biological properties better than liming for acid rain-affected soil. *Biochar*, 5(1), 1–16. [\[En línea\]](#)
- Maas, E. V. y Hoffman, G. J. (1977). Crop Salt Tolerance— Current Assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103(2), 115–134. [\[En línea\]](#)
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J. y Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and Soil*, 333(1-2), 117–128. [\[En línea\]](#)
- McLaughlin, H., Anderson, P., Shields, F. y Reed, T. (2009). *All biochars are not created equal and how to tell them apart*. [\[En línea\]](#)
- Michael Klug (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1-2), 37–40. [\[En línea\]](#)
- Nguyen, B. T., Dinh, G. D., Nguyen, T. X., Nguyen, D. T. P., Vu, T. N., Tran, H. T. T., van Thai, N., Vu, H. y Do, D. D. (2022). The Potential of Biochar to Ameliorate the Major Constraints of Acidic and Salt-Affected Soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(2), 1340–1350. [\[En línea\]](#)
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2018). *Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales*. [\[En línea\]](#)
- Pollnow, J. (2014). *Biochar Feedstock Research Using a Two-Barrel Nested Retort*. [\[En línea\]](#)
- Roshan, A., Ghosh, D. y Maiti, S. K. (2023). How temperature affects biochar properties for application in coal mine spoils? A meta-analysis. *Carbon Research*, 2(1), 1–17. [\[En línea\]](#)
- Segura, D. M. (2018). *Control de calidad de biocarbón para la producción de Terra Preta* [Tesis de Pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica]. repositoriotec.tec.ac.cr. [\[En línea\]](#)
- Toledo, M. (2016). *Manejo de suelos ácidos de las zonas altas de Honduras: Conceptos y metodos*. Secretaría de Agricultura y Ganadería. [\[En línea\]](#)
- Zhao, W., Zhou, Q., Tian, Z., Cui, Y., Liang, Y. y Wang, H [Hongyan] (2020). Apply biochar to ameliorate soda saline-alkali land, improve soil function and increase corn nutrient availability in the Songnen Plain. *The Science of the Total Environment*, 722, 137428. [\[En línea\]](#)