



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión
Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental
Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica

**Efecto del estiércol de cerdo y biocarbón en el crecimiento inicial del maíz
amarillo duro**

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Agrónomo

Autores

Jose Manuel Quispe Calderon
Juvenal Felix Montes Reynalte

Asesor

Dr. Dionicio Belisario Luis Olivas




DIONICIO BELISARIO LUIS OLIVAS
INGENIERO AGRÓNOMO
CIP N° 066110

Huacho-Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental

Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica

METADATOS

DATOS DEL AUTOR (ES):		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Jose Manuel Quispe Calderon	43397114	04/08/2026
Juvenal Felix Montes Reynalte	43679584	04/08/2026
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Dr. Dionicio Belisario Luis olivas	15651224	https://orcid.org/0000-0002-5367-5285
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO/POSGRADO-MAESTRÍA-DOCTORADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CODIGO ORCID
Mg, Sc. Eroncio Mendoza Nieto	06723932	https://orcid.org/0000-0002-4850-2777
Dr. Angel Pedro Campos Julca	15733670	https://orcid.org/0000-0002-1418-6104
Mg. Sc. Cristina Karina Andrade Alvarado	40231658	https://orcid.org/0000-0003-2681-7863

034626Jose Manuel Quispe Calderon 034623Juvena...

Efecto del estiércol de cerdo y biocarbón en el crecimiento inicial del maíz amarillo duro



UI-FIAIAYA PREGRADO 2026



Unidad de Investigación FIAIAYA-2026



Facultad de Ingeniería Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::1:3569835324

Fecha de entrega

14 may 2026, 10:08 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

14 may 2026, 10:48 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

BORRADOR_de_tesis-QC-MR.pdf

Tamaño del archivo

795,6 KB

75 páginas

20.926 palabras

115.425 caracteres



Página 2 de 83 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: trn:oid::1:3569835324

20% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencias excluidas

Fuentes principales

20%



Fuentes de Internet

7%



Publicaciones

8%



Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A nuestros padres, por guiarnos y formarnos como las personas que somos hoy; por brindarnos su apoyo incondicional, su tiempo y sus recursos, y por confiar plenamente en nosotros para alcanzar este logro profesional.

AGRADECIMIENTOS

- Al Dr. Dionicio Belisario Luis Olivas, por su asesoría constante en el desarrollo de esta investigación, así como por su paciencia y eficiencia en cada una de las etapas de la tesis.
- Expresamos también nuestro agradecimiento a los docentes, por su guía, dedicación y disposición durante todo el proceso de elaboración de esta tesis; su experiencia y compromiso académico fueron fundamentales para fortalecer nuestros conocimientos y cumplir los objetivos planteados.
- Reconocemos igualmente a nuestros compañeros y colegas, por su apoyo, el intercambio de ideas y el compañerismo demostrado, los cuales contribuyeron significativamente al desarrollo y fortalecimiento de nuestro trabajo investigativo.

ÍNDICE

RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1 Descripción de la realidad problemática	3
1.2 Formulación del problema.....	4
1.2.1 Problema general	4
1.2.2 Problemas específicos.....	4
1.3 Objetivos de la investigación.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Justificación de la investigación	5
1.5 Delimitación del estudio	6
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Antecedentes de la investigación.....	8
2.1.1 Antecedentes internacionales	8
2.1.2 Antecedentes nacionales.....	10
2.2 Bases teóricas	12
2.3 Definición de términos básicos.....	20
2.4 Hipótesis de investigación	21
2.3.1 Hipótesis general	21
2.3.2 Hipótesis específicas.....	21
2.5 Operacionalización de las variables	22
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....	23
3.1 Diseño metodológico	23
3.1.1 Ubicación.....	23
3.1.2 Características del área experimental	23
3.1.3 Tratamientos	25
3.1.4 Diseño experimental	25
3.1.5 Variables a evaluar	26
3.1.6 Conducción del experimento	26
3.2 Técnicas para el procesamiento de la información.....	28

CAPITULO IV. RESULTADOS	29
4.1 Altura de planta (cm)	29
4.2 Peso fresco de follaje (g)	31
4.3 Peso fresco de raíz (g).....	34
4.4 Peso fresco total (g)	35
4.5 Diametro de tallo (cm).....	38
4.6 Peso seco de follaje (g)	40
4.7 Peso seco de raíces (g).....	43
4.8 Peso seco total (g)	44
4.9 Clorofila A	46
4.10 Clorofila B	47
4.11 Clorofila total.....	49
CAPITULO V. DISCUSIONES.....	51
CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	53
CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

Índice de Tabla

Tabla1 Operacionalización de variables.....	22
Tabla2 Tratamientos en estudio.....	25
Tabla3 Análisis de varianza.....	25
Tabla4 Características del suelo	26
Tabla5 Característica de la fuente orgánica.....	27
Tabla6 Analisis de varianza para altura de planta (cm).....	29
Tabla7 Analisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo (t ha ⁻¹) para altura de planta (cm)	30
Tabla8 Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 t ha ⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para altura de planta (cm).....	30
Tabla9 Analisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para altura de planta (cm)	31
Tabla10 Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para altura de planta (cm).....	31
Tabla11 Análisis de varianza para peso fresco de follaje (g)	32
Tabla12 Analisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo (t ha ⁻¹) para peso fresco de follaje (g).....	32
Tabla13 Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 t ha ⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso fresco de follaje	32
Tabla14 Efecto del biocarbón dentro del nivel 5 t ha ⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% peso fresco de follaje (g)	33
Tabla15 Analisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para peso fresco de follaje (g).....	33
Tabla16 Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso fresco de follaje	34
Tabla17 Análisis de varianza para peso fresco de raíz (g)	34
Tabla18 Efecto del biocarbón según la Prueba de Tukey al 5% para peso fresco de raíz (g)	35
Tabla19 Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso fresco de raíz (g).....	35
Tabla20 Análisis de varianza para peso fresco total (g)	36
Tabla21 Analisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo (t ha ⁻¹) para peso fresco total (g).....	36

Tabla22 Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 t ha ⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% peso fresco total (g)	36
Tabla23 Efecto del biocarbón dentro del nivel 5 t ha ⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% peso fresco total (g)	37
Tabla24 Analisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para peso fresco total (g)	37
Tabla25 <i>Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso fresco total (g)</i>	37
Tabla26 Análisis de varianza para diametro de tallo (cm)	38
Tabla27 Analisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo (t ha ⁻¹) para diametro de tallo (cm)	38
Tabla28 Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 t ha ⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para diametro de tallo (mm)	39
Tabla29 Efecto del biocarbón dentro del nivel 5 t ha ⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para diametro de tallo (mm)	39
Tabla30 Analisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para diametro de tallo (mm)	39
Tabla31 Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para diametro de tallo (mm)	40
Tabla32 Análisis de varianza para peso seco de follaje (g)	40
Tabla33 Analisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo (t ha ⁻¹) para peso seco de follaje (g)	41
Tabla34 Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 t ha ⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de follaje (g)	41
Tabla35 Efecto del biocarbón dentro del nivel 5 t ha ⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de follaje (g)	41
Tabla36 Efecto del biocarbón dentro del nivel 15 t ha ⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de follaje (g)	41
Tabla37 Analisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para peso seco de follaje (g)	42
Tabla38 Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel sin aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de follaje (g)	42
Tabla39 Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de follaje (g)	42

Tabla40 Análisis de varianza para peso seco de raíces (g).....	43
Tabla41 Efecto del biocarbón según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de raíces (g)	43
Tabla42 Efecto del estiércol de cerdo según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de raíces (g)	44
Tabla43 Análisis de varianza para peso seco total (g).....	44
Tabla44 Analisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo ($t\ ha^{-1}$) para peso seco total (g)	45
Tabla45 Efecto del biocarbón dentro del nivel $0\ t\ ha^{-1}$ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco total (g).....	45
Tabla46 Efecto del biocarbón dentro del nivel $10\ t\ ha^{-1}$ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco total (g).....	45
Tabla47 Analisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para peso seco total (g)	46
Tabla48 Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco total (g).....	46
Tabla49 Análisis de varianza para clorofila A	47
Tabla50 Efecto del biocarbón según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila A	47
Tabla51 Efecto del estiércol de cerdo según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila A	47
Tabla52 Análisis de varianza para clorofila B.....	48
Tabla53 Efecto del biocarbón dentro del nivel $0\ t\ ha^{-1}$ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila B.....	48
Tabla54 Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila B.....	48
Tabla55 Análisis de varianza para clorofila total	49
Tabla56 Efecto del biocarbón según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila total.....	50
Tabla57 Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila total	50

RESUMEN

Objetivo: evaluar el efecto del estiércol de cerdo y el biocarbón sobre el crecimiento inicial del maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) en condiciones de suelo arenoso. **Metodología:** el estudio se desarrolló en un diseño de bloques completos al azar con arreglo de parcelas divididas, donde la parcela principal correspondió a la presencia o ausencia de biocarbón, y la subparcela a cuatro niveles de estiércol de cerdo (0, 5, 10 y 15 t ha⁻¹), con tres repeticiones. Se evaluaron variables de crecimiento como altura de planta, diámetro de tallo y biomasa aérea, y los datos fueron analizados mediante ANOVA y prueba de Tukey al 5 % de significancia. **Resultados:** los resultados mostraron diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) para el factor estiércol de cerdo e interacción significativa ($p < 0,05$) entre biocarbón y estiércol, mientras que el factor biocarbón por sí solo no presentó efecto estadístico. El mayor crecimiento del maíz se obtuvo con la combinación de biocarbón y 15 t ha⁻¹ de estiércol, lo que evidencia una interacción sinérgica entre ambas enmiendas. La presencia del biocarbón mejoró la eficiencia del estiércol al reducir la pérdida de nutrientes y favorecer una liberación más gradual, mientras que el estiércol aportó nutrientes esenciales y mejoró la estructura del suelo. **Conclusión:** Se concluye que la combinación de biocarbón y estiércol de cerdo constituye una práctica agronómica eficiente y sostenible para el manejo de suelos arenosos, al incrementar la disponibilidad de nutrientes, optimizar la retención de agua y mejorar el crecimiento inicial del maíz amarillo duro.

Palabras clave: biocarbón, estiércol de cerdo, maíz amarillo duro, suelo arenoso, fertilidad del suelo, sostenibilidad agrícola.

ABSTRACT

Objective: To evaluate the effect of pig manure and biochar on the initial growth of yellow dent maize (*Zea mays* L.) under sandy soil conditions. **Methodology:** The study was conducted using a randomized complete block design with a split-plot arrangement. The main plot corresponded to the presence or absence of biochar, and the subplot to four levels of pig manure (0, 5, 10, and 15 t ha⁻¹), with three replications. Growth variables such as plant height, stem diameter, and shoot biomass were evaluated, and the data were analyzed using ANOVA and Tukey's test at a 5% significance level. **Results:** The results showed highly significant differences ($p < 0.01$) for the pig manure factor and a significant interaction ($p < 0.05$) between biochar and manure, while the biochar factor alone did not show a statistically significant effect. The greatest corn growth was obtained with the combination of biochar and 15 t ha⁻¹ of manure, demonstrating a synergistic interaction between the two amendments. The presence of biochar improved the efficiency of the manure by reducing nutrient loss and promoting a more gradual release, while the manure provided essential nutrients and improved soil structure. **Conclusion:** The combination of biochar and pig manure is an efficient and sustainable agronomic practice for managing sandy soils, increasing nutrient availability, optimizing water retention, and improving the initial growth of yellow dent corn.

Keywords: biochar, pig manure, yellow dent corn, sandy soil, soil fertility, agricultural sustainability.

INTRODUCCIÓN

El maíz amarillo duro (*Zea mays L.*) es uno de los cultivos de mayor relevancia económica y alimentaria en el Perú, debido a su importancia como insumo principal para la industria avícola, ganadera y agroalimentaria. Según datos del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), la demanda interna de maíz supera ampliamente la producción nacional, lo que obliga a importar grandes volúmenes para abastecer el consumo interno. Sin embargo, la expansión de su cultivo enfrenta serias limitaciones, especialmente en zonas con suelos de baja fertilidad, textura arenosa y escasa capacidad de retención de agua, condiciones características de las regiones costeras del país.

Los suelos arenosos presentan problemas asociados a su baja capacidad de intercambio catiónico, escaso contenido de materia orgánica y alta susceptibilidad a la lixiviación de nutrientes, factores que restringen la productividad agrícola. En estos contextos, la aplicación de enmiendas orgánicas constituye una alternativa viable y sostenible para mejorar la estructura y la fertilidad del suelo. Entre estas, el estiércol de cerdo destaca por su alto contenido de nitrógeno, fósforo y potasio, así como por su capacidad de incrementar la actividad microbiana del suelo y promover el desarrollo radicular de las plantas. No obstante, su uso inadecuado puede generar riesgos ambientales, como la lixiviación de nitratos o la emisión de gases de efecto invernadero, lo que hace necesario su combinación con materiales que regulen su liberación de nutrientes.

El biocarbón (biochar) ha emergido como una enmienda orgánica de interés agronómico y ambiental. Este material carbonoso, obtenido por pirólisis de biomasa bajo condiciones de baja oxigenación, se caracteriza por su alta porosidad, capacidad de adsorción y estabilidad química. Diversas investigaciones internacionales han demostrado que el biocarbón puede mejorar la capacidad de retención de agua, aumentar la disponibilidad de nutrientes y reducir la lixiviación, especialmente en suelos arenosos o degradados. Asimismo, cuando se combina con estiércoles animales, puede potenciar los efectos positivos de ambos materiales, creando un sistema más eficiente para la retención y liberación gradual de nutrientes.

Estudios recientes han reportado que la aplicación conjunta de biocarbón y estiércol de cerdo incrementa significativamente la materia orgánica, la disponibilidad de nitrógeno y fósforo, y la productividad del maíz en suelos de baja fertilidad (Akande et al., 2024). Sin embargo, los efectos de esta interacción varían según el tipo de suelo, la dosis aplicada y las

condiciones climáticas, lo que evidencia la necesidad de realizar investigaciones locales adaptadas a los sistemas de producción peruanos. Particularmente, en los suelos arenosos de la costa central, la combinación de ambos insumos podría ofrecer una alternativa sostenible que mejore la eficiencia del uso de nutrientes y la retención hídrica, favoreciendo así el establecimiento y el crecimiento inicial del cultivo de maíz amarillo duro.

