Estudio del biochar obtenido de residuos del cultivo de palma de aceite (Elaeis guineensis, Jacq.) como enmienda de suelos disturbados en el Cesar

Study of biochar obtained from oil palm (Elaeis guineensis, Jacq.) crop waste as an amendment to disturbed soils in Cesar

Díaz-Muegue, L. C.[1]; Peñaloza, A.[2]; Rubiano-Lara, O. E.[3]; Martínez-Maestre, M. M.[4]; Rodríguez-Becerra, L. P.[5]; Montero-Morón, J.[6]

[1]***Ph.D. Luis Carlos Diaz Muegue****. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Facultad de Ingenierías y Tecnológicas. Universidad de Popular del Cesar.*
e-mail: luisdiaz@unicesar.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9587-6061.

[2] ***Andrés Alfonso Peñaloza Soto.*** *Ingeniero Ambiental y Sanitario. Programa de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingenierías y Tecnológicas. Universidad Popular del Cesar.*
e-mail: andresinho_94@hotmail.com. ORCID: https://orcid.org/0009-0004-7811-9228.

[3]***MSc. Orlando Enrique Rubiano Lara.*** *Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Facultad de Ingenierías y Tecnológicas. Universidad de Popular del Cesar.*
e-mail: orlandorubiano@unicesar.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0155-1889.

[4]***MSc. Melissa Mileth Martinez Maestre****. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Facultad de Ingenierías y Tecnológicas. Universidad de Popular del Cesar.*
e-mail: mmilethmartinez@unicesar.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2457-5434.

[5]***MSc. Lina Patricia Rodríguez Becerra.*** *Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Facultad de Ingenierías y Tecnológicas. Universidad de Popular del Cesar.*
e-mail: linarodriguez@unicesar.edu.co. ORCID: https://orcid.org/0000-0003-2063-6498.

[6]***MSc. Janet Montero Morón.*** *Programa de Contaduría Pública. Facultad Ciencias Administrativas, Económicas y Financiera. Universidad Popular del Cesar.*
e-mail: janethmonteromoron@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7628-9109.

Universidad de Popular del Cesar
Balneario Hurtado, Via a Patillal Valledupar – Cesar, Colombia
E-mail: luisdiaz@unicesar.edu.co

Recibido: 15/03/2026 / Aceptado: 18/06/2026

Resumen

El objetivo de esta investigación fue estudiar el biochar como enmienda, en suelos disturbados en el departamento del Cesar. Para ello se obtuvo el biochar de cuesco con un equipo de Análisis Termo Gravimétrico o TGA; se hizo una caracterización del biochar obtenido, con base en la NTC 5167 sobre la caracterización de enmiendas sólidas; la caracterización del suelo de acuerdo a cada parámetro; pH: método del potenciómetro según NTC 5264, CE: conductímetro según USDA, CIC: método del acetato de amonio según el ciat, Densidad real: método del picnómetro según Jaramillo, Retención de humedad: por el método propuesto por Mataix, Fósforo: método Olsen modificado y CO: por método Walkley-Black; y como bioindicador se

utilizó planta de fríjol caupí, castilla, chileno o cabecita negra; cuyo nombre científico es Vigna unguiculata L. Walp del orden de las leguminosas determinando número de plantas por conteo, medición de planta con cinta métrica, peso con balanza, longitud de tallo, longitud de raíz y número de bifurcaciones. El suelo presentó una mejoría en algunas de sus propiedades como la CIC y la densidad real. Así como en el peso y el crecimiento de las plantas utilizadas en el ensayo.

Palabras clave: biochar, cuesco, disturbados, enmienda, palma de aceite, suelos.

Abstract

The objective of this research was to study the biochar as an amendment, in disturbed soils in the department of Cesar. To do this, the biochar of cuesco was obtained with a Thermo Gravimetric Analysis or TGA equipment; a characterization of the biochar obtained was made, based on the NTC 5167 on the characterization of solid amendments; the characterization of the soil according to each parameter; pH: potentiometer method according to NTC 5264, CE: conductivity according to USDA, CIC: method of ammonium acetate according to the ciat, Actual density: pyramometer method according to Jaramillo, Humidity retention: by the method proposed by Mataix, Phosphorus: Olsen method modified and CO: by Walkley-Black method; and as a bioindicator cowpea, castilla, Chilean or blackhead plant was used; whose scientific name is Vigna unguiculata L. Walp of the order of legumes determining number of plants by count, measurement of plant with metric tape, weight with balance, length of stem, length of root and number of bifurcations. The soil showed an improvement in some of its properties such as the CIC and the real density. As well as on the weight and growth of the plants used in the trial.

Keywords: biochar, cuesco, disturbed, amendment, oil palm, soils.

1. INTRODUCCIÓN

El biochar aumenta la productividad y calidad del suelo (Sohi et al., 2009), mejorando el crecimiento de las plantas (Lehmann et al., 2006) gracias a la recalcitrancia de este material frente a otras enmiendas orgánicas y su contribución al incremento de la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Cheng et al., 2008), (Sohi et al., 2009). El biochar se produce por la denominada descomposición térmica del material orgánico (maderas, estiércoles y residuos de cultivos) bajo un suministro limitado de oxígeno (O_2), y a temperaturas relativamente bajas (<700 °C) (Lehmann & Joseph, 2009).