En este contexto, la presente investigación tiene como propósito evaluar el efecto del estiércol de cerdo y del biocarbón en el crecimiento inicial del maíz amarillo duro en condiciones de suelo arenoso, con el objetivo de determinar su influencia sobre las variables de crecimiento vegetal y su potencial como estrategia de manejo sostenible de suelos. La información obtenida permitirá establecer recomendaciones técnicas que contribuyan al desarrollo de sistemas agrícolas más resilientes, sostenibles y económicamente viables en regiones con suelos de baja productividad.

De manera general, este estudio busca generar conocimiento aplicable que beneficie a pequeños y medianos agricultores, promoviendo el aprovechamiento de residuos agropecuarios locales y fortaleciendo la seguridad alimentaria mediante la implementación de prácticas agroecológicas. Además, la investigación aportará evidencia científica sobre la interacción entre el biocarbón y el estiércol en suelos arenosos, contribuyendo al cuerpo teórico del manejo sostenible del suelo y al desarrollo de políticas agrarias orientadas a la sostenibilidad ambiental y la eficiencia productiva.

CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

El maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos estratégicos en América Latina por su alta demanda en la alimentación animal, humana y como materia prima industrial. Sin embargo, su productividad está condicionada por las propiedades del suelo, siendo los suelos arenosos particularmente desafiantes debido a su baja fertilidad, escasa capacidad de retención de agua y nutrientes, y alta vulnerabilidad a la degradación estructural. Estas limitaciones dificultan el establecimiento de cultivos vigorosos en las etapas iniciales, afectando negativamente el rendimiento final.

En este contexto, el uso de enmiendas orgánicas como el estiércol de cerdo y el biocarbón (biochar) ha despertado gran interés por su potencial para mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo, aumentar la eficiencia del uso de nutrientes y promover un desarrollo más saludable de las plantas. Diversas investigaciones han demostrado que la aplicación conjunta de biochar y estiércol de cerdo puede mejorar significativamente la materia orgánica del suelo, la retención de agua, la disponibilidad de nutrientes y la productividad del maíz en suelos degradados o pobres en nutrientes (Akande et al., 2024).

En suelos arenosos, esta combinación ha mostrado efectos positivos en la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio, elementos esenciales para el crecimiento del maíz, así como en la mejora de la capacidad de intercambio catiónico y reducción de la acidificación del suelo (Gondek & Mierzwa, 2016; Gondek et al., 2018). No obstante, aún existe un vacío en la investigación específica sobre su aplicación directa en cultivos de maíz en condiciones de suelos arenosos en la región latinoamericana, lo cual genera incertidumbre sobre su efectividad agronómica y económica en dichos contextos.

Adicionalmente, el estiércol de cerdo, aunque rico en nutrientes, puede representar un riesgo ambiental si no se gestiona adecuadamente, debido a la emisión de gases de efecto invernadero y lixiviación de nitratos. La incorporación de biocarbón actúa como agente inmovilizador de nutrientes y contaminantes, reduciendo la volatilización de amonio y mejorando la eficiencia en la utilización de nitrógeno (Ayaz et al., 2021).

En términos de desarrollo vegetal, varios estudios han demostrado que la mezcla de biochar con estiércol animal puede aumentar significativamente la altura de las plantas, la biomasa seca y el rendimiento de grano de maíz, especialmente bajo condiciones adversas como suelos arenosos o contaminados (Liu et al., 2021; Uzoma et al., 2011).

Sin embargo, también se han reportado variaciones en la respuesta del cultivo dependiendo del tipo de biochar, temperatura de pirólisis, dosificación y tipo de estiércol, lo cual resalta la necesidad de realizar estudios específicos para cada agroecosistema (Gascó et al., 2016; Khademalrasoul et al., 2014).

Por lo tanto, es urgente desarrollar investigaciones locales que evalúen el efecto combinado del estiércol de cerdo y el biocarbón en el crecimiento inicial del maíz en suelos arenosos, con el fin de generar información técnica confiable que sirva de base para prácticas agrícolas más sostenibles, eficientes y adaptadas a las condiciones edafoclimáticas específicas de cada región.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cuál es el efecto del estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón en el crecimiento inicial del cultivo de maíz amarillo duro?

1.2.2 Problemas específicos

- a) ¿Cómo influye el estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón en las características morfológicas del cultivo de maíz amarillo duro?
- b) ¿Cómo influye el estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón en la producción de materia fresca y seca en el cultivo del maíz amarillo duro?
- c) ¿Cómo influye el estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón en el contenido de clorofila del cultivo de maíz amarillo duro?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el efecto del estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón en el crecimiento inicial del cultivo de maíz amarillo duro

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Analizar el efecto del estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón en las características morfológicas del cultivo de maíz amarillo duro.
- b) Analizar el efecto del estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón en la producción de materia fresca y seca en el cultivo del maíz amarillo duro.
- c) Analizar el efecto del estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón en el contenido de clorofila del cultivo de maíz amarillo duro.

1.4 Justificación de la investigación

Conveniencia

La producción de maíz amarillo duro es fundamental para la seguridad alimentaria, especialmente como insumo para la industria avícola, ganadera y alimenticia. No obstante, su cultivo en suelos arenosos representa un desafío por su baja fertilidad y escasa retención de agua. Este estudio responde a la necesidad de identificar tecnologías sostenibles que mejoren la productividad de cultivos en suelos marginales mediante el uso de insumos orgánicos de bajo costo y origen local, como el estiércol de cerdo y el biocarbón.

Relevancia social

El uso de estiércol de cerdo y biocarbón no solo propone un mejor manejo de residuos agropecuarios, sino que también representa una solución accesible para pequeños agricultores, promoviendo la agricultura sustentable y la soberanía alimentaria. Los resultados podrían ser replicables en zonas rurales con suelos pobres, contribuyendo a mejorar la rentabilidad agrícola y el bienestar socioeconómico de comunidades campesinas.

Implicaciones prácticas

Este estudio generará evidencia sobre el impacto agronómico de la combinación de biocarbón y estiércol de cerdo en las etapas iniciales del maíz. Permitirá establecer dosis adecuadas y prácticas eficientes para optimizar el uso de recursos orgánicos en suelos arenosos. Además, sus resultados podrán ser usados por extensionistas, agrónomos y formuladores de políticas en la promoción de enmiendas orgánicas sostenibles.

Valor teórico

Desde el punto de vista científico, la investigación aporta a la comprensión de las interacciones fisicoquímicas entre el biocarbón, la materia orgánica del estiércol y las propiedades del suelo. También contribuye al cuerpo teórico sobre el manejo sustentable de suelos pobres, siendo relevante para disciplinas como la edafología, la agronomía ecológica y la agroecología.

Utilidad metodológica

La metodología planteada puede ser adaptada para investigaciones futuras con diferentes cultivos, tipos de suelos y combinaciones de enmiendas. Servirá como referencia para estudios comparativos y validación de tecnologías sostenibles de fertilización orgánica, en el marco del manejo integral de suelos.

1.5 Delimitación del estudio

Delimitación espacial

La investigación se llevó a cabo en la Irrigación Santa Rosa-Sayán, en un suelo de textura arenosa, representativo de zonas agrícolas con problemas de baja retención de nutrientes y agua.

Delimitación temporal

El estudio se desarrolló entre los meses de mayo a agosto del año 2025.

Delimitación de contenido

El estudio se centró en evaluar el efecto combinado del estiércol de cerdo y el biocarbón sobre variables de crecimiento inicial del maíz amarillo duro: altura de planta, número de hojas, biomasa aérea y desarrollo radicular y contenidos de clorofilas (a y b).

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedentes internacionales

Akande et al. (2024) llevaron a cabo una investigación para evaluar cómo el biocarbón (B) y el estiércol de cerdo (PM) afectaban las propiedades químicas del suelo, el crecimiento y el rendimiento del maíz durante dos años. Para ello, adoptaron un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones, y el suelo lo enmendaron con biocarbón y estiércol de cerdo a dos dosis (15 y 30 t ha^{-1}): biocarbón (B15 y B30), estiércol de cerdo (PM15 y PM30), biocarbón con estiércol de cerdo (BPM15 y BPM30), respectivamente, y control. Observaron que la incorporación de biocarbón y estiércol de cerdo juntos a 15 y 30 t ha^{-1} mejoró el carbono orgánico (COS), el nitrógeno total (TN) y el fósforo disponible (AP) del suelo en comparación con el control. Asimismo, apreciaron que el aprovechamiento individual de estiércol de cerdo a 15 y 30 t ha^{-1} disminuyó significativamente en comparación con su combinación en COS, TN y AP; que el uso combinado de biocarbón y estiércol de cerdo a 15 t ha^{-1} aumentó significativamente en comparación con la adición solitaria de biocarbón en COS, TN y AP; que la aplicación de enmiendas orgánicas aumentó significativamente la altura de la planta, el rendimiento de materia seca y el rendimiento de grano en ambos años. Los autores concluyen que el uso de biocarbón y estiércol de cerdo por separado o juntos ofrece un gran potencial para mejorar la fertilidad del suelo y aumentar la productividad de los cultivos en los suelos.

Ayaz et al. (2021) examinaron el efecto del biocarbón derivado del digestato de estiércol de cerdo como enmienda del suelo (15 t ha^{-1}) con fertilizante de N (180 kg ha^{-1}) sobre los niveles de metales pesados del suelo y las plantas y la disponibilidad de nutrientes bajo varios regímenes de humedad (humedad óptima $\sim 15\%$, condición de sequía $\leq 5\%$ y condición de inundación $\geq 35\%$ en peso). Observaron que las aplicaciones de biocarbón disminuyeron significativamente los metales pesados en las plantas de trigo de primavera, disminuyendo el Cr en un 90%, el Ni en un 50%, el Cd en un 9% y el Pb en un 34% en comparación con los tratamientos sin biocarbón (control); sin embargo, el biocarbón derivado del digestato de cerdo aumentó los metales pesados en el suelo bajo todos los regímenes de humedad, aumentando el Cr del suelo en un 21%, el Ni en un 43%, el Cu en un 55%, el Zn en un 70% y el Pb en un 12%. La disponibilidad de macroelementos también aumentó con las

aplicaciones de biocarbón bajo los regímenes óptimos de humedad tanto en el suelo como en las plantas, aumentando el Mg^{2+} en un 11%, P en un 4%, K en un 50% y Ca^{2+} en un 56% en el suelo, y Mg^{2+} en un 13%, P en un 69%, K en 29 y Ca^{2+} en un 39% en plantas. Señalan que la adición de biocarbón también mejoró los niveles de fluorescencia de clorofila (CF) en el cultivo durante toda la temporada y los contenidos de biomasa y materia seca de los cultivos aéreos aumentaron. En consecuencia, concluyen que el uso de biocarbón derivado del digestato de estiércol de cerdo con fertilizante N en condiciones normales de humedad pudo reducir la disponibilidad de metales pesados para las plantas y, por lo tanto, pudo usarse en suelos contaminados para mantener un mejor crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Gondek & Mierzwa (2016) sostuvieron que el biocarbón se puede utilizar para aliviar los efectos de la contaminación del suelo con compuestos orgánicos e inorgánicos, y para ello plantearon su investigación con el objetivo de evaluar el efecto del estiércol de cerdo y la cama de aves de corral, así como de los biocarbones producidos a partir de estos materiales a una temperatura de 300 °C sobre los contenidos de Cu, Cd, Pb y Zn en formas móviles y ligadas a materia orgánica en el suelo. La investigación lo llevaron a cabo en condiciones de laboratorio. Para ello, los materiales se introdujeron en suelos arenosos ácidos en dosis de 0.5, 1.0 y 2.0% p/p. encontraron que la aplicación de biocarbón derivado del estiércol de cerdo (BPM) y biocarbón derivado de la cama de aves (BPL), dependiendo de la cantidad agregada, redujo la movilidad del cobre del 28 al 69%, del 77 al 100% en el caso del cadmio, del 94 al 99% en el caso del plomo y del 15 al 97% en el caso del zinc. La enmienda del 2% de estiércol de cerdo (PM) y cama de aves de corral (PL) provocó un aumento en el contenido de Cu extraído con NH_4NO_3 en comparación con el tratamiento control. Una situación similar observaron en el caso del zinc después de la aplicación de enmiendas de 0,5 y 1% de estiércol de cerdo (PM). Contenidos de Cu, Cd, Pb y Zn extraídos con 0,025 mol $C_{10}H_{22}N_4O_8$ fueron mayores que los contenidos de estos elementos extraídos con 1 M de NH_4NO_3 , principalmente debido a la diferente fuerza de extracción de los extractantes. Los resultados obtenidos, según los autores, indican que, en comparación con el contenido determinado en el suelo a partir del tratamiento testigo, las enmiendas al suelo al 1 y 2% de los materiales no convertidos y convertidos térmicamente tuvieron un mayor efecto sobre los contenidos de Cu, Pb y Zn en la fracción ligada a la materia orgánica que la enmienda al 0.5%; y que los materiales orgánicos aplicados no afectaron el contenido de cadmio en la fracción ligada a la materia orgánica.

Uzoma et al. (2011) investigaron el efecto del biocarbón de estiércol de vaca sobre el rendimiento de maíz, la absorción de nutrientes y las propiedades físico-químicas de un suelo arenoso de tierras secas. El biocarbón lo obtuvieron a partir de estiércol de vaca seco pirolizado a 500 °C, y posteriormente se mezcló con un suelo arenoso a una tasa equivalente a 0, 10, 15 y 20 t de biocarbón por hectárea. Utilizaron el maíz como cultivo de prueba. Según los autores, los resultados del estudio indicaron que el biocarbón de estiércol de vaca contiene algunos nutrientes importantes para las plantas que afectaron significativamente el crecimiento del cultivo de maíz. Observaron que el rendimiento de maíz y la absorción de nutrientes mejoraron significativamente con el aumento de la tasa de mezcla de biocarbón. La aplicación de biocarbón a dosis de mezcla de 15 y 20 t ha⁻¹ aumentó significativamente el rendimiento de grano de maíz en un 150 y un 98% en comparación con el control, respectivamente. La eficiencia en el uso neto del agua del maíz aumentó en 6, 139 y 91% en comparación con el control, con una tasa de mezcla de 10, 15 y 20 t ha⁻¹, respectivamente. La absorción de nutrientes por el grano de maíz aumentó significativamente con mayores aplicaciones de biocarbón. La aplicación de biocarbón de estiércol de vaca mejoró la conductividad hidráulica saturada del suelo arenoso en el campo, como resultado, también aumentó el WUE neto. Los resultados del análisis de suelo después de la cosecha indicaron un aumento significativo en el pH, C total, N total, Olsen-P, cationes intercambiables y capacidad de intercambio catiónico. Los resultados de este estudio indicaron que la aplicación de biocarbón de estiércol de vaca en suelos arenosos no solo es beneficiosa para el crecimiento de los cultivos, sino que también mejoró significativamente las propiedades físico-químicas del suelo grueso.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Peña (2023), con el objetivo de evaluar el efecto del efluente líquido porcino en el crecimiento inicial del maíz para forraje y la distribución de la materia seca y contenido de nutrientes en condiciones del valle de Huaura, condujo un experimento bajo el diseño completamente al azar con seis tratamientos y cinco repeticiones. Los tratamientos, en base a dosis al efluente líquido porcino fueron: T0: 0; T1: 9,45; T2: 18,90; T3: 28,35; T4: 37,80; y T5: 47,25 m³ ha⁻¹, respectivamente. Evaluó longitud radicular, altura de planta, diámetro de tallo, peso fresco de raíces y follaje, volumen radicular, peso seco de raíces y follaje. Como resultados observó que el incremento en las dosis de aplicación del efluente líquido porcino influyó en la obtención de mayores valores para el conjunto de características

evaluadas, por lo que la autora concluye que las aplicaciones del efluente líquido porcino en sus distintas dosis influyeron en mejores respuestas en el crecimiento inicial del maíz.