En el grupo de investigación Energía Ambiente y Biomasa (GEAB) de la Universidad Popular del Cesar se ha venido trabajando en el proyecto de estudio del biochar procedente de residuos del cultivo de palma de aceite (elaeis guineensis, jacq.), para su posible uso como enmienda de suelos, especialmente en los suelos del Departamento del Cesar; por lo cual se nos ha facilitado como miembros de dicho grupo, desarrollar esta investigación que contribuya al desarrollo de la investigación.

En un estudio del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (U.D.C.A)

(Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2015) sobre la degradación de suelos por erosión en Colombia, el Cesar se encuentra entre los departamentos que presentan una magnitud de erosión superior al 70% respecto a su área y mayor severidad de erosión, afectando su capacidad productiva (Roncallo et al., 2012) principalmente en los municipios ubicados en la zona noroccidental como son: El Paso, Astrea, San Diego, Bosconia, Valledupar, la Paz, Becerril, Agustín Codazzi y el Copey, los cuales tienen más del 50% de su área con diferentes niveles de desertificación según un estudio del IDEAM en convenio con la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR) (IDEAM & CORPOCESAR, 2007).

Un ensayo con planta de fríjol en parcelas de la granja de la Universidad Popular del Cesar (UPC) aplicando biochar de cuesco de palma de aceite (elaeis guineensis, jacq.), nos permitirá evaluar los posibles efectos enmendantes al caracterizar algunas propiedades físicas y químicas del suelo tratado.

2. METODOLOGIA

2.1. Diseño experimental y estrategia metodológica

El estudio se desarrolló mediante un diseño experimental orientado a evaluar el potencial del biochar producido a partir de residuos del procesamiento de palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq.) como enmienda de un suelo disturbado del departamento del Cesar, Colombia. La estrategia experimental se estructuró en tres fases consecutivas: (i) producción termoquímica del biochar a partir de cuesco de palma de aceite; (ii) caracterización fisicoquímica del biochar y del suelo; y (iii) evaluación agronómica del efecto de la enmienda mediante el establecimiento de Vigna unguiculata L. Walp. como bioindicador vegetal. Esta aproximación permitió integrar indicadores de naturaleza química, física y biológica para determinar la respuesta del sistema suelo-biochar-planta.

El procedimiento experimental contempló la comparación entre el suelo previo al establecimiento del ensayo, un tratamiento testigo y un tratamiento experimental con incorporación de biochar. Para cada parámetro analítico se realizaron cinco repeticiones. Las variables evaluadas comprendieron pH, conductividad eléctrica (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad real, capacidad de retención de humedad, fósforo disponible y carbono orgánico. Adicionalmente, se determinaron variables de crecimiento vegetal y producción de biomasa, incluyendo número de plantas, longitud de planta, longitud de tallo, longitud de raíz, número de bifurcaciones y peso de biomasa.

2.2. Producción del biochar

El biochar se obtuvo utilizando como materia prima el cuesco residual de palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq.). La conversión termoquímica se realizó mediante pirólisis en condiciones de atmósfera inerte, empleando un horno de calentamiento vertical equipado con resistencias eléctricas en configuración de U. Cada resistencia presentó una potencia de 1,5 kW y se dispusieron en paralelo

ISSN 1900-9178 Volumen 14 N°1 - 2023
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

dentro de una estructura aislada térmicamente con lana de vidrio.

El sistema de calentamiento incorporó una retorta ubicada sobre un soporte de cerámica refractaria. La transformación del cuesco se realizó a una temperatura de 450 °C, utilizando nitrógeno (N_2) como gas de atmósfera inerte, con un flujo de 3 L min^{-1} y un tiempo de residencia de 2 h. Estas condiciones fueron utilizadas para obtener el material carbonizado empleado posteriormente en la caracterización fisicoquímica y en el ensayo agronómico.

2.3. Caracterización fisicoquímica del biochar

La caracterización del biochar se realizó tomando como referencia los procedimientos establecidos en la Norma Técnica Colombiana NTC 5167 para productos orgánicos utilizados como abonos, fertilizantes y enmiendas de suelo. Se determinaron parámetros químicos, físicos y nutricionales con el propósito de establecer las características del material producido y valorar su aptitud potencial como enmienda edáfica.

El pH se determinó mediante potenciometría utilizando un electrodo de vidrio y una relación biochar de 1:5. La conductividad eléctrica se determinó mediante conductimetría, empleando igualmente una relación 1:5, y se expresó en dS m^{-1}. La capacidad de intercambio catiónico se determinó mediante el método del acetato de amonio 1 N a pH 7,0, basado en la saturación de los sitios de intercambio con NH_4^+ y su posterior desplazamiento para cuantificación.

La composición elemental del biochar se determinó mediante un analizador elemental Leco TruSpec Micro CHN/CHNS/O, cuantificando carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S). El contenido de oxígeno se estimó por diferencia de masa a partir de los contenidos determinados de C, H, N y cenizas. Los resultados se expresaron como porcentaje en masa. La relación C/N se calculó a partir de los contenidos de carbono y nitrógeno determinados experimentalmente.

La capacidad de retención de humedad se determinó mediante saturación siguiendo la NTC 5167 y se expresó como porcentaje. La densidad real se determinó mediante el procedimiento basado en la relación entre masa y volumen del material. El fósforo disponible se cuantificó mediante el método de Olsen modificado, utilizando extracción con bicarbonato de sodio 0,5 N a pH 8,5 y posterior determinación espectrofotométrica a 635 nm.