Leveau et al. (2021) plantearon su investigación con el objetivo de evaluar el efecto de la aplicación de biocarbón en el rendimiento de maíz y el balance de nitrógeno en suelos (Entisoles con deposición aluvial) en San Ramón (Perú). Produjeron biocarbón a partir de residuos verdes y estiércol de cerdo. Su investigación consideró cinco tratamientos: control (T1), 7 t·ha⁻¹ de estiércol de cerdo (T2), 17.5 t·ha⁻¹ de biocarbón (T3), 23 t·ha⁻¹ de biocarbón con ajuste de pH (T4), y 17.5 t·ha⁻¹ de biocarbón con ajuste de pH y de relación C/N (T5). Sus resultados demostraron que los tratamientos T1 y T2 obtuvieron los rendimientos de maíz más bajos, con una producción promedio de 0.41 y 2.45 t·ha⁻¹, respectivamente; que el tratamiento T5 produjo el mayor rendimiento de maíz alcanzando una producción de 5.71 t·ha⁻¹. Sólo encontraron diferencia significativa en el rendimiento de los tratamientos T1 y T5 ($p = 0.011$). Los porcentajes de eficiencia de uso del nitrógeno (EUN), definida como el porcentaje de N aplicado que estaba disponible para ser absorbido por el cultivo o retenido en el suelo, fueron mayores para los tratamientos T3, T4 y T5 con 28, 28 y 56% de eficiencia, respectivamente, en comparación a los tratamientos T1 y T2. Asimismo, los tratamientos con biocarbón T3, T4 y T5 produjeron menores pérdidas de nitrógeno en comparación con los tratamientos T1 y T2. Los autores concluyen que las enmiendas con biocarbón tienen efectos positivos en el rendimiento del cultivo del maíz mientras limitan la pérdida de nitrógeno.

Moreno y Cadillo (2018), desarrollaron la investigación con el objetivo de evaluar las bondades del estiércol porcino sólido como abono orgánico, y medido a través del rendimiento forrajero, valor nutricional de la planta, propiedades fisicoquímicas del suelo post cosecha, costo de producción y beneficio neto del maíz chala. Para ello, plantearon tres tratamientos: fertilizante químico (Control, T1), estiércol sólido (T2) y fertilizante químico + estiércol sólido (T3). Utilizaron el Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA). Encontraron que los mayores valores se obtuvieron con el tratamiento T2 con 1,08 kg de peso fresco por planta y 73,8 t ha⁻¹, 5 t más que el tratamiento T1. El mayor valor nutricional de la planta lo obtuvieron con el tratamiento T3, 10,5 % proteína cruda, 1,6 % grasa, 25,4 % fibra cruda y 54,8 % fibra detergente neutra. Indican que las mejores propiedades fisicoquímicas del suelo post cosecha lo obtuvieron con el tratamiento T2, 2,56 % materia orgánica, 59,4 ppm fósforo y 230 ppm potasio. La mayor rentabilidad de la producción de

forraje lo obtuvieron con el tratamiento T2, S/ 3,858.60 de costo de producción y S/ 4,270.40 de beneficio neto por hectárea.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 El cultivo del maíz amarillo

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos más relevantes a nivel mundial, tanto por su volumen de producción como por su versatilidad de uso en alimentación humana, forrajera e industrial. En el caso de Perú, una de sus variantes más importantes es el maíz amarillo duro (MAD), que cumple un papel central en la industria de alimentos balanceados (aves, cerdos) y en las zonas costeras y de selva. Por ejemplo, Chávez et al, (2022) indica que en Perú aproximadamente el 50 % de la superficie sembrada de maíz corresponde al MAD, mientras que el otro 50 % corresponde al maíz altoandino, subrayando su demanda en el sector pecuario (Chávez et al, 2022).

En el contexto peruano, el maíz amarillo duro se ha consolidado como un cultivo estratégico desde el punto de vista económico y productivo. Según un reporte reciente, el cultivo de MAD registró en la campaña agrícola 2024 superficies sembradas alrededor de 207 000 hectáreas, lo que representa una leve disminución del 1,2 % respecto al promedio de las últimas cinco campañas, pero mantiene su relevancia en la matriz agrícola nacional (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego [MIDAGRI], 2025). Esta magnitud demuestra que el MAD no solo está presente en los valles costeros del país (por ejemplo en los departamentos de Piura, Lambayeque, La Libertad, Áncash, Lima y Arequipa), sino que también avanza en las zonas de selva, lo cual refleja su adaptabilidad a diferentes condiciones agroecológicas (Agraria .pe, 2025).

Desde el punto de vista agroecológico, el cultivo de maíz amarillo duro en el Perú encuentra desafíos y oportunidades específicas. Las zonas costeras ofrecen suelos arenosos o ligeramente francos, con limitaciones de retención de agua y de nutrientes, lo que demanda tecnología de manejo de suelos, fertilización adecuada y genotipo adaptado al ambiente. Al respecto, Alache (2020) señala que el MAD en regiones costeras y valles bajos del Perú representa “fuente principal para la alimentación de aves en la crianza de pollos y otras especies animales” y está destinado al grano seco, no al maíz choclo o tierno (Alache, 2020).

Esto señala que su producción se orienta principalmente hacia el uso industrial, más que al consumo directo como choclo.

La importancia económica del MAD es también destacable. Según Bravo et al, (2019), la producción nacional del cultivo de MAD alcanzaba 277 000 hectáreas en determinado momento, y en 2018 la cifra fue de 256 163 ha, lo que evidencia que una parte considerable de la demanda del grano debe cubrirse mediante importaciones, pese al esfuerzo productivo interno. Esto evidencia un reto de competitividad para los productores nacionales y la necesidad de estrategias de mejora de productividad, semillas mejoradas, técnicas agrícolas adaptadas, manejo de fertilidad del suelo y control de plagas y enfermedades.

Finalmente, en cuanto al establecimiento del cultivo, su desarrollo inicial (sembrado/emergencia) y toda la fase de crecimiento vegetativo, el maíz amarillo duro requiere suelos bien estructurados, con buena disponibilidad de nutrientes y agua, ya que sus raíces pueden alcanzar profundidad, y los ambientes con limitadas reservas requieren enmiendas y buenas prácticas agronómicas. En suelos arenosos, como muchos de los valles costeros del Perú, las limitaciones de retención hídrica y de materia orgánica hacen que el uso de fertilización y enmiendas orgánicas (como el estiércol, o mejoradores de suelo) sea crítico para lograr buenos rendimientos.

2.2.2 Características de los suelos arenosos

Los suelos arenosos constituyen un reto importante para la agricultura debido a sus características físicas, químicas y biológicas particulares. Por definición, estos suelos se caracterizan por un contenido elevado de arena (habitualmente más del 50 % en la fracción gruesa) y bajo contenido de arcilla (menos del 20 %) hasta al menos los primeros 30 cm de profundidad. (Huang y Hartemink, 2020). Esta alta proporción de partículas gruesas conlleva una estructura muy porosa, lo que impacta directamente en la capacidad de retención de agua, el movimiento de los nutrientes y la estabilidad agregada del suelo.

Una de las principales limitaciones de los suelos arenosos es su baja retención de agua. La gran porosidad y el rápido drenaje hacen que el agua infiltrada sea rápidamente movilizad, lo cual limita la disponibilidad de humedad para las raíces de los cultivos. Así, la capacidad de almacenaje de humedad utilizable es reducida, lo que incrementa la susceptibilidad del cultivo a estrés hídrico (Musei et al., 2024). Además, estos suelos presentan baja capacidad

de intercambio catiónico (CIC) y baja materia orgánica, lo que resulta en una limitada capacidad para retener nutrientes esenciales como N, P y K y mantener una fertilidad sostenida (Alghamdi et al., 2023). En efecto, se ha observado que los suelos con bajo contenido de arcilla y materia orgánica poseen menor protección de la materia orgánica frente a mineralización, menor formación de agregados y, por ende, menor estabilidad estructural (Alghamdi et al., 2023).

Desde la perspectiva química, los suelos arenosos suelen presentar pH relativamente más alto, dependiendo del material parental, y pueden contener mayores niveles de carbonatos (CaCO_3), lo cual puede afectar la disponibilidad de ciertos nutrientes, como el fósforo, que tiende a quedar fijado. Otros aspectos críticos incluyen la alta lixiviación de nutrientes dada la rapidez con la que el agua percola, lo que reduce la eficiencia del fertilizante aplicado y puede incrementar riesgos ambientales de contaminación por nitratos en zonas con riego o lluvias intensas (Musei et al., 2024).

En términos de estructura física, la agregación débil y la escasa cohesión de partículas se traducen en suelos que fácilmente pierden materia orgánica, son vulnerables a la erosión eólica o hídrica, y tienen una menor capacidad de anclaje de las raíces. Al respecto, Kheoruenromne y colaboradores (1998) evidenciaron en su estudio sobre suelos arenosos de la meseta nordeste de Tailandia que dicha combinación de baja capacidad de retención de agua y rápida infiltración constituye una limitación agronómica significativa.

Otro elemento clave es la actividad biológica reducida: la menor humedad disponible y el escaso contenido de materia orgánica conducen a una microbiota del suelo menos dinámica, con menor descomposición de residuos y menor formación de agregados estables, lo que a su vez afecta la nutrición de las plantas y la protección frente a estrés abiótico (Alghamdi et al., 2023). Por tanto, los suelos arenosos requieren un manejo más intensivo en términos de enmiendas orgánicas, prácticas de conservación del suelo y estrategias de fertilización que modulen la rápida pérdida de nutrientes y mejoren la retención de agua.

Cabe destacar que, si bien estos suelos presentan limitaciones, no son improductivos per se; más bien requieren intervenciones agronómicas adaptadas. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), los suelos arenosos tienen un gran potencial agrícola en ciertas regiones, pero su explotación exige mejorar la fertilidad y la gestión hídrica (FAO, n.d.). Por ejemplo, aumentar el contenido de materia orgánica

mediante compost, estiércol o biocarbón (biochar) ha demostrado mejoras significativas en la capacidad de retención hídrica y de nutrientes, así como en la estabilidad estructural del suelo (Musei et al., 2024; Alghamdi et al., 2023).

En el contexto de la investigación, en suelos arenosos de la costa peruana, estas características adquieren relevancia: el bajo contenido de materia orgánica, la alta tasa de lixiviación y la limitada retención de agua son retos que deben ser abordados mediante enmiendas como estiércol de cerdo o biocarbón para mejorar la fertilidad y el crecimiento del cultivo de maíz. Conocer en profundidad el comportamiento de estos suelos permite justificar la necesidad del uso de tales enmiendas y fundamenta la relevancia de estudiar su efecto interactivo.

2.2.3 Estiércol de cerdo como enmienda orgánica

El estiércol de cerdo constituye una enmienda orgánica de gran valor agronómico, especialmente en suelos de baja fertilidad o con textura arenosa, debido a su contenido relativamente alto en nutrientes esenciales y materia orgánica. Al incorporar estiércol de cerdo al suelo, se aporta nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y otros elementos menores como magnesio (Mg) y microminerales, lo cual puede mejorar tanto la fertilidad como las propiedades físicas, químicas y biológicas del sustrato. Por ejemplo, Lemos et al. (2025) señalan que el estiércol de cerdo aporta macronutrientes y micronutrientes que favorecen la productividad de los cultivos cuando se gestiona adecuadamente.

Desde el punto de vista fertilizante, una revisión realizada por Choudhary (1996), resalta que el estiércol de cerdo no sólo mejora la fertilidad del suelo, sino también el rendimiento de los cultivos, bajo condiciones agronómicas variadas. Más recientemente, Yost et al. (2022) evidenciaron que la aplicación de estiércol porcino tiene un potencial significativo para aumentar el carbono orgánico del suelo, la materia orgánica del suelo y la actividad microbiana del suelo.

En cuanto a las propiedades físicas del suelo, el estiércol de cerdo contribuye a la mejora de la estructura del suelo al incrementar la agregación, reducir la densidad aparente y mejorar la retención de humedad. Por ejemplo, Głab y Gondek (2009) observaron que la aplicación de estiércol de cerdo y otros residuos orgánicos modificó la distribución de macroporos en un Gleysol, aunque en ese caso la macroporosidad disminuyó en ciertas fracciones. Esto

indica que el efecto depende de la tasa de aplicación, del tipo de suelo y del estado previo del suelo.

Químicamente, el estiércol de cerdo aporta nutrientes de liberación relativamente más rápida que algunos materiales de carbono muy estabilizado, lo que puede traducirse en una mejora del suministro nutritivo a corto plazo. No obstante, también es necesario considerar que, en texturas arenosas, la eficiencia de estos nutrientes puede verse limitada por una alta lixiviación y por una capacidad de retención de nutrientes baja, por lo que la gestión debe ser cuidadosa.

El uso del estiércol de cerdo también tiene implicaciones para la microbiología del suelo: incrementa la actividad microbiana, lo cual favorece la mineralización de materia orgánica, la disponibilidad de nutrientes y la ciclicidad biológica del suelo (Yost et al., 2022). Esta mejora de la microbiota es especialmente relevante en suelos arenosos, que suelen ser más pobres en materia orgánica y en vida edáfica.