El carbono orgánico se determinó mediante el método de Walkley–Black, basado en la oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio en medio ácido y posterior cuantificación colorimétrica del ácido crómico reducido a una longitud de onda máxima de 585 nm.

2.4. Caracterización del suelo

La caracterización del suelo se realizó antes y después de la aplicación del biochar, con el propósito de identificar modificaciones en propiedades físicas y químicas asociadas con la incorporación de la enmienda. Las variables consideradas fueron pH, CE, CIC,

ISSN 1900-9178 Volumen 14 N°1 - 2023
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

densidad real, retención de humedad, fósforo disponible y carbono orgánico.

El pH del suelo se determinó mediante método potenciométrico, empleando una relación suelo de 1:1 (p/v), de acuerdo con la NTC 5264. La CE se determinó mediante conductimetría y se expresó en dS m^{-1}. La interpretación de los resultados de pH y CE se realizó tomando como referencia los criterios de clasificación reportados para suelos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

La CIC se determinó mediante el método del acetato de amonio. El procedimiento comprendió la saturación de los sitios de intercambio con acetato de amonio, la eliminación del exceso de solución y el desplazamiento posterior del amonio retenido mediante una solución de cloruro de sodio. La concentración de amonio desplazado se determinó mediante titulación con hidróxido de sodio y los resultados se expresaron en meq 100 g^{-1}.

La densidad real se determinó mediante picnometría y se expresó en g cm^{-3}. La capacidad de retención de humedad se determinó mediante el método propuesto por Mataix. Para ello, se utilizaron 50 g de suelo seco y tamizado, colocados sobre un filtro previamente pesado. Posteriormente, la muestra fue humedecida con 50 mL de agua destilada y mantenida durante 16 h. Después de este periodo se determinó la masa húmeda y, posteriormente, la muestra se secó en estufa a 100 °C durante 12 h para obtener la masa seca y calcular gravimétricamente la retención de humedad. Se incluyó un blanco de proceso.

El fósforo disponible se determinó mediante el método de Olsen modificado, mientras que el carbono orgánico se determinó mediante Walkley–Black. Los resultados obtenidos se utilizaron para comparar las condiciones iniciales del suelo con aquellas observadas en los tratamientos testigo y experimental.

2.5. Ensayo agronómico y bioindicador vegetal

La respuesta biológica a la incorporación del biochar se evaluó mediante un ensayo agronómico utilizando Vigna unguiculata L. Walp. como especie bioindicadora. Esta especie, conocida como fríjol caupí, castilla, chileno o cabecita negra, pertenece al grupo de las leguminosas y fue utilizada para evaluar la respuesta del crecimiento vegetal frente a las condiciones generadas por la incorporación del biochar al suelo.

Las variables de respuesta vegetal fueron: número de plantas (NP), longitud de planta (LP), longitud de tallo (LT), longitud de raíz (LR), número de bifurcaciones (NB) y peso de biomasa. El número de plantas se determinó mediante conteo directo; las variables de longitud se determinaron mediante medición con cinta métrica y la biomasa se determinó mediante pesaje.

El ensayo incluyó cinco unidades experimentales para el tratamiento testigo (C1-C5) y cinco para el tratamiento con biochar (CB1-CB5). La comparación de estas unidades permitió establecer la respuesta del crecimiento vegetal bajo las dos condiciones experimentales. En el tratamiento testigo se obtuvo un promedio de 24 plantas, 32,9 cm de longitud de planta, 29,28 cm de longitud de tallo, 3,68

ISSN 1900-9178 Volumen 14 N°1 - 2023
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

cm de longitud de raíz, 4,62 bifurcaciones y 5,58 g de biomasa. Para el tratamiento con biochar, los promedios fueron 35,2 plantas, 34,88 cm, 30,16 cm, 4,72 cm, 6,4 bifurcaciones y 7,36 g, respectivamente.

2.6. Evaluación del efecto del biochar sobre las propiedades edáficas

El efecto del biochar se determinó mediante la comparación de las propiedades del suelo previo con los valores obtenidos en los tratamientos testigo y experimental. Esta comparación permitió identificar cambios asociados con la aplicación de la enmienda en variables relacionadas con la fertilidad y calidad física del suelo.

Los indicadores utilizados fueron pH, CE, CIC, retención de humedad, densidad real, fósforo disponible y carbono orgánico. La respuesta del suelo se interpretó considerando simultáneamente la magnitud del cambio respecto al suelo previo y la diferencia entre los tratamientos testigo y experimental. Los valores obtenidos mostraron, entre otros cambios, una modificación de la CIC de 8,2 a 12,4 meq 100 g^{-1} y una disminución de la densidad real de 2,6 a 2,0 g cm^{-3} en el tratamiento experimental.

3. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El biochar obtenido a partir del cuesco de palma de aceite presentó un pH de 6,1, una conductividad eléctrica (CE) de 0,44 dS m^{-1} y una capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 28,8 meq 100 g^{-1}, características que evidencian un material potencialmente compatible con su utilización como enmienda de suelos disturbados. Un pH que tiende a la acidez, aunque sea leve, se considera una característica importante. Esto se debe a que la influencia de un aditivo a base de carbono en la reactividad del suelo no es sencilla, ya que depende de las cualidades propias del biochar, del material de origen que se usó, y de cómo fue el proceso de pirólisis. En relación con esto, los hallazgos de un metaanálisis global revelaron que incorporar biochar puede subir el pH y la CIC del suelo de forma notoria. Sin embargo, lo fuerte que sea esa respuesta está ligada al tipo de biomasa de partida, la temperatura a la que se hizo la pirólisis, la textura del suelo y la cantidad que se añadió (Singh et al., 2022). Para este estudio en particular, la conductividad eléctrica (CE) resultó ser bastante baja (0,44 dS m^{-1}), lo cual es bueno. Esto da a entender que el aporte de sales solubles es limitado y, por lo tanto, la posibilidad de que cause estrés osmótico cuando se mezcle con el suelo es menor. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de 28,8 meq 100 g^{-1}, o 28,8 cmol(+) kg^{-1}, muestra una buena habilidad para retener cationes. Esto tiene que ver con que tiene superficies con carga y grupos funcionales que pueden interactuar con los nutrientes y otros iones. La CIC de un biochar, entre otras cosas, se ve influenciada por su área de superficie, qué tan poroso es, y la cantidad de cargas en su superficie, además de cómo se produjo y el pH que se usó al medirla (Weber & Quicker, 2018). Aunque este valor que se consiguió está un poco por debajo del mínimo de 30 cmol(+) kg^{-1} que se indica en la norma NTC 5167, es importante considerar que el biochar no funciona solo por cumplir un número. Su utilidad real se ve en cómo interactúa con las propiedades ya existentes del suelo.

ISSN 1900-9178 Volumen 14 N°1 - 2023
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

De hecho, Singh et al. (2022) observaron que al añadir biochar se aumentó de manera significativa la CIC del suelo, con efectos más marcados en ciertos tipos de suelo según su textura y en diferentes tasas de aplicación (Tabla 1).

Si miramos sus propiedades físicas y su estabilidad de carbono, el material tenía un 65,5 % de C, 4,19 % de H, 4,25 % de N, 18,04 % de O, y no se encontró nada de S. Adicionalmente, su proporción C/N fue de 15,41, podía retener un 320 % de humedad, y su densidad real era de 0,6 g cm^{-3}. Que tenga tanto carbono confirma que el producto es mayormente carbonoso. Esto es clave si se quiere usar como enmienda para que el suelo se recupere y también para guardar carbono. La proporción C/N es relativamente baja, lo que, por lo demás, sugiere que hay menos riesgo de que los microorganismos inmovilicen intensamente el nitrógeno, a diferencia de lo que pasaría con materiales carbonosos que tienen relaciones C/N mucho más altas. Sin embargo, para estar seguros de esto, habría que hacer pruebas de incubación y revisar cómo está el nitrógeno disponible en el suelo. Especialmente importante es su gran capacidad para retener humedad (un 320 %). Esto se debe a que la estructura porosa del biochar puede cambiar cómo se mueve el agua en el sistema de suelo y enmienda. Razzaghi et al. (2020), a través de un metaanálisis, descubrieron que el biochar sí puede ayudar a que el suelo retenga más agua y a que su densidad aparente baje. Pero la fuerza de este efecto dependerá de la textura del suelo y de las características propias del biochar. En la misma línea, Adhikari et al. (2022) explicaron que la capacidad del biochar para retener agua varía según el material de partida, la temperatura y el tiempo de pirólisis, el tamaño de las partículas, la porosidad y las características del suelo donde se aplica. Con todo esto en mente, la combinación de un alto contenido de carbono, una baja densidad y una elevada retención de humedad, como se ha observado, es una cualidad muy valiosa para recuperar suelos que han sido alterados. En estos suelos, la pérdida de estructura, la compactación y la poca agua disponible pueden hacer difícil que crezca vegetación. No obstante, si consideramos el contenido de P (1,65 mg kg^{-1}) y, sobre todo, que el carbono orgánico es solo un 0,2 %, no podemos decir que el biochar tenga una función fertilizante directa. Al contrario, su mayor aporte podría ser el de mejorar las propiedades físicas y de intercambio del suelo. Por eso, para saber si este material es bueno para la agricultura, es necesario hacer pruebas de dosis-respuesta y seguir de cerca cómo evoluciona el sistema suelo-biochar-planta con el tiempo (Adhikari et al., 2022; Razzaghi et al., 2020; Singh et al., 2022) (Tabla 1).

Tabla 1. *Caracterización fisicoquímica del Biochar.*

Análisis	Unidades	Valor
pH	–	6,1*
CE	dS/m	0,44**
CIC	meq/100 g	28,8
C	%	65,5
H	%	4,19
N	%	4,25
S	%	0
O	%	18,04
C/N	–	15,41
Retención de humedad	%	320

ISSN 1900-9178 Volumen 14 N°1 - 2023
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Densidad real	g/cm³	0,6
P	mg/kg	1,65
CO	%	0,2