Sin embargo, también es importante considerar los riesgos o limitaciones asociados al uso de estiércol de cerdo. Entre ellos se hallan la potencial acumulación de metales pesados, la emisión de gases de efecto invernadero (como CH₄, N₂O) y la necesidad de manejo adecuado para evitar pérdidas de nitrógeno por volatilización o lixiviación. En arrozales, Wu et al. (2022) encontraron que la aplicación de estiércol de cerdo incrementó emisiones de metano, aunque no necesariamente comprometió la diversidad de arqueas del suelo. Por tanto, en suelos de textura arenosa, donde las pérdidas por lixiviación son particularmente elevadas, es imprescindible ajustar las dosis, tiempos de aplicación y adoptar buenas prácticas de manejo para maximizar beneficios y minimizar impactos.

En el contexto peruano, la utilización de estiércol de cerdo representa una alternativa relevante hacia una fertilización más sostenible. Dada la naturaleza de muchos suelos costeros arenosos del Perú —con baja materia orgánica y alta tasa de lixiviación— el aporte de estiércol puede mejorar la fertilidad inicial, estimular la microbiología del suelo y favorecer el establecimiento de cultivos como el maíz amarillo duro. No obstante, la estrategia debe contemplar su integración con otras enmiendas o prácticas (como el uso de biocarbón, cultivos de cobertura, rotación) para consolidar mejoras a mediano y largo plazo.

2.2.4 Biocarbón (biochar) y sus beneficios en el suelo

El biocarbón, también conocido como biochar, es un material carbonoso generado por la pirólisis de biomasa en condiciones de bajo oxígeno, que ha emergido como una enmienda del suelo prometedora para mejorar tanto la fertilidad como la calidad edáfica, especialmente en suelos con limitaciones, como los suelos arenosos. Según un reciente meta-análisis, la aplicación de biocarbón en suelos ácidos, arenosos o con bajo contenido de carbono orgánico incrementó de forma significativa la biomasa microbiana del suelo (Kabir et al., 2023).

Desde la perspectiva de la estructura física del suelo, el biocarbón ha mostrado mejorar varias propiedades que son críticas en suelos de textura gruesa. Una revisión sobre 22 suelos distintos evidenció que la adición de biochar redujo la densidad aparente entre un 3 % y 11 %, y aumentó la porosidad en rangos de 1 % a 64 % (Lehmann & Joseph, 2015). Otro estudio señala que, en suelos arenosos, al aplicar aproximadamente 20 % de biocarbón, la capacidad de retención de agua casi se duplicó, lo que resulta altamente relevante en regiones donde la infiltración rápida y la pérdida de humedad limitan el crecimiento de cultivos (Hoque et al., 2022).

Químicamente, el biocarbón contribuye a incrementar la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, facilitar la retención de nutrientes y reducir las pérdidas por lixiviación. Según la revisión de Bekchanova et al. (2024), en suelos arenosos la mejora de fertilidad mediante biochar es más evidente precisamente donde la materia orgánica y los nutrientes disponibles eran inicialmente bajos (Bekchanova et al., 2024).

En el plano biológico, la porosidad y la gran superficie específica del biocarbón le permiten albergar microorganismos beneficiosos, estimular la actividad enzimática y favorecer la formación de agregados microbianos estables. Una revisión concluye que el biochar mejora la densidad microbiana del suelo, la actividad microbiana vinculada al ciclo del nitrógeno y la disponibilidad de nutrientes a las plantas (Allohverdi et al., 2021).

Desde un enfoque agronómico-ambiental, el biocarbón tiene el potencial adicional de actuar como sumidero de carbono a largo plazo. Su alta estabilidad estructural hace que parte del carbono incorporado permanezca en el suelo durante décadas o incluso siglos, lo que lo convierte en una herramienta de mitigación del cambio climático además de mejorar la productividad agrícola (Lehmann y Joseph, 2015).

No obstante, es importante señalar que la eficacia del biocarbón depende de múltiples factores: la materia prima utilizada, la temperatura de pirólisis, la tasa de aplicación, el tipo de suelo, y las condiciones climáticas. Como señalan Kabir et al. (2023), el material obtenido a temperaturas de pirólisis de entre 350-550 °C y con baja relación C/N resultó más efectivo en incrementar la biomasa microbiana. Asimismo, en suelos arenosos, la mejora es más destacada cuando el suelo tiene bajo contenido orgánico inicial, lo cual coincide con la realidad de muchos suelos costeros en el Perú.

En el contexto específico de los suelos arenosos, típicos de las zonas costeras peruanas, el biocarbón presenta ventajas particulares. Su alta porosidad ayuda a retener agua en un mediano plazo, mitigando el rápido drenaje característico de este tipo de suelos; su capacidad de adsorción de nutrientes disminuye la lixiviación y por tanto mejora la eficiencia de fertilizantes; y su efecto sobre la microbiología y estructura del suelo puede favorecer el enraizamiento y crecimiento inicial de cultivos exigentes como el maíz amarillo duro. De este modo, la incorporación de biocarbón puede ser una estrategia relevante para mejorar producción y sostenibilidad en sistemas agrícolas con limitaciones edáficas.

2.2.5 Interacción entre biocarbón y estiércol de cerdo

La interacción entre el biocarbón (biochar) y el estiércol de cerdo representa una combinación estratégica de enmiendas orgánicas que puede generar beneficios sinérgicos para la fertilidad del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento de los cultivos, especialmente en suelos con limitaciones como los suelos arenosos. Esta sinergia se produce porque cada enmienda aporta mecanismos complementarios: el estiércol de cerdo aporta materia orgánica fácilmente mineralizable y nutrientes esenciales en formas relativamente disponibles, mientras que el biocarbón ofrece una matriz estable, altamente porosa, que mejora el almacenamiento de agua, reduce las pérdidas de nutrientes por lixiviación y crea hábitats favorables para la actividad microbiana (Ali et al., 2025).

Diversos estudios han documentado que cuando se aplica biocarbón junto con estiércol o con otros residuos orgánicos animales, los efectos sobre rendimiento de cultivos, retención de nutrientes y mejora del suelo son superiores respecto a la aplicación individual de cada enmienda. Por ejemplo, una revisión reciente señala que la integración de biochar con fertilizantes orgánicos como estiércoles potencia las propiedades del rizosfera, las actividades enzimáticas y la eficiencia en el uso de nutrientes, gracias al efecto estabilizante

del biochar que reduce la pérdida de nutrientes liberados por la mineralización del estiércol (Ali et al., 2025).

En particular, estudios han mostrado que el contenido en carbono orgánico del suelo, la biomasa microbiana y la eficiencia en el uso del nitrógeno pueden incrementarse cuando el biocarbón se utiliza como soporte o co-enmienda con estiércol animal. Por ejemplo, Rehman et al. (2020) indicaron que el biochar derivado de estiércol aumentó la capacidad del suelo de retener humedad y mejoró el rendimiento de los cultivos en regiones áridas, lo que sugiere que el efecto del estiércol se ve potenciado por la presencia de biochar. Esto abre una vía para su uso combinado en entornos con suelos arenosos, donde la lixiviación y la escasa materia orgánica limitan la productividad.

Cabe destacar que la eficacia de esta interacción depende de diversos factores clave: la tasa de aplicación de cada enmienda, el tipo de biocarbón (materia prima, temperatura de pirólisis, textura), el tipo de estiércol (edad, composición, tratamiento previo) y las condiciones del suelo (textura, pH, materia orgánica inicial). En suelos arenosos, con baja capacidad de retención de agua y nutrientes, el papel del biocarbón como estabilizador de nutrientes liberados por el estiércol se vuelve aún más crítico, evitando que éstos se pierdan por lixiviación antes de ser absorbidos por las raíces de los cultivos.

Además de favorecer la nutrición vegetal, la combinación biocarbón–estiércol tiene implicaciones para la sostenibilidad del sistema agrícola. Al mejorar la retención de agua, disminuir la pérdida de nutrientes y aumentar la actividad microbiana, esta combinación puede reducir la necesidad de fertilizantes minerales, disminuir emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del suelo en el largo plazo. Por ejemplo, Han et al. (2023) hallaron que la adición de biochar incrementó la eficiencia en el uso del nitrógeno (NUE) en un 13,97 % y el rendimiento de los cultivos en un 14,45 % en una evaluación global; aunque este estudio no se centró exclusivamente en estiércol de cerdo, refuerza la idea de que enmiendas que mejoran la eficiencia de nutrientes pueden combinarse para lograr efectos más amplios.

No obstante, es importante considerar que la interacción no siempre es automáticamente positiva o lineal. Algunos estudios han reportado efectos neutros o incluso negativos cuando las tasas de aplicación son muy altas o cuando los materiales no están adecuadamente estabilizados. Por ejemplo, Jaufmann et al. (2025) indicaron que en algunos experimentos el

biochar puro o co-compostado no aumentó el rendimiento de forma significativa e incluso lo redujo en los primeros años debido a efectos de inmovilización de nitrógeno. Esto resalta que, aunque la combinación de biocarbón y estiércol de cerdo tiene gran potencial, debe ser cuidadosamente diseñada según contexto agronómico.

En el contexto de suelos arenosos de la costa peruana, esta interacción tiene especial relevancia. Debido a la baja materia orgánica, alta lixiviación y escasa retención hídrica de estos suelos, la aplicación conjunta de estiércol de cerdo (que aporta nutrientes) y biocarbón (que retiene agua y nutrientes) podría constituir una estrategia altamente efectiva para mejorar el crecimiento inicial del cultivo de maíz amarillo duro. La sinergia entre ambos podría permitir una mejor eficiencia de la enmienda orgánica, una liberación más gradual del nutriente y una mejora de las propiedades físicas del suelo, favoreciendo el establecimiento, la altura de planta y la salud radicular del cultivo.

2.3 Definición de términos básicos

Abono orgánico: Un abono en general se considera aquel material que se aplica al suelo y estimula el crecimiento de las plantas de manera indirecta, a través de la mejora de las propiedades físicas del suelo. Se considera orgánicos cuando estos son provenientes de residuos orgánicos, como los estiércoles de diferentes especies de animales, los biosólidos, los residuos de cosecha y las compostas pueden considerarse como abonos y también como fertilizantes orgánicos (Salazar et al., 2003).

Enmienda orgánica: Sustancia de origen vegetal o animal que se incorpora al suelo para mejorar su fertilidad, estructura o actividad biológica (Scotti, 2015).

Capacidad de intercambio catiónico (CIC o CEC): Medida de la capacidad de un suelo para retener cationes (iones con carga positiva) en sus partículas y ponerlos a disposición de las plantas.

Materia orgánica del suelo (MOS): Fracción del suelo constituida por restos vegetales y animales en distintos estados de descomposición, que influye en la estructura, fertilidad y actividad biológica del suelo (Parvej et al, 2023).

Retención de agua del suelo: Habilidad del suelo para mantener agua que pueda ser aprovechada por las raíces de las plantas, vinculada a su textura, estructura y contenido de materia orgánica (Ouyang, et al., 2022).

Lixiviación: Proceso por el cual los nutrientes o contaminantes disueltos en el agua son arrastrados hacia capas más profundas del suelo o al agua subterránea, reduciendo la disponibilidad para las plantas (Van, 2018).

Textura del suelo: Proporción de arena, limo y arcilla en un suelo, lo que determina propiedades físicas como porosidad, retención de agua y capacidad de intercambio.

Biol: El biol es un abono orgánico de consistencia líquida que se produce en un biodigestor a partir de la fermentación del estiércol de animales y de residuos vegetales, este producto se emplea actualmente como un abono foliar, el cual promueve el desarrollo y crecimiento saludable de diversos cultivos (Gil et al., 2023).

Tasa agronómica: Es la tasa de aplicación de biosólido al suelo, considerando la provisión de nutrientes como nitrógeno, fósforo o micronutrientes requeridos para el cultivo o vegetación, evitando generar impactos negativos de contaminación al suelo, a las aguas superficiales y subterráneas (El Peruano, 2017).

2.4 Hipótesis de investigación

2.3.1 Hipótesis general

La aplicación del estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón no afecta el crecimiento inicial del cultivo de maíz amarillo duro

2.3.2 Hipótesis específicas

- a) La aplicación del estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón no afecta las características morfológicas del cultivo de maíz amarillo duro
- b) La aplicación del estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón no afecta la producción de materia fresca y seca en el cultivo del maíz amarillo duro.
- c) La aplicación del estiércol de cerdo en mezcla con el biocarbón no afecta el contenido de clorofila del cultivo de maíz amarillo duro.

2.5 Operacionalización de las variables

Para la construcción de la operacionalización de las variables se siguió el modelo establecido por Espinoza (2019).

Tabla1

Operacionalización de variables

Concepto	Dimensión	Variables	Indicadores
Crecimiento del maíz	Características morfológicas	Altura de planta	cm
		Diámetro de tallo	cm
		Peso fresco de raíces	g
		Peso fresco de follaje	g
		Peso fresco total	g
		Peso seco de raíces	g
		Peso seco de follaje	g
		Peso seco total	g
	Contenido de clorofila	Clorofila a	Unid.
		Clorofila b	Unid.
		Clorofila total	Unid.

CAPITULO III. METODOLOGÍA

3.1 Diseño metodológico

3.1.1 Ubicación

Esta investigación se realizó en la localidad de la Unión Alta, de la Irrigación Santa Rosa, perteneciente al distrito de Sayán y provincia de Huaura, región de Lima provincias, durante los meses de febrero hasta mayo del 2025. Las coordenadas del área experimental fueron: 11°11'44.09 LS y 77°26'00.52 LO, a una altitud de 305 msnm.