*Nota: *pH: 1:5; **CE: 1:5.*

3.1 Propiedades fisicoquímicas del suelo

La incorporación del biochar produjo modificaciones relevantes en las propiedades fisicoquímicas del suelo, aunque la magnitud y dirección de la respuesta variaron entre los parámetros evaluados. El pH aumentó de 6,3 en el suelo previo a 6,7 en el suelo experimental, mientras que el suelo testigo alcanzó 6,9. Por tanto, el tratamiento con biochar no generó un incremento adicional del pH respecto al testigo, lo que sugiere que la modificación de esta propiedad pudo estar influenciada también por las condiciones propias del ensayo. Este comportamiento es importante porque el biochar puede modificar la reacción del suelo mediante la incorporación de grupos funcionales superficiales y, dependiendo de la materia prima y de las condiciones de pirólisis, mediante la presencia de cationes básicos y compuestos de carácter alcalino (Singh et al., 2022). La conductividad eléctrica aumentó de 0,14 dS m^{-1} en el suelo inicial a 0,44 dS m^{-1} en el tratamiento experimental, frente a 0,36 dS m^{-1} en el testigo. Este incremento, aunque relativamente pequeño en términos absolutos, indica una mayor concentración de especies iónicas solubles en el sistema suelo–biochar, posiblemente relacionada con la liberación o redistribución de nutrientes y minerales contenidos en el material carbonizado. El cambio más relevante se observó en la capacidad de intercambio catiónico, que pasó de 8,2 a 12,4 meq 100 g^{-1} en el suelo experimental, equivalente a un incremento de aproximadamente 51,2 % respecto al suelo inicial y de 34,8 % respecto al testigo. Este resultado constituye uno de los principales indicadores del efecto favorable del biochar, debido a que una mayor CIC puede incrementar la capacidad del suelo para retener cationes y reducir su pérdida por lixiviación. El resultado es consistente con el metaanálisis de Singh et al. (2022), quienes encontraron un incremento promedio de aproximadamente 20 % en la CIC de suelos tratados con biochar, aunque la respuesta depende del tipo de suelo, materia prima, temperatura de pirólisis y tasa de aplicación. En consecuencia, el incremento observado en el presente estudio debe interpretarse como una modificación potencialmente favorable de la capacidad de retención de nutrientes, particularmente relevante para la recuperación de suelos disturbados con baja fertilidad química (Tabla 2).

En cuanto a las propiedades físicas, la retención de humedad aumentó de 28,18 % en el suelo previo a 30,50 % en el suelo experimental, mientras que el testigo presentó 26,56 %. Así, el tratamiento con biochar mostró una retención aproximadamente 14,8 % superior al testigo y 8,2 % superior al suelo inicial, lo que constituye una respuesta favorable para un suelo sometido a procesos de disturbación y potencial déficit hídrico. Este comportamiento puede relacionarse con la elevada capacidad de retención de agua del biochar utilizado, cuyo valor fue de 320 %, así como con su baja densidad y estructura porosa. La bibliografía nos dice que el impacto del biochar en cómo el agua se mueve está muy conectado a la

ISSN 1900-9178 Volumen 14 N°1 - 2023
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

porosidad, el tamaño de las partículas, la superficie específica, la textura del suelo y las características del material original. Por esto, la respuesta no siempre es igual entre distintos sistemas de suelo y biochar (Adhikari et al., 2022; Razzaghi et al., 2020). De forma constante, la densidad real bajó de 2,6 g cm^{-3} en el suelo al principio a 2,0 g cm^{-3} en el tratamiento experimental, a diferencia de los 2,2 g cm^{-3} del control. Esto supone una reducción de cerca del 23,1 % respecto al suelo inicial y del 9,1 % en comparación con el control. Esta disminución es importante desde el punto de vista técnico, ya que añadir un material de carbón menos denso puede cambiar la estructura del suelo y crear mejores condiciones para que el agua y el aire circulen, y para el crecimiento de las raíces. Un gran análisis de 59 estudios mostró que usar biochar, en promedio, disminuyó la densidad aparente del suelo y aumentó su porosidad, aunque el tamaño del efecto dependió de las características del biochar y del suelo donde se aplicó (Singh et al., 2022). En contraste, el fósforo disponible tuvo una pequeña reducción en comparación con el suelo original, pasando de 0,982 a 0,942 mg kg^{-1} en el tratamiento experimental, aunque este valor fue mayor que el del control (0,814 mg kg^{-1}). Este comportamiento podría sugerir una interacción entre el biochar y las formas de fósforo que están disponibles, quizás por procesos de adsorción en la superficie; por lo tanto, no sería correcto ver el biochar solo como una fuente de P. El carbono orgánico disminuyó notablemente, desde 2,98 % en el suelo inicial hasta 0,76 % en el suelo experimental, un valor que casi coincidía con el observado en el control (0,75 %). Esta baja indica que, bajo las condiciones específicas de la prueba, la aplicación de biochar no se tradujo de forma automática en un aumento detectable de carbono orgánico según el método empleado. En general, los resultados sugieren que el efecto principal del biochar en este experimento estuvo más relacionado con la mejora de la CIC, la capacidad de retener humedad y la reducción de la densidad, que con un aumento rápido de carbono orgánico o fósforo disponible. Esta interpretación coincide con la evidencia de experimentos que indican que los efectos del biochar en las propiedades físicas e hídricas dependen mucho del suelo, del material usado y de las condiciones del experimento (Razzaghi et al., 2020; Adhikari et al., 2022) (Tabla 2).