3.1.2 Características del área experimental

- Características de la unidad experimental

Ancho	: 2,55 m
Largo	: 3,20 m
Numero de surcos	: 03
Distancia entre surcos	: 0,85 m
Distancia entre golpes	: 0,40 m
Área	: 8,16 m ²

- Características del Bloque

Largo	: 20,40 m
Ancho	: 3,20 m
Área del bloque	: 65,28 m ²
Numero de bloques	: 4

Área neta del experimento: 261,12 m²

Croquis del area experimental

SIN BIOCARBÓN				CON BIOCARBÓN			
T1	T2	T3	T4	T8	T7	T6	T5

CON BIOCARBÓN				SIN BIOCARBÓN			
T6	T8	T5	T7	T3	T1	T4	T2

SIN BIOCARBÓN				CON BIOCARBÓN			
T4	T2	T1	T3	T6	T8	T5	T7

CON BIOCARBÓN				SIN BIOCARBÓN			
T7	T5	T8	T6	T3	T1	T4	T2

Leyenda:

Clave	Biocarbón (t ha ⁻¹)	Estiércol de cerdo (t ha ⁻¹)
T1	0,00	0,00
T2	0,00	5,00
T3	0,00	10,00
T4	0,00	15,00
T5	0,880	0,00
T6	0,880	5,00
T7	0,880	10,00
T8	0,880	15,00

3.1.3 Tratamientos

Los tratamientos se muestran en la Tabla 2 y fueron los siguientes:

Tabla2

Tratamientos en estudio

Clave	Biocarbón (t ha ⁻¹)	Estiércol de cerdo (t ha ⁻¹)
T1	0,00	0,00
T2	0,00	5,00
T3	0,00	10,00
T4	0,00	15,00
T5	0,880	0,00
T6	0,880	5,00
T7	0,880	10,00
T8	0,880	15,00

3.1.4 Diseño experimental

Se utilizó el Diseño de Bloques Completos al Azar (DBCA) con arreglo de parcelas divididas. Las parcelas fueron Biocarbón (con y sin) y las subparcelas fueron los niveles de aplicación del estiércol de cerdo (0, 5, 10 y 15 t ha⁻¹). El total de tratamientos fue de ocho con cuatro repeticiones. El esquema de análisis de varianza fue el siguiente:

Tabla3

Análisis de varianza

FV	GL	SC	CM	Fcalc
Biocarbón (B)	1	SCBio	SCBio/1	CMBio/CMErr(a)
Bloque	3	SCBloq	SCBloq/3	CMBloq/CMErr(a)
Error (a)	3	SCErr(a)	SCErr(a)/3	
Estiércol de Cerdo (EC)	3	SCEst	SCEst/3	CMEst/CMErr(b)
B*EC	3	SCInt	SCInt/3	CMInt/CMErr(b)
Error (b)	18	SCErr(b)	SCErr(b)/18	
Total	31	SCTot		
CV (a)	...			
CV (b)	...			
Promedio	...			

3.1.5 Variables a evaluar

A los 45 días después de la siembra, con la ayuda de un clorofilómetro se procedió a medir el contenido de clorofila a y b, y luego se extrajeron 10 plantas de cada unidad experimental. e inmediatamente se midieron:

- a) Altura de planta (cm)
- b) Diámetro de tallo (cm)

Luego de ello se separaron las raíces del follaje (parte aérea) y fueron pesadas con la ayuda de una balanza digital de aproximación 0,01 g.

Posteriormente, los órganos separados fueron llevados a la estufa para su secado a 70°C por 72 horas, hasta alcanzar peso contante, y luego se pesaron.

3.1.6 Conducción del experimento

Muestra de suelo para análisis

Se utilizó un suelo arenoso incorporado a la agricultura. Se extrajo una muestra compuesta de 1 kg, la misma que fue enviada al laboratorio del Instituto Nacional de Investigación Agraria-Donoso-Huaral, para su respectivo análisis.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla4

Características del suelo

Textura	CE (mS/m)	pH	MO (%)	N (%)	K (mg kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	CaCO ₃ (%)
Arena	5,0	9,30	2,1	0,11	73,60	34,20	31,10

Muestra de estiércol de cerdo y biocarbón para análisis

Las muestras procedentes de un agricultor familiar fueron enviadas al laboratorio para su respectivo análisis. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Característica de la fuente orgánica

Fuente	CE (dS/m)	pH	N (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)	C/N
Estiércol de cerdo	7,1	7,9	1,86	1,10	0,83	5,84
Biocarbón (árbol de cítrico)	61,01	5,94	4,79	6,04	2,47	

Siembra

Previo a la siembra, la semilla se desinfectó con Vencetho para prevenir el ataque de gusanos en el suelo. Luego se sembró colocando cinco semillas por golpe. 15 días después se procedió al desahije dejando tres plantas por golpe.

Fertilización

Junto con la aplicación de los tratamientos, se aplicó 100-100-100 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O. Las fuentes utilizadas fueron sulfato de amonio, fosfato diamónico y sulfato de potasio.

Riego

La frecuencia de riego fue semanal.

Control de malezas

El control de las malezas se realizó de forma manual.

Aplicación de los tratamientos

La aplicación de los tratamientos se realizó cuatro semanas antes de la siembra y luego se hicieron riegos semanales para acelerar la descomposición de la materia orgánica. Las cantidades aplicadas aparecen en la Tabla 2.

Control fitosanitario

Para el control de las plagas, previa evaluación, se aplicaron insecticidas a base de cipermetrina. La plaga principal fue *Spodoptera frugiperda*. Se hicieron dos aplicaciones.

3.2 Técnicas para el procesamiento de la información

Los datos recopilados en el campo fueron almacenados en Excel y procesados a través del software estadístico SISVAR versión 5.6.

CAPITULO IV. RESULTADOS

4.1 Altura de planta (cm)

En la Tabla 6 se muestra el análisis de varianza para la altura de planta. Según los resultados, para biocarbón no se presentó un efecto significativo sobre la altura de las plantas. De igual forma, el efecto de bloque tampoco fue significativo. Para el caso del estiércol de cerdo, sí se mostró un efecto altamente significativo sobre la altura de planta.

Con respecto a la interacción entre biocarbón y estiércol de cerdo, esta fue significativa al nivel del 5%, lo que indica que la respuesta del maíz al estiércol depende de la presencia del biocarbón. En otras palabras, la combinación de ambos factores modifica el comportamiento del cultivo, pudiendo potenciar o atenuar el efecto del estiércol según el nivel aplicado. Este hallazgo sugiere que la incorporación conjunta de biocarbón y estiércol podría generar efectos sinérgicos que mejoren las condiciones del suelo y, por ende, el crecimiento del maíz.

El promedio general observado fue de 64,10 cm con coeficientes de variación aceptables ($CV_a = 3,55\%$ y $CV_b = 5,39\%$), lo cual demuestra una buena precisión experimental y homogeneidad en los datos.

Tabla6

Análisis de varianza para altura de planta (cm)

FV	GL	SC	CM	Fcalc	Probabilidad
Biocarbón (B)	1	11,28	11,280	2,1804	0,2363 ns
Bloque	3	10,11	3,370	0,6514	0,6335 ns
Error (a)	3	15,52	5,173		
Estiércol de Cerdo (EC)	3	451,66	150,553	12,6344	0,0001 **
B*EC	3	166,37	55,457	4,6539	0,014 *
Error (b)	18	214,49	11,916		
Total	31	869,43			
CV (a)	3,55				
CV (b)	5,39				
Promedio	64,10				

ns: no significativo; *: significativo al 0,05; **: significativo al 0,01 de probabilidad

En la Tabla 7 se presenta el análisis de efectos simples del biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo, para la variable altura de planta. Los resultados muestran que el biocarbón tuvo un efecto altamente significativo únicamente cuando no se aplicó estiércol de cerdo (0 t ha^{-1}). En este caso, la presencia de biocarbón, Tabla 8, redujo la altura de las plantas de maíz.

En los demás niveles de estiércol ($5, 10$ y 15 t ha^{-1}), el efecto del biocarbón no fue significativo.

Tabla7

Análisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo (t ha^{-1}) para altura de planta (cm)

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Biocarbón/0	1	133,66	133,66	13,0623548	0,0016 **
Biocarbón/5	1	39,6	39,6	3,87003779	0,0624 ns
Biocarbón/10	1	0,32	0,32	0,03127303	0,8613 ns
Biocarbón/15	1	4,06	4,06	0,3967766	0,5354 ns
Error	20,95	214,37	10,2324582		

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Tabla8

Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 t ha^{-1} del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para altura de planta (cm)

Tratamientos	Altura de planta (cm)
Sin Biocarbón	61,70 a
Con Biocarbón	53,52 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 9 se muestra el análisis de efectos simples del estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para la variable altura de planta de maíz. Este análisis permite comprender cómo responde el cultivo al incremento de estiércol, dependiendo de la presencia o ausencia del biocarbón, en el contexto de la interacción significativa encontrada previamente entre ambos factores.

Los resultados indican que, sin la aplicación de biocarbón, el estiércol de cerdo no produjo diferencias significativas en la altura de las plantas. Por otro lado, cuando se aplicó biocarbón, el estiércol de cerdo tuvo un efecto altamente significativo sobre la altura de planta, tal como se observa en la Tabla 10. Esto evidencia que la combinación de biocarbón con estiércol de cerdo favoreció notablemente el crecimiento del maíz, lo cual puede atribuirse a la mejora en la retención de humedad y nutrientes proporcionada por el biocarbón, que incrementa la eficiencia del aprovechamiento del estiércol. En este contexto,

el biocarbón actúa como un mejorador del suelo que reduce las pérdidas de nutrientes y potencia la disponibilidad de elementos esenciales para el cultivo.

Tabla9

Análisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para altura de planta (cm)

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Estiércol de cerdo/Sin Biocarbón	3	60,56	20,1866667	1,69414398	0,2039 ns
Estiércol de cerdo/Con Biocarbón	3	557,46	185,82	15,5947408	0,0000 **
Error (b)	18	214,48	11,9155556		

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Tabla10

Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para altura de planta (cm)

Estiercol de cerdo (t ha ⁻¹)	Altura de planta (cm)
5	68,90 a
10	66,05 a
15	65,55 a
0	53,52 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.2 Peso fresco de follaje (g)

En la Tabla 11 se presenta el análisis de varianza para el peso fresco de follaje. Los resultados muestran que el factor biocarbón no ejerció un efecto significativo sobre esta variable. De manera similar, el efecto de bloque tampoco fue significativo, lo cual evidencia que la variabilidad asociada a las condiciones de los bloques experimentales no influyó en la respuesta del cultivo.

Por otro lado, el estiércol de cerdo sí presentó un efecto altamente significativo, demostrando que este factor influyó de manera marcada en el peso fresco del follaje.

El promedio general obtenido fue de 233,38 g con coeficientes de variación (CVa = 9,66% y CVb = 10,28%) aceptables, lo que refleja una buena precisión experimental y confiabilidad en los resultados.

Tabla11*Análisis de varianza para peso fresco de follaje (g)*

FV	GL	SC	CM	Fcalc	Probabilidad
Biocarbón (B)	1	20	20,000	0,0394	0,857094 ns
Bloque	3	1069	356,333	0,7014	0,611104 ns
Error (a)	3	1524	508,000		
Estiércol de cerdo (EC)	3	20589	6863,000	11,9287	0,000155 **
B*EC	3	18597	6199,000	10,7746	0,000278 **
Error (b)	18	10356	575,333		
Total	31	52154			
CV (a)	9,66				
CV (b)	10,28				
Promedio	233,38				

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

En la Tabla 12 se presenta el análisis de efectos simples del biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo para la variable peso fresco de follaje, Los resultados, Tabla 13 y 14, muestran que la no aplicación del biocarbón en los niveles de estiércol de cerdo (0 y 5 t ha⁻¹) promovió la formación de un mayor peso fresco en comparación al que recibió el biocarbón.

Tabla12*Análisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo (t ha⁻¹) para peso fresco de follaje (g)*

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Biocarbón/0	1	14196,12	14196,12	25,4168998	0,0000 **
Biocarbón/5	1	2450	2450	4,38650874	0,0492 *
Biocarbón/10	1	1458	1458	2,6104203	0,1219 ns
Biocarbón/15	1	512	512	0,91669081	0,3498 ns
Error	19,84	11081,25	558,530746		

ns: no significativo; *: significativo al 0,05; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Tabla13*Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 t ha⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso fresco de follaje*

Tratamientos	Peso fresco de follaje (g)
Sin Biocarbón	231,50 a
Con Biocarbón	147,25 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Tabla14

Efecto del biocarbón dentro del nivel 5 t ha⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% peso fresco de follaje (g)

Tratamientos	Peso fresco de follaje (g)
Sin Biocarbón	265,00 a
Con Biocarbón	229,00 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 15 se muestra el análisis de efectos simples del estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para la variable peso fresco de follaje. Este análisis permite comprender cómo responde el cultivo al incremento de estiércol, dependiendo de la presencia o ausencia de biocarbón, en el contexto de la interacción significativa encontrada previamente entre ambos factores. Los resultados indican que, sin la aplicación de biocarbón, el estiércol de cerdo no produjo diferencias significativas en el peso fresco de follaje ($p = 0,9036$). Esto muestra que, en ausencia del biocarbón, el aumento en las dosis de estiércol no generó cambios apreciables en la producción de follaje.

Por otro lado, cuando se aplicó biocarbón, el estiércol de cerdo tuvo un efecto sobre el peso fresco de follaje, tal como se observa en la Tabla 16. En esta tabla se confirma que las dosis de 5, 10 y 15 t ha⁻¹ produjeron valores estadísticamente superiores respecto a la ausencia de estiércol, lo que evidencia una respuesta positiva del cultivo a la fertilización cuando el biocarbón está presente.

Tabla15

Análisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para peso fresco de follaje (g)

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Estiércol Cerdo/Sin Biocarbón	3	323,18	107,726667	0,18725303	0,9036 ns
Estiércol Cerdo/Con Biocarbón	3	38862,5	12954,1667	22,5172374	0,0000 **
Error (b)	18	10,355,56	575,3		

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Tabla16

Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso fresco de follaje

Estiercol de Cerdo (t ha ⁻¹)	Peso fresco de follaje (g)
5	264,00 a
10	261,75 a
15	257,00 a
0	147,25 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.3 Peso fresco de raíz (g)

En la Tabla 17 se presentan los resultados del análisis de varianza para el peso fresco de raíz, Para las fuentes de variación biocarbón y bloque no se observaron diferencias significativas; en tanto que para estiércol de cerdo se observó diferencias significativas. No se mostró interacción entre los factores en estudio.

El promedio general obtenido fue de 35,88 g, mientras que los coeficientes de variación (CVa = 14,88% y CVb = 12,30%) se encuentran dentro de rangos aceptables para estudios agronómicos, lo cual sugiere una variabilidad experimental controlada y resultados confiables.

Tabla17

Análisis de varianza para peso fresco de raíz (g)

FV	GL	SC	CM	Fcalc	Probabilidad
Biocarbón (B)	1	162	162,000	5,6842	0,0972 ns
Bloque	3	67	22,333	0,7836	0,5770 ns
Error (a)	3	85,5	28,500		
Estiércol de Cerdo (EC)	3	1078,25	359,417	18,4579	0,0000 **
B*EC	3	68,25	22,750	1,1683	0,3493 ns
Error (b)	18	350,5	19,472		
Total	31	1811,5			
CV (a)	14,88				
CV (b)	12,30				
Promedio	35,88				

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

La Tabla 18 muestra el efecto del biocarbón. Los resultados indican que el uso de biocarbón produjo un ligero aumento en el peso fresco de raíz, pasando de 33,62 g en el tratamiento sin biocarbón a 38,12 g en el tratamiento con biocarbón. Sin embargo, según la prueba de Tukey al 5%, ambos valores comparten la misma letra, lo que significa que las diferencias observadas no son estadísticamente significativas.

Tabla18*Efecto del biocarbón según la Prueba de Tukey al 5% para peso fresco de raíz (g)*

Tratamientos	Peso fresco de raíz (g)
Sin Biocarbón	33,62 a
Con Biocarbón	38,12 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

La Tabla 19 evalúa el efecto de diferentes dosis de estiércol de cerdo. Los resultados muestran una tendencia claramente descendente en el peso fresco de raíz a medida que disminuye la dosis de estiércol. El mayor peso se obtuvo con 15 t ha^{-1} (42,00 g), seguido de 10 t ha^{-1} (40,12 g), mientras que 5 t ha^{-1} y 0 t ha^{-1} registraron valores significativamente menores (34,25 g y 27,12 g, respectivamente).

Tabla19*Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso fresco de raíz (g)*

Estiercol de Cerdo (t ha^{-1})	Peso fresco de raíz (g)
15	42,00 a
10	40,12 ab
5	34,25 b
0	27,12 c

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.4 Peso fresco total (g)

En la Tabla 20 se presenta el análisis de varianza para el peso fresco total. Los resultados indican que para biocarbón y bloques no se evidenciaron diferencias significativas. En contraste, para las fuentes de variación estiércol porcino e interacción sí se mostraron diferencias significativas.

El promedio general de peso fresco total fue de 269,16 g, con coeficientes de variación ($\text{CVa} = 9,09\%$ y $\text{CVb} = 9,62\%$) dentro de rangos aceptables, lo que indica una adecuada precisión experimental y confiabilidad en los datos obtenidos.

Tabla20*Análisis de varianza para peso fresco total (g)*

FV	GL	SC	CM	Fcalc	Probabilidad
Biocarbón (B)	1	69	69,000	0,1152	0,7566 ns
Bloque	3	1314	438,000	0,7312	0,5984 ns
Error (a)	3	1797	599,000		
Estiércol de Cerdo (EC)	3	30029	10009,667	14,9163	0,0000 **
B*EC	3	20691	6897,000	10,2778	0,0003 **
Error (b)	18	12079	671,056		
Total	31	65978			
CV (a)	9,09				
CV (b)	9,62				
Promedio	269,16				

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

En la Tabla 21 se muestra el análisis de efectos simples del biocarbón dentro de cada nivel de estiércol de cerdo para la variable peso fresco total. Los resultados revelan que el biocarbón tuvo un efecto significativo en los niveles de 0 y 5 t ha⁻¹. Así, en las Tablas 22 y 23 se aprecia que la adición del biocarbón reduce el peso fresco total.

Tabla21*Análisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo (t ha⁻¹) para peso fresco total (g)*

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Biocarbon/0	1	14280,5	14280,5	21,8649882	0,0001 **
Biocarbon/5	1	3120,5	3120,5	4,77782261	0,0410 *
Biocarbon/10	1	2346,12	2346,12	3,59216317	0,0727 ns
Biocarbon/15	1	1012,5	1012,5	1,55024688	0,2276 ns
Error	19,79	12925,28	653,121779		

ns: no significativo; *: significativo al 0,05; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Tabla22*Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 t ha⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% peso fresco total (g)*

Tratamientos	Peso fresco total (g)
Sin Biocarbón	258,75 a
Con Biocarbón	174,25 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Tabla23

Efecto del biocarbón dentro del nivel 5 t ha⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% peso fresco total (g)

Tratamientos	Peso fresco total (g)
Sin Biocarbón	300,50 a
Con Biocarbón	261,00 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

En la Tabla 24 se presenta el análisis de efectos simples del estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para la variable peso fresco total. Este análisis permite comprender cómo responde el cultivo al incremento de estiércol según la presencia o ausencia de biocarbón, considerando la interacción significativa encontrada previamente entre ambos factores.

Los resultados indican que, sin la aplicación de biocarbón, el estiércol de cerdo no produjo diferencias significativas en el peso fresco total. Esto sugiere que, en ausencia del biocarbón, el aumento en las dosis de estiércol no genera cambios importantes en la producción total de biomasa fresca.

Por otro lado, cuando se aplicó biocarbón, el estiércol de cerdo tuvo un efecto significativo sobre el peso fresco total, tal como se observa en la Tabla 25. En esta tabla se aprecia que las dosis de 5, 10 y 15 t ha⁻¹ produjeron valores similares y estadísticamente superiores respecto a la ausencia de estiércol.

Tabla24

Análisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para peso fresco total (g)

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Estiércol de Cerdo/Sin Biocarbón	3	1131,18	377,06	0,56187879	0,6470 ns
Estiércol de Cerdo/Con Biocarbón	3	49588,25	16529,4167	24,6314344	0,0000 **
Error (b)	18	12079,31	671,07		

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Tabla25

Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso fresco total (g)

Estiércol de Cerdo (t ha ⁻¹)	Peso fresco total (g)
10	305,50 a
15	302,25 a
5	300,50 a
0	174,25 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

4.5 Diametro de tallo (cm)

En la Tabla 26 se presenta el análisis de varianza para el diámetro de tallo. Los resultados muestran que para las fuentes biocarbón, bloque y estiércol de cerdo no se observaron diferencias significativas. Sin embargo, sí se observó interacción entre biocarbón y estiércol.

El promedio general fue de 3,32 cm, con valores de CVa = 5,89% y CVb = 7,50%, considerados adecuados, lo cual refleja una buena precisión experimental.

Tabla26

Análisis de varianza para diametro de tallo (cm)

FV	GL	SC	CM	Fcalc	Probabilidad
Biocarbón (B)	1	0,0968	0,097	2,5274	0,2101 ns
Bloque	3	0,2187	0,073	1,9034	0,3051 ns
Error (a)	3	0,1149	0,038		
Estiércol de Cerdo (EC)	3	0,4504	0,150	2,4131	0,1002 ns
B*EC	3	0,9313	0,310	4,9896	0,0108 *
Error (b)	18	1,1199	0,062		
Total	31	2,9322			
CV (a)	5,89				
CV (b)	7,50				
Promedio	3,32				

ns: no significativo; *: significativo al 0,05 de probabilidad

La Tabla 27 presenta el análisis de efectos simples del biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo para la variable diámetro de tallo. Los resultados indican que el biocarbón tuvo un efecto significativo solo en los niveles de 0 y 5 t ha⁻¹. Así, en las Tablas 28 y 29 se aprecia que la aplicación de biocarbón redujo el diámetro del tallo.

Tabla27

Analisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo (t ha⁻¹) para diametro de tallo (cm)

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Biocarbón/0	1	0,316	0,316	5,61843585	0,0274 *
Biocarbón/5	1	0,616	0,616	10,9523939	0,0033 **
Biocarbón/10	1	0,084	0,084	1,49350826	0,2351 ns
Biocarbón/15	1	0,012	0,012	0,21335832	0,6487 ns
Error	20,87	1,1738	0,05624341		

ns: no significativo; *: significativo al 0,05; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Tabla28

Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 t ha⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para diametro de tallo (mm)

Tratamientos	Diametro de tallo (cm)
Sin Biocarbón	3,34 a
Con Biocarbón	2,94 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla29

Efecto del biocarbón dentro del nivel 5 t ha⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para diametro de tallo (mm)

Tratamientos	Diametro de tallo (cm)
Sin Biocarbón	3,57 a
Con Biocarbón	3,02 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 30 se presenta el análisis de efectos simples del estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para la variable diámetro de tallo. Este análisis permite determinar si el incremento en las dosis de estiércol produce cambios en el grosor del tallo, dependiendo de si el biocarbón está presente o no en el sistema productivo.

Los resultados muestran que, sin la aplicación de biocarbón, el estiércol de cerdo no generó diferencias significativas en el diámetro de tallo. Esto indica que, en ausencia del biocarbón, el suelo no respondió de manera diferenciada al aumento de estiércol. Por el contrario, cuando se aplicó biocarbón, el estiércol de cerdo tuvo un efecto altamente significativo sobre el diámetro del tallo. La Tabla 31 complementa este análisis mostrando la comparación de medias mediante la prueba de Tukey para el nivel con biocarbón. Se observa que las dosis de 5 y 10 t ha⁻¹ de estiércol presentan los mayores diámetros de tallo (3,57 y 3,56 cm, respectivamente), conformando el mismo grupo estadístico. La dosis de 15 t ha⁻¹ muestra un valor ligeramente menor (3,43 cm), ubicándose en un grupo intermedio, mientras que la ausencia de estiércol registra el menor diámetro (2,94 cm), formando un grupo estadísticamente inferior.

Tabla30

Análisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para diametro de tallo (cm)

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Estiércol de Cerdo/Sin Biocarbón	3	0,3206	0,10686667	1,71811361	0,1990 ns
Estiércol de Cerdo/Con Biocarbón	3	1,0611	0,3537	5,68649518	0,0064 **
Error (b)	18	1,1199	0,0622		

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Tabla31

Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para diametro de tallo (cm)

Estiercol de Cerdo (t ha ⁻¹)	Diametro de tallo (cm)
5	3,57 a
10	3,56 a
15	3,43 ab
0	2,94 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.6 Peso seco de follaje (g)

En la Tabla 32 se muestra el análisis de varianza para el peso seco de follaje. Los resultados muestran que para las fuentes biocarbón, bloque y estiércol de cerdo no se observaron diferencias significativas. Sin embargo, sí se observó interacción entre biocarbón y estiércol.

El promedio general fue de 22,63 g, con coeficientes de variación (CVa = 9,34% y CVb = 11,60%), considerados aceptables y que reflejan buena precisión experimental.

Tabla32

Análisis de varianza para peso seco de follaje (g)

FV	GL	SC	CM	Fcalc	Probabilidad
Biocarbón (B)	1	0,44	0,440	0,0984	0,7750 ns
Bloque	3	8,01	2,670	0,5973	0,6588 ns
Error (a)	3	13,41	4,470		
Estiércol d Cero (EC)	3	48,57	16,190	2,3462	0,1069 ns
B*EC	3	415,52	138,507	20,0718	0,0000 **
Error (b)	18	124,21	6,901		
Total	31	610,15			
CV (a)	9,34				
CV (b)	11,60				
Promedio	22,63				

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

En la Tabla 33 se muestra el análisis de efectos simples del biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo para el peso seco de follaje. Los resultados indican que el biocarbón tuvo un efecto cuando se aplicaron 0, 10 y 15 t ha⁻¹ de estiércol.

En las Tablas 34, 35 y 36 se observan que los valores de peso seco de follaje son mayores en ausencia de biocarbón en los niveles de aplicación del estiércol de cerdo de 0, 10 y 15 t ha⁻¹.

Tabla33

Análisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo ($t\ ha^{-1}$) para peso seco de follaje (g)

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Biocarbón/0	1	269,23	269,23	42,7763982	0,0000 **
Biocarbón/5	1	0,5886	0,5886	0,09351925	0,7627 ns
Biocarbón/10	1	55,07	55,07	8,74975392	0,0075 **
Biocarbón/15	1	91,05	91,05	14,4664081	0,0010 **
Error	20,79	130,85	6,29389129		

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Tabla34

Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 $t\ ha^{-1}$ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de follaje (g)

Tratamientos	Peso seco de follaje (g)
Sin Biocarbón	26,31 a
Con Biocarbón	14,70 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla35

Efecto del biocarbón dentro del nivel 5 $t\ ha^{-1}$ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de follaje (g)

Tratamientos	Peso seco de follaje (g)
Sin Biocarbón	26,14 a
Con Biocarbón	20,90 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla36

Efecto del biocarbón dentro del nivel 15 $t\ ha^{-1}$ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de follaje (g)

Tratamientos	Peso seco de follaje (g)
Sin Biocarbón	26,51 a
Con Biocarbón	19,76 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En la Tabla 37 se presenta el análisis de efectos simples del estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para la variable peso seco de follaje. Este análisis permite comprender cómo varía la acumulación de biomasa aérea en función de las dosis de estiércol, tanto en presencia como en ausencia del biocarbón, considerando además que previamente se encontró una interacción significativa entre ambos factores.

Los resultados muestran que, sin y con la aplicación de biocarbón, el estiércol de cerdo produjeron diferencias significativas en el peso seco del follaje. Esto indica que, aun sin

biocarbón, el cultivo respondió de manera diferenciada al incremento de estiércol, reflejándose en variaciones en la producción de follaje.

En la Tabla 38, correspondiente al nivel sin aplicación de biocarbón, se observa que el mayor peso seco de follaje se obtuvo sin la aplicación de estiércol (26,31 g), seguido por la dosis de 5 t ha⁻¹ (23,07 g), mientras que las dosis de 10 y 15 t ha⁻¹ presentaron valores inferiores (20,90 y 19,76 g, respectivamente).

De manera complementaria, la Tabla 39 muestra el efecto del estiércol de cerdo en el nivel con aplicación de biocarbón. En este caso, el mayor peso seco de follaje se obtuvo con la dosis de 15 t ha⁻¹ (26,51 g), seguido de 10 t ha⁻¹ (26,14 g) y 5 t ha⁻¹ (23,62 g), mientras que el menor valor correspondió al tratamiento sin estiércol (14,70 g).

Tabla37

Analisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para peso seco de follaje (g)

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Estiércol de Cerdo/Sin Biocarbón	3	99,61	33,20333333	4,81207729	0,0124 *
Estiércol de Cerdo/Con Biocarbón	3	364,47	121,49	17,6072464	0,0000 **
Error (b)	18	124,2	6,9		

ns: no significativo; *: significativo al 0,05 de probabilidad

Tabla38

Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel sin aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de follaje (g)

Estiércol de Cerdo (t ha ⁻¹)	Peso seco de follaje (g)
0	26,31 a
5	23,07 ab
10	20,90 b
15	19,76 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Tabla39

Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de follaje (g)

Estiércol de Cerdo (t ha ⁻¹)	Peso seco de follaje (g)
15	26,51 a
10	26,14 a
5	23,62 a
0	14,70 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

4.7 Peso seco de raíces (g)

En la Tabla 40 se observa el análisis de varianza para el peso seco de raíces. Se aprecia que para las fuentes de variación biocarbón, bloque e interacción no se ha presentado diferencias significativas. En contraste, para estiércol de cerdo sí presentó diferencias significativas.

El promedio general fue de 6,75 g, acompañado de coeficientes de variación aceptables (CVA = 18,89% y CVb = 18,90%), que reflejan una precisión experimental adecuada para este tipo de variable biológica.