Tabla 2. *Caracterización del suelo en las diferentes etapas.*

Parámetro	Unidades	Suelo previo	Suelo testigo	Suelo experimental
pH	(1:5)	6,3	6,9	6,7
CE	(dS/m) (1:5)	0,14	0,36	0,44
CIC	(meq/100 g)	8,2	9,2	12,4
Retención de humedad	%	28,18	26,56	30,5
Densidad real	g/cm³	2,6	2,2	2
P	mg/kg	0,982	0,814	0,942
CO	%	2,98	0,75	0,76

*Nota: *pH: 1:5; **CE: 1:5.*

ISSN 1900-9178 Volumen 14 N°1 - 2023
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

3.2 Crecimiento vegetal

La respuesta de Vigna unguiculata frente a la incorporación del biochar mostró una tendencia favorable en todas las variables morfológicas evaluadas. En el tratamiento testigo se obtuvo un promedio de 24 plantas, mientras que el tratamiento con biochar alcanzó 35,2 plantas, lo que representa un incremento de aproximadamente 46,7 %. De manera similar, la longitud promedio de la planta aumentó de 32,9 a 34,88 cm (6,0 %), la longitud del tallo pasó de 29,28 a 30,16 cm (3,0 %) y la longitud de la raíz aumentó de 3,68 a 4,72 cm (28,3 %). El número de bifurcaciones presentó un incremento de 4,62 a 6,40 (38,5 %), mientras que la biomasa aumentó de 5,58 a 7,36 g, equivalente a un incremento de 31,9 %. La magnitud diferencial de estas respuestas es particularmente relevante: el mayor efecto se observó sobre el establecimiento de las plantas y el desarrollo radical, mientras que los cambios en la longitud aérea fueron comparativamente menores. Este patrón sugiere que la incorporación del biochar pudo haber modificado principalmente el entorno edáfico inmediato de las raíces, favoreciendo condiciones físicas y químicas más adecuadas para el establecimiento vegetal. Esta interpretación es consistente con la evidencia obtenida mediante metaanálisis, que demuestra que la respuesta productiva de las plantas al biochar depende de la interacción entre las propiedades del material y las condiciones iniciales del suelo, incluyendo pH, CIC, contenido de carbono, densidad y relación C/N (Xu et al., 2020). En particular, estos autores estimaron un incremento medio de 16 % en la productividad vegetal, aunque observaron una amplia variabilidad entre sistemas suelo–biochar, lo que confirma que la respuesta no debe considerarse universal. Asimismo, Singh et al. (2022) señalaron que la aplicación de biochar puede modificar favorablemente propiedades físicas y químicas del suelo y que los incrementos de productividad vegetal están relacionados con cambios en dichas propiedades. En el presente estudio, la mayor longitud radical observada en el tratamiento experimental puede relacionarse con el incremento de la CIC de 8,2 a 12,4 meq 100 g^{-1}, la reducción de la densidad real de 2,6 a 2,0 g cm^{-3} y el aumento de la retención de humedad de 28,18 a 30,50 %. En conjunto, estos cambios pueden haber favorecido un ambiente más adecuado para la exploración radical y la disponibilidad de agua y nutrientes. No obstante, dado que el pH, la CE y otras variables no presentaron cambios estadísticamente significativos, la respuesta vegetal debe interpretarse como resultado de la interacción de múltiples propiedades del sistema suelo-biochar y no como consecuencia de una única variable.

El incremento de 31,9 % en la biomasa constituye uno de los resultados agronómicamente más importantes del ensayo, porque integra la respuesta acumulada de la planta frente a las condiciones físicas, químicas y biológicas del suelo durante el periodo experimental. La mayor producción de biomasa observada en el tratamiento con biochar puede estar relacionada con una mejor disponibilidad y retención de recursos en la rizosfera, particularmente agua y nutrientes, favorecida por el incremento de la CIC, la reducción de la densidad y el aumento de la retención de humedad. La literatura reciente confirma que la respuesta de crecimiento de las plantas frente al biochar depende de la combinación entre las propiedades del biochar, las características del suelo, la tasa de aplicación y las condiciones de cultivo, por lo que el desempeño de un biochar determinado no puede extrapolarse directamente a otros sistemas edáficos (Xu et al., 2020). Además, Singh et al. (2022) encontraron que los biochars producidos entre 400 y

ISSN 1900-9178 Volumen 14 N°1 - 2023
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

500 °C estuvieron entre los más efectivos para incrementar la productividad de los cultivos, rango que coincide con la temperatura de 450 °C utilizada para producir el biochar de cuesco de palma en este estudio. Esta correspondencia resulta particularmente interesante, debido a que la temperatura de pirólisis controla propiedades como la estabilidad del carbono, porosidad, contenido de cenizas, grupos funcionales y capacidad de interacción con el agua y los nutrientes. El incremento del número de bifurcaciones (38,5 %) y de la longitud radical (28,3 %) también puede representar una mejora en la capacidad exploratoria de la planta, potencialmente aumentando la superficie efectiva de contacto raíz–suelo. Sin embargo, debe evitarse afirmar que el biochar fue la causa exclusiva de cada respuesta, especialmente porque el diseño presentado compara un tratamiento testigo y uno experimental y porque algunas propiedades edáficas no mostraron diferencias estadísticamente significativas.