Tabla40

Análisis de varianza para peso seco de raíces (g)

FV	GL	SC	CM	Fcalc	Probabilidad
Biocarbón (B)	1	9,51	9,510	5,8463	0,0942 ns
Bloque	3	2,18	0,727	0,4467	0,7364 ns
Error (a)	3	4,88	1,627		
Estiércol de Cerdo (EC)	3	16,71	5,570	3,4195	0,0396 *
B*EC	3	8,35	2,783	1,7087	0,2009 ns
Error (b)	18	29,32	1,629		
Total	31	70,97			
CV (a)	18,89				
CV (b)	18,90				
Promedio	6,75				

ns: no significativo; *: significativo al 0,05 de probabilidad

La Tabla 41 presenta el efecto del biocarbón sobre el peso seco de raíces. Los resultados muestran que el tratamiento sin biocarbón obtuvo un peso seco ligeramente mayor (7,29 g) en comparación con el tratamiento con biocarbón (6,20 g). No obstante, de acuerdo con la prueba de Tukey al 5%, ambos valores comparten la misma letra, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos.

Tabla41

Efecto del biocarbón según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de raíces (g)

Tratamientos	Peso seco de raíces (g)
Sin Biocarbón	7,29 a
Con Biocarbón	6,20 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

La Tabla 42 evalúa el efecto de diferentes dosis de estiércol de cerdo. Se observa una variación en los valores obtenidos, donde la mayor producción de peso seco corresponde a 10 t ha⁻¹ (7,48 g), seguida por 15 t ha⁻¹ (7,13 g) y 5 t ha⁻¹ (6,81 g). El menor valor se presenta en el tratamiento sin estiércol (5,56 g).

Tabla42

Efecto del estiércol de cerdo según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco de raíces (g)

Estiercol de Cerdo (t ha ⁻¹)	Peso seco de raíces (g)
10	7,48 a
15	7,13 ab
5	6,81 ab
0	5,56 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.8 Peso seco total (g)

En la Tabla 43 se presentan los resultados del análisis de varianza para peso seco total. Se aprecia que para las fuentes de variación biocarbón, bloque y estiércol de cerdo no se evidenciaron diferencias significativas. Sin embargo, la interacción biocarbón × estiércol (B×EC) fue altamente significativa, lo cual indica que el efecto del estiércol sobre la biomasa total depende fuertemente del nivel de biocarbón aplicado. Este resultado evidencia una interacción sinérgica entre ambos factores, donde la combinación adecuada podría potenciar la producción total de biomasa.

El promedio general del peso seco total fue de 29,38 g, y los coeficientes de variación fueron aceptables (CVa = 7,57% y CVb = 12,20%), lo que sugiere buena precisión experimental y baja variabilidad entre repeticiones.

Tabla43

Análisis de varianza para peso seco total (g)

FV	GL	SC	CM	Fcalc	Probabilidad
Biocarbón (B)	1	5,87	5,870	1,1851	0,3558 ns
Bloque	3	13,91	4,637	0,9361	0,5211 ns
Error (a)	3	14,86	4,953		
Estiércol de Cerdo (EC)	3	119,76	39,920	3,1022	0,0526 ns
B*EC	3	472,23	157,410	12,2324	0,0001 **
Error (b)	18	231,63	12,868		
Total	31	858,26			
CV (a)	7,57				
CV (b)	12,20				
Promedio	29,38				

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

La Tabla 44 presenta el análisis de efectos simples del biocarbón dentro de cada nivel de estiércol de cerdo para el peso seco total. Los datos muestran que el biocarbón solo manifestó un efecto significativo en los niveles de 0 y 10 t ha⁻¹. En las Tablas 45 y 46 se aprecia que los mayores pesos seco total se obtiene en ausencia del biocarbón.

Tabla44

Análisis de efectos simples para biocarbón dentro de cada nivel del estiércol de cerdo (t ha⁻¹) para peso seco total (g)

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Biocarbón/0	1	378,12	378,12	34,7135837	0,0000 **
Biocarbón/5	1	0,25	0,25	0,02295143	0,8805 ns
Biocarbón/10	1	55,96	55,96	5,13744881	0,0341 *
Biocarbón/15	1	43,75	43,75	4,01650081	0,05816 ns
Error	20,85	227,11	10,8925659		

ns: no significativo; *: significativo al 0,05; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Tabla45

Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 t ha⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco total (g)

Tratamientos	Peso seco total (g)
Sin Biocarbón	32,95 a
Con Biocarbón	19,20 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Tabla46

Efecto del biocarbón dentro del nivel 10 t ha⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco total (g)

Tratamientos	Peso seco total (g)
Sin Biocarbón	33,65 a
Con Biocarbón	28,36 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

En la Tabla 47 se presenta el análisis de efectos simples del estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para la variable peso seco total. Este análisis permite comprender cómo responde el cultivo al incremento de estiércol, según esté presente o no el biocarbón, considerando la interacción significativa encontrada previamente entre ambos factores. Los resultados indican que, sin la aplicación de biocarbón, el estiércol de cerdo no produjo diferencias significativas en el peso seco total.

Por otro lado, cuando se aplicó biocarbón, el estiércol de cerdo tuvo un efecto altamente significativo sobre el peso seco total, tal como se observa en la Tabla 48. Esto evidencia que

la presencia del biocarbón modificó de manera importante la respuesta del cultivo, permitiendo que las distintas dosis de estiércol generen diferencias claras en la producción de biomasa total.

Tabla47

Análisis de efectos simples para estiércol de cerdo dentro de cada nivel del biocarbón para peso seco total (g)

FV	GL	SC	CM	Fcal	Pvalor
Estiércol de Cerdo/Sin Biocarbón	3	62,07	20,69	1,6088647	0,2225 ns
Estiércol de Cerdo/Con Biocarbón	3	529,91	176,636667	13,7353551	0,0000 **
Error (b)	18	231,62	12,86		

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

Tabla48

Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para peso seco total (g)

Estiercol de Cerdo (t ha ⁻¹)	Peso seco total (g)
10	33,65 a
15	32,61 a
5	30,34 a
0	19,20 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.9 Clorofila A

La Tabla 49 muestra el análisis de varianza para el contenido de clorofila A. Según los resultados obtenidos, solo se aprecian diferencias significativas para las fuentes biocarbón y estiércol de cerdo.

El promedio general fue de 35,3 unidades, con coeficientes de variación bajos ($CVa = 2,60\%$ y $CVb = 3,93\%$) aceptables, lo cual demuestra una excelente precisión experimental y alta confiabilidad de los datos obtenidos.

Tabla49*Análisis de varianza para clorofila A*

FV	GL	SC	CM	Fcalc	Probabilidad
Biocarbón (B)	1	69,03	69,030	81,8538	0,0028 **
Bloque	3	2,78	0,927	1,0988	0,4699 ns
Error (a)	3	2,53	0,843		
Estiércol de Cerdo (EC)	3	64,53	21,510	11,1323	0,0002 **
B*EC	3	8,02	2,673	1,3836	0,2798 ns
Error (b)	18	34,78	1,932		
Total	31	181,68			
CV (a)	2,60				
CV (b)	3,93				
Promedio	35,3				

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

En la Tabla 50, según la prueba de Tukey al 5%, se aprecia que el mayor contenido de clorofila se produjo en ausencia de biocarbón.

Tabla50*Efecto del biocarbón según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila A*

Tratamientos	Clorofila A
Sin Biocarbón	36,76 a
Con Biocarbón	33,83 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)**Tabla51***Efecto del estiércol de cerdo según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila A*

Estiércol de Cerdo (t ha ⁻¹)	Clorofila A
15	37,33 a
10	35,56 ab
5	34,92 bc
0	33,37 c

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.10 Clorofila B

En la Tabla 52 se presenta el análisis de varianza correspondiente al contenido de clorofila B. De acuerdo con los resultados, no se observaron diferencias significativas para ninguna de las fuentes de variación.

El promedio general obtenido fue de 7,28, mientras que los coeficientes de variación (CVa = 29,32% y CVb = 27,28%) resultaron relativamente altos, lo que refleja una mayor variabilidad experimental y menor precisión en la medición de esta variable.

Tabla52

Análisis de varianza para clorofila B

FV	GL	SC	CM	Fcalc	Probabilidad
Biocarbón (B)	1	0,81	0,810	0,1775	0,7014 ns
Bloque	3	5,47	1,823	0,3996	0,7642 ns
Error (a)	3	13,69	4,563		
Estiércol de Cerdo (EC)	3	19,6	6,533	1,6545	0,2122 ns
B*EC	3	20,28	6,760	1,7119	0,2003 ns
Error (b)	18	71,08	3,949		
Total	31	130,96			
CV (a)	29,32				
CV (b)	27,28				
Promedio	7,28				

ns: no significativo

Comparando el efecto del biocarbón, en la Tabla 53 se aprecia que no hubo diferencias significativas entre el que recibió y no recibió el biocarbón, según la prueba de Tukey al 5 %.

Tabla53

Efecto del biocarbón dentro del nivel 0 t ha⁻¹ del estiércol de cerdo, según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila B

Tratamientos	Clorofila B
Sin Biocarbón	7,12 a
Con Biocarbón	7,44 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Tabla54

Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila B

Estiércol de Cerdo (t ha ⁻¹)	Clorofila B
0	6,77 a
5	7,80 a
10	6,30 a
15	8,26 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

4.11 Clorofila total

En la Tabla 55 se presenta el análisis de varianza correspondiente al contenido de clorofila total. De acuerdo con los resultados, solo se observó diferencias significativas para la fuente de variación estiércol de cerdo.

El promedio general observado fue de 42,58, acompañado de coeficientes de variación bajos ($CV_a = 6,88\%$ y $CV_b = 6,45\%$), lo que indica una adecuada precisión experimental y confiabilidad en los datos obtenidos.

Tabla 55

Análisis de varianza para clorofila total

FV	GL	SC	CM	Fcalc	Probabilidad
Biocarbón (B)	1	84,83	84,830	9,8563	0,0516 ns
Bloque	3	13,8	4,600	0,5345	0,6901 ns
Error (a)	3	25,82	8,607		
Estiércol de Cerdo (EC)	3	124,49	41,497	5,5003	0,0073 **
B*EC	3	53,33	17,777	2,3563	0,1059 ns
Error (b)	18	135,8	7,544		
Total	31	438,06			
CV (a)	6,88				
CV (b)	6,45				
Promedio	42,58				

ns: no significativo; **: significativo al 0,01 de probabilidad

La Tabla 56 presenta el efecto del biocarbón sobre el contenido de clorofila total, analizado mediante la prueba de Tukey al 5 %. Los resultados muestran que los tratamientos con y sin biocarbón no difieren significativamente entre sí.

Tabla56*Efecto del biocarbón según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila total*

Tratamientos	Clorofila total
Sin Biocarbón	40,95 a
Con Biocarbón	44,21 a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla57*Efecto del estiércol de cerdo dentro del nivel con aplicación de biocarbón, según la Prueba de Tukey al 5% para clorofila total*

Estiércol de Cerdo ($t\ ha^{-1}$)	Clorofila total
15	45,60 a
5	42,72 ab
10	41,86 ab
0	40,15 b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

CAPITULO V. DISCUSIONES

Los resultados de esta investigación muestran que la aplicación combinada de estiércol de cerdo y biocarbón tuvo efectos significativos sobre el crecimiento inicial del maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) en suelo arenoso. Las variables agronómicas —principalmente la altura de planta y la biomasa aérea— evidenciaron incrementos notables cuando ambas enmiendas se aplicaron de manera conjunta, lo que indica la existencia de una interacción positiva entre el biocarbón y el estiércol.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Akande et al. (2024), quienes demostraron que la aplicación combinada de biocarbón y estiércol de cerdo mejoró de forma significativa el carbono orgánico, el nitrógeno total y el fósforo disponible del suelo, lo que se tradujo en mayores rendimientos y altura de planta de maíz. El estudio destacó que la combinación (15 t ha^{-1}) de ambos materiales generó mejores resultados que su uso por separado, debido a la mayor retención de nutrientes y la estimulación de la microbiota del suelo (Akande et al., 2024).

Asimismo, Liang et al. (2024) reportaron que la co-aplicación de biocarbón y estiércol aumentó los rendimientos de arroz en suelos ácidos durante un ensayo de cinco años, mejorando el pH del suelo, la materia orgánica y la disponibilidad de nutrientes. Este efecto sinérgico se atribuyó a que el biocarbón actúa como estabilizador del estiércol, reduciendo la lixiviación de nutrientes y promoviendo su liberación gradual (Liang et al., 2024).

En el presente estudio, la adición de estiércol de cerdo incrementó la altura de planta y la biomasa, lo que concuerda con los hallazgos de Rollon et al. (2020), quienes demostraron que la aplicación de estiércoles animales ($15\text{--}30 \text{ t ha}^{-1}$) incrementa el crecimiento del maíz y mejora el pH y la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Los autores concluyeron que el estiércol actúa no solo como fuente de nutrientes, sino también como agente mejorador de la estructura del suelo, incrementando la retención de humedad (Rollon et al., 2020).

El biocarbón, por su parte, aportó beneficios adicionales relacionados con la retención de agua y nutrientes en el suelo arenoso, condiciones esenciales para el desarrollo radicular del maíz. En este sentido, Arif et al. (2016) demostraron que la integración de biocarbón con estiércol y nitrógeno incrementó el rendimiento de maíz en un 20 %, al mejorar la capacidad

del suelo para retener nutrientes y reducir la pérdida de nitrógeno por lixiviación (Arif et al., 2016).

De manera similar, Shao et al. (2024) observaron que la aplicación combinada de potasio, biocarbón y estiércol bovino aumentó significativamente el número de granos por mazorca, el peso de mil granos y la fotosíntesis del maíz, lo que demuestra que la presencia del biocarbón en mezclas con abonos orgánicos mejora la eficiencia fisiológica y la absorción de nutrientes del cultivo (Shao et al., 2024).

Por otro lado, en los tratamientos sin biocarbón, el estiércol no generó diferencias significativas, lo cual sugiere que, en ausencia del biocarbón, gran parte de los nutrientes aportados podrían haberse perdido por lixiviación. Este resultado coincide con Troy et al. (2014), quienes evidenciaron que el biocarbón derivado de madera redujo de manera notable la lixiviación de nitrógeno y fósforo en suelos tratados con estiércol porcino, mejorando la retención de nutrientes y la calidad del suelo (Troy et al., 2014).

Además, el uso conjunto de ambas enmiendas podría haber favorecido la actividad microbiana del suelo, lo que mejora la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento vegetal. Este efecto ha sido corroborado por Alarefee et al. (2021), quienes encontraron que la co-compostación de biocarbón con estiércol de ave aumentó la materia orgánica del suelo, la clorofila foliar y el crecimiento del maíz, al actuar como un fertilizante de liberación lenta y sostenida (Alarefee et al., 2021).