3.3 Vigna unguiculata en el tratamiento con biochar

El tratamiento con biochar (CB1-CB5) presentó una respuesta vegetal consistente entre las cinco unidades experimentales, aunque con cierta variabilidad en las variables evaluadas. El número de plantas osciló entre 31 y 40 individuos, con un promedio de 35,2 plantas, destacándose CB3 con 40 plantas y CB1 con el menor valor (31 plantas). La longitud de planta presentó una variación reducida, entre 34,5 y 35,4 cm, con un promedio de 34,88 cm, mientras que la longitud del tallo osciló entre 29,6 y 30,5 cm, alcanzando un promedio de 30,16 cm. Esta baja dispersión en las variables de crecimiento aéreo sugiere una respuesta relativamente homogénea del material vegetal frente a las condiciones generadas por el tratamiento. En contraste, la longitud de raíz mostró valores entre 4,2 y 5,1 cm, con un promedio de 4,72 cm, mientras que el número de bifurcaciones varió entre 6,0 y 6,8, con un promedio de 6,4. La mayor respuesta relativa se observó, por tanto, en las variables asociadas con la arquitectura radical y la ramificación. Este comportamiento adquiere importancia porque el desarrollo del sistema radical constituye un indicador sensible de las condiciones físicas y químicas del suelo, particularmente de disponibilidad de agua, aireación, resistencia mecánica y disponibilidad de nutrientes. El biochar puede modificar estas condiciones debido a su estructura porosa, baja densidad y capacidad de intercambio, favoreciendo potencialmente el establecimiento y expansión de las raíces (Adhikari et al., 2022; Singh et al., 2022). En el presente tratamiento, esta interpretación es coherente con las modificaciones previamente observadas en el suelo experimental, especialmente el incremento de la CIC hasta 12,4 meq 100 g^{-1}, el aumento de la retención de humedad hasta 30,5 % y la reducción de la densidad real hasta 2,0 g cm^{-3}. No obstante, la variabilidad entre las unidades CB1–CB5 demuestra que la respuesta no fue completamente uniforme, por lo que la evaluación del efecto del biochar debe considerar tanto los valores medios como la variación experimental (Tabla 3).

La producción de biomasa presentó valores entre 5,7 y 8,4 g, con un promedio de 7,36 g, siendo CB1 la unidad con mayor acumulación de biomasa y CB5 la de menor valor. El promedio obtenido representa un indicador integrado del desempeño fisiológico de las plantas bajo el tratamiento con biochar y, al compararlo con el promedio de 5,58 g registrado en el suelo testigo, evidencia un incremento de aproximadamente 31,9 %. Este resultado es particularmente relevante para el objetivo de utilizar biochar como enmienda de suelos disturbados, porque demuestra que la modificación de las propiedades edáficas estuvo acompañada de una respuesta biológica favorable. El

incremento de biomasa puede estar relacionado con la mayor disponibilidad y retención de agua y nutrientes derivada de la modificación de la CIC y de las propiedades físicas del suelo. Estudios de síntesis han demostrado que la aplicación de biochar puede mejorar la productividad vegetal, aunque la respuesta depende significativamente de las características del biochar, las propiedades iniciales del suelo y las condiciones experimentales (Singh et al., 2022; Xu et al., 2020). Asimismo, la temperatura de pirólisis utilizada en este estudio (450 °C) se encuentra dentro del intervalo identificado en estudios de metaanálisis como favorable para obtener biochars capaces de generar respuestas positivas sobre la productividad vegetal (Singh et al., 2022). Sin embargo, debe señalarse que los datos de CB1-CB5, por sí solos, permiten caracterizar la variabilidad interna del tratamiento experimental, pero no permiten demostrar estadísticamente el efecto del biochar sin contrastarlos con las correspondientes réplicas del tratamiento testigo mediante ANOVA y una prueba de comparación de medias (Tabla 3).

Tabla 3. *Crecimiento y biomasa del suelo experimental.*

	N.P. (N.º)	L.P. (cm)	L.T. (cm)	L.R. (cm)	N.B. (N.º)	Peso (g)
CB1	31	34,6	29,9	4,7	6,5	8,4
CB2	35	34,7	29,6	5,1	6,3	8,1
CB3	40	35,2	30,5	4,7	6,0	7,8
CB4	36	34,5	30,3	4,2	6,4	6,8
CB5	34	35,4	30,5	4,9	6,8	5,7
Promedio	**35,2**	**34,88**	**30,16**	**4,72**	**6,4**	**7,36**

Nota: CB1: cama de biochar 1; N.P.: número de plantas; L.P.: longitud de planta; L.T.: longitud de tallo; L.R.: longitud de raíz; N.B.: número de bifurcaciones.

4. CONCLUSIONES

El biochar obtenido a partir del cuesco de palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq.) presentó características fisicoquímicas compatibles con su utilización como enmienda de suelos disturbados. El material mostró un pH de 6,1, conductividad eléctrica de 0,44 dS m^{-1}, CIC de 28,8 meq 100 g^{-1}, contenido de carbono de 65,5 %, relación C/N de 15,41, retención de humedad de 320 % y densidad real de 0,6 g cm^{-3}. En conjunto, estas propiedades evidencian un material carbonoso con capacidad para interactuar con el agua y los nutrientes y modificar algunas propiedades físicas y químicas del suelo. Particularmente, la elevada retención de humedad y la baja densidad del biochar constituyen atributos de interés para su aplicación en suelos disturbados, donde la recuperación de las condiciones físicas constituye un factor determinante para el establecimiento de la vegetación. No obstante, el contenido de fósforo disponible (1,65 mg kg^{-1}) indica que el material no debe considerarse exclusivamente como fertilizante, sino principalmente como enmienda capaz de mejorar las condiciones funcionales del suelo.

La incorporación del biochar generó una respuesta favorable sobre determinadas propiedades del suelo, especialmente sobre la capacidad de intercambio catiónico, la retención de humedad y la densidad real. En comparación con el suelo previo, la CIC aumentó de 8,2 a 12,4 meq 100 g^{-1}, mientras que la retención de humedad pasó de 28,18 a 30,50 % y la

densidad real disminuyó de 2,6 a 2,0 g cm^{-3}. Frente al suelo testigo, estas diferencias también fueron favorables para el tratamiento experimental, particularmente en CIC, retención de humedad y densidad. El incremento de la CIC representa una mejora potencial de la capacidad del suelo para retener nutrientes en formas intercambiables, mientras que el aumento de la retención hídrica y la reducción de la densidad pueden favorecer el establecimiento y desarrollo del sistema radical. Sin embargo, los resultados deben interpretarse con cautela, debido a que no todas las variables presentaron diferencias estadísticamente significativas. El análisis estadístico reportado en el estudio identificó diferencias significativas principalmente para la CIC y la densidad real, mientras que pH, CE, retención de humedad, fósforo y carbono orgánico no mostraron diferencias significativas al nivel de confianza establecido. Por tanto, el efecto del biochar debe entenderse como una modificación selectiva de las propiedades edáficas y no como una mejora generalizada de todos los indicadores evaluados.

La respuesta de Vigna unguiculata L. Walp. constituye evidencia experimental del potencial agronómico del biochar de cuesco de palma para favorecer el establecimiento vegetal en suelos disturbados. El tratamiento con biochar presentó promedios de 35,2 plantas, 34,88 cm de longitud de planta, 30,16 cm de longitud de tallo, 4,72 cm de longitud radical, 6,4 bifurcaciones y 7,36 g de biomasa, frente a 24 plantas, 32,9 cm, 29,28 cm, 3,68 cm, 4,62 bifurcaciones y 5,58 g, respectivamente, en el tratamiento testigo. Los incrementos relativos fueron particularmente importantes en el número de plantas (46,7 %), longitud de raíz (28,3 %), número de bifurcaciones (38,5 %) y biomasa (31,9 %). Estos resultados sugieren que la modificación conjunta de las condiciones físicas y químicas del suelo asociada con la aplicación del biochar pudo favorecer el establecimiento, desarrollo radical y acumulación de biomasa vegetal. El documento reporta, además, diferencias estadísticamente significativas para número de plantas, longitud de raíz, número de bifurcaciones y peso de biomasa, mientras que la longitud de planta y longitud de tallo no presentaron diferencias significativas. En consecuencia, el biochar producido a 450 °C a partir de residuos de palma representa una alternativa técnicamente promisoria para procesos de rehabilitación de suelos disturbados en el Cesar, al permitir valorizar un residuo agroindustrial y, simultáneamente, generar una enmienda con capacidad de mejorar determinadas propiedades edáficas y favorecer el establecimiento de cobertura vegetal. Sin embargo, para confirmar su aplicabilidad a escala de restauración, futuras investigaciones deberían evaluar diferentes dosis de biochar, periodos de incubación más prolongados y la evolución temporal de las propiedades del suelo y de la respuesta vegetal.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adhikari, S., Timms, W., & Mahmud, M. A. P. (2022). Optimising water holding capacity and hydrophobicity of biochar for soil amendment-A review. Science of the Total Environment, 851, 158043. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158043

Cheng, C. H., Lehmann, J., Thies, J. E., & Burton, S. D. (2008). Stability of black carbon in soils across a climatic gradient. Geophysical Research Letters, 113, 1–10.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2015). Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia. IDEAM. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023646/Sintesis.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], & Corporación Autónoma Regional del Cesar [CORPOCESAR]. (2007). Plan de Acción Regional (PAR) para la lucha contra la desertificación y la sequía en el departamento del Cesar, con énfasis en la región del río Cesar. Convenio 172/2004.

Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—A review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11, 403–427.

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2009). Biochar for environmental management: Science and technology. Earthscan.

Razzaghi, F., Obour, P. B., & Arthur, E. (2020). Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. Geoderma, 361, 114055. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114055

Roncallo, B., Murillo, J., Rodríguez, G., Bonilla, R. R., & Garrido, M. F. (2012). Producción de forraje y respuesta animal en suelos del Valle del Cesar en proceso de recuperación. Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria, 13. http://oai.redalyc.org/articulo.oa?id=449945032012

Singh, H., Northup, B. K., Rice, C. W., & Vara Prasad, P. V. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: A meta-analysis. Biochar, 4, Article 8. https://doi.org/10.1007/s42773-022-00138-1

Sohi, S., López-Capel, E., Krull, E., & Bol, R. (2009). Biochar's roles in soil and climate change: A review. CSIRO Land and Water Science Report 05/09.

Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. Fuel, 217, 240–261. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054

Xu, Y., Chen, W., & Liu, X. (2020). Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis. Science of the Total Environment, 713, 136635. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136635