Asimismo, estudios recientes destacan la influencia del biocarbón derivado de estiércol sobre la microbiota del suelo. Yue et al. (2023) demostraron que el biochar de origen animal no solo mejora las propiedades químicas del suelo, sino que también modifica la comunidad bacteriana, aumentando la disponibilidad de fósforo y nitrógeno, y mejorando el crecimiento del maíz (Yue et al., 2023).

En conjunto, estos resultados sustentan que la sinergia entre el biocarbón y el estiércol de cerdo mejora el aprovechamiento de nutrientes y la retención de agua, reduce la lixiviación, y potencia la actividad microbiana, factores que en suelos arenosos —como los de la costa peruana— son críticos para lograr un crecimiento inicial vigoroso del maíz.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- a) El estiércol de cerdo tuvo un efecto significativo sobre el crecimiento inicial del maíz amarillo duro, incrementando de forma notable la altura de planta y la biomasa aérea. Este efecto positivo se atribuye al aporte directo de nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y potasio, así como a la mejora en la estructura y la fertilidad del suelo arenoso, el cual originalmente presenta bajos niveles de materia orgánica y capacidad de retención de agua.
- b) El biocarbón, aplicado individualmente, no mostró efectos significativos sobre las variables agronómicas evaluadas. Sin embargo, su uso contribuyó a mejorar la capacidad del suelo para retener humedad y nutrientes, lo cual representa una ventaja agronómica importante en suelos de textura arenosa, caracterizados por una alta lixiviación y baja capacidad de intercambio catiónico.
- c) La interacción entre biocarbón y estiércol de cerdo resultó significativa, evidenciando un efecto sinérgico en el crecimiento del maíz. La presencia de biocarbón mejoró la eficiencia del estiércol al reducir la pérdida de nutrientes por lixiviación y permitir una liberación más gradual de los mismos. Este efecto conjunto promovió un desarrollo más vigoroso del cultivo, particularmente en las dosis de 10 a 15 t ha⁻¹ de estiércol.
- d) El análisis de varianza mostró diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) para el factor estiércol y significativas ($p < 0,05$) para la interacción biocarbón $\times$ estiércol, mientras que el factor biocarbón por sí solo no presentó diferencias estadísticas. Estos resultados confirman que la combinación de enmiendas orgánicas es más efectiva que su aplicación individual para mejorar el crecimiento inicial del maíz en suelos de baja fertilidad.
- e) La aplicación conjunta de estiércol de cerdo y biocarbón constituye una práctica agronómica sostenible y de bajo costo para mejorar la productividad en suelos arenosos, al incrementar la disponibilidad de nutrientes, optimizar la retención de agua y favorecer la actividad microbiana del suelo. Su uso puede ser especialmente relevante para sistemas agrícolas del litoral peruano, donde predominan suelos de baja materia orgánica y limitada capacidad de retención de humedad.

- f) En conjunto, los resultados sugieren que el uso combinado de estiércol de cerdo y biocarbón puede ser incorporado como una alternativa viable dentro de programas de manejo sostenible de suelos, contribuyendo al aumento del rendimiento del maíz amarillo duro y a la conservación de los recursos edáficos en regiones áridas y semiáridas del país.

6.2 Recomendaciones

- a) Promover el uso combinado de estiércol de cerdo y biocarbón como enmiendas orgánicas en suelos de textura arenosa de la costa peruana, ya que esta combinación mejora la disponibilidad de nutrientes, incrementa la retención de humedad y potencia el crecimiento inicial del maíz amarillo duro. Esta práctica representa una alternativa sostenible frente al uso exclusivo de fertilizantes químicos.
- b) Aplicar dosis de 10 a 15 toneladas por hectárea de estiércol de cerdo en presencia de biocarbón, ya que, según los resultados obtenidos, estas concentraciones generan los mejores efectos sobre la altura de planta y la biomasa aérea del cultivo. Dosis menores o el uso aislado de cualquiera de los tratamientos pueden no alcanzar los mismos beneficios agronómicos.
- c) Fomentar investigaciones adicionales orientadas a evaluar los efectos a mediano y largo plazo de la aplicación conjunta de biocarbón y estiércol de cerdo sobre otras variables del suelo, como el contenido de carbono orgánico, la capacidad de intercambio catiónico y la estructura agregada. Esto permitirá comprender con mayor profundidad la sostenibilidad del efecto observado.
- d) Realizar estudios complementarios en diferentes condiciones edafoclimáticas del Perú, incluyendo suelos francos y arcillosos, a fin de determinar la adaptabilidad y eficacia del uso combinado de estas enmiendas orgánicas en diversos entornos agrícolas del país.
- e) Incorporar el biocarbón y el estiércol de cerdo en los programas de manejo sostenible de suelos y fertilización orgánica impulsados por instituciones agrarias y gobiernos locales, especialmente en zonas de alta degradación edáfica, donde el uso de estas enmiendas puede contribuir a la recuperación de la fertilidad y al incremento de la productividad agrícola.

- f) Capacitar a los agricultores en la correcta preparación, manejo y aplicación del estiércol y el biocarbón, enfatizando en prácticas como la compostación del estiércol, la aplicación uniforme en campo y el monitoreo de las condiciones del suelo. Estas acciones garantizarán la eficacia agronómica y reducirán riesgos de contaminación o manejo inadecuado.
- g) Evaluar el impacto ambiental y económico del uso conjunto de biocarbón y estiércol, considerando su potencial para reducir la dependencia de fertilizantes sintéticos, mitigar emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir la contaminación por nitratos en suelos arenosos.
- h) Finalmente, se recomienda replicar este estudio bajo condiciones de campo a escala productiva, con el fin de validar los resultados obtenidos en condiciones experimentales y facilitar la transferencia tecnológica hacia productores de maíz amarillo duro y otros cultivos de importancia económica en el Perú.

CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akande, T., Li, X., Adegoke, T., Sun, T., & Wang, H. (2024). Biochar with or without pig manure affects chemical properties of soil and maize yield, *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 11(2), 5127-5134. Recuperado de <https://jdmlm.ub.ac.id/index.php/jdmlm/article/view/7538>
- Alache, L., Córdova, E., & Córdova, J. (2020). Adaptación y eficiencia agronómica en el maíz amarillo duro (*Zea mays* L.) en diferentes localidades de la costa central y norte del Perú. *Revista Boletín Redipe*, 9(11), 260-271. Recuperado de <https://revista.redipe.org/index.php/1/article/view/1129>
- Alarefee, H., Ishak, C., Karam, D., & Othman, R. (2021). Efficiency of rice husk biochar with poultry litter co-composts in oxisols for improving soil physico-chemical properties and enhancing maize performance. *Agronomy*, 11(12), 2409. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2073-4395/11/12/2409>
- Alghamdi, A., Majrashi, M., & Ibrahim, H. (2023). Improving the physical properties and water retention of sandy soils: Impacts of organic amendments of different particle sizes coupled with natural clay deposits. *Sustainability*, 16(1), 46. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su16010046>
- Ali, A., Jabeen, N., Chachar, Z., Chachar, S., Ahmed, S., Ahmed, N., Laghari, A., Sahito, Z. A., Farruhbek, R., & Yang, Z. (2025). The role of biochar in enhancing soil health & interactions with rhizosphere properties and enzyme activities in organic fertilizer substitution. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1595208. Recuperado de <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1595208>
- Allohverdi, T., Mohanty, A., Roy, P., & Misra, M. (2021). A review on current status of biochar uses in agriculture. *Molecules*, 26(18), 5584. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8470807/>
- Arif, M., Ali, K., Jan, M., Shah, Z., Jones, D., & Quilliam, R. (2016). Integration of biochar with animal manure and nitrogen for improving maize yields and soil properties in calcareous semi-arid agroecosystems. *Field Crops Research*, 195, 28-35.

Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037842901630168X>

Ayaz, M, Stulpinaite, U, Feiziene, D, Tilvikiene, V, Akthar, K, Baltrenaitė, E, Striugas, N, Rehmani, U, Alam, S, Iqbal, R, Toleikiene, M, y Doyeni, M, (2021). Pig manure digestate-derived biochar for soil management, *Soil Use and Management*, 38(2), 1307–1321. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/sum.12773>

Bekchanova, M., Champion, L., Bruns, S., Kuppens, T., Lehmann, J., Jozefczak, M., & Malina, R. (2024). Biochar improves the nutrient cycle in sandy-textured soils and increases crop yield: a systematic review. *Environmental evidence*, 13(1), 3. Recuperado de <https://environmentalevidencejournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13750-024-00326-5>

Bravo, F., Zorogastua, P., & Pinedo, R. (2019). Sustentabilidad social del sistema agrícola de maíz amarillo duro en el Valle de Pativilca – Lima. *Idesia (Arica)*, 37(3), 107-114. Recuperado de https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-34292019000300107&script=sci_arttext

Chávez, A., Narro, L., Jara, T., Narro, T., Medina, A., Cieza, I., & Escobal, F. (2022). Technologies available to increase corn production in Perú. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 1-31. Recuperado de <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/2507>

Choudhary, M., Bailey, L., & Grant, C. (1996). Review of the use of swine manure in crop production: effects on yield and composition and on soil and water quality. *Waste Management & Research*, 14(6), 581-595. Recuperado de <https://doi.org/10.1177/0734242X9601400606>

El Peruano (2017), *Decreto Supremo que aprueba el Reglamento para el reaprovechamiento de los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales Decreto Supremo N° 015-2017-Vivienda*, Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/06/DS-015-2017-VIVIENDA.pdf>

- FAO. (n.d.). *Sandy soils*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado de <https://www.fao.org/4/aq285e/aq285e.pdf>
- García, P., Saldaña, C., Pérez, I., Prieto, G., Medina, D., Manayay, D., Taramona, L. (2023). Genetic diversity and population structure of maize landraces from Huancavelica and Cajamarca provinces of Peru using SNP markers. *Plant Genetic Resources*, 23(4), 262–270. <https://doi.org/10.1017/S1479262125000024>
- Gascó, G., Paz, J., Cely, P., Plaza, C., & Mendez, A. (2016). Pig manure biochar effects on soil CO₂ emissions and enzymes, *Ecological Engineering*, 95, 19–24. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.039>
- Gil, L., Leiva, F., Lezama, M., Bardales, C., y León, C. (2023). Biofertilizante “biol”: caracterización física, química y microbiológica, *ALFA*, 7(20), 336-345. Recuperado de <http://www.scielo.org/bo/pdf/arca/v7n20/a5-336-345.pdf>
- Głąb, T., & Gondek, K. (2008). Effect of organic amendments on morphometric properties of macropores in stagnic gleysol soil. *Pol. J. environ. Stud*, 17(2), 209-214. Recuperado de <http://www.pjoes.com/pdf-88097-21955?filename=21955.pdf>
- Gondek, K., & Mierzwa, M. (2016). Effect of low-temperature biochar from pig manure on heavy metals in sandy soil, *Soil Use and Management*, 32 (3), 357-367. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/sum.12285>
- Gondek, K., Mierzwa, M., Kopeć, M., Sikora, J., Głąb, T., & Szczurowska, K. (2019). Influence of biochar application on reduced acidification of sandy soil, increased cation exchange capacity, and the content of available forms of K, Mg, and P. *Pol. J. Environ. Stud*, 28(1), 1-9. Recuperado de <https://doi.org/10.15244/pjoes/81688>
- Han, M., Zhang, J., Zhang, L., & Wang, Z. (2023). Effect of biochar addition on crop yield, water and nitrogen use efficiency: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 420, 138425. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.132583>
- Hoque, M., Saha, B., Scopa, A., & Drosos, M. (2025). Biochar in agriculture: a review on sources, production, and composites related to soil fertility, crop productivity, and

- environmental sustainability. *C*, 11(3), 50. <https://www.mdpi.com/2311-5629/11/3/50>
- Huang, J., & Hartemink, A. (2020). Soil and environmental issues in sandy soils. *Earth-Science Reviews*, 208, 103295. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001282522030341X>
- Jaufmann, E., Schmid, H., & Hülsbergen, K. (2025). Soil carbon accrual and yield response to biochar and compost in a four-year organic field study. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1-23. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s10705-025-10418-4>
- Kabir, E., Kim, K., & Kwon, E. (2023). Biochar as a tool for the improvement of soil and environment. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1324533. Recuperado de <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2023.1324533/full>
- Khademalrasoul, A., Naveed, M., Heckrath, G., Kumari, K., Jonge, L., Elsgaard, L., Vogel, H., Iversen, B. (2014). Biochar and swine manure effects on soil aggregate properties, *Soil Science*, 179, 273–283. Recuperado de https://journals.lww.com/soilsci/Abstract/2014/06000/Biochar_Effects_on_Soil_Aggregate_Properties_Under,1.aspx
- Kheoruenromne, I., Suddhiprakarn, A., & Kanghae, P. (1998). Properties, environment and fertility capability of sandy soils in Northeast Plateau, Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 32(3), 355-373. Recuperado de <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/anres/article/view/240585>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: an introduction. *In Biochar for environmental management*. 1-13. Recuperado de <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.4324/9780203762264-1/biochar-environmental-management-introduction-johannes-lehmann-stephen-joseph>
- Lemos, A., Freitas, D., Adeyemo, A., & Silva, D. (2025). Evaluating potentially toxic elements under prolonged application of pig manure in Brazilian soils. *Discover Applied Sciences*, 7(11), 1373. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07048-4>

- Leveau, M., Dumler, S., Anaya, R., Alegre, J., y Ladd1, B. (2021). Uso de biocarbón en el balance de nitrógeno en suelos aluviales de San Ramón / Chanchamayo / Perú, *Ecología Aplicada*, 20(2), 179-188. Recuperado de <https://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/eau/article/download/1808/2332/5548>
- Liang, D., Ning, Y., Ji, C., Zhang, Y., Wu, H., Ma, H., & Wang, J. (2024). Biochar and manure co-application increases rice yield in low productive acid soil by increasing soil pH, organic carbon, and nutrient retention and availability. *Plants*, 13(7), 973. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/7/973>
- Liu, L., Li, J., Wu, G., Shen, H., Fu, G., & Wang, Y. (2021). Combined effects of biochar and chicken manure on maize (*Zea mays* L.) growth, lead uptake and soil enzyme activities under lead stress, *Plant Biology*, 9. Recuperado de <https://doi.org/10.7717/peerj.11754>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI). (2025). *Observatorio Commodities – Maíz amarillo duro*, N° 01/2025. Recuperado de <https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/1985/1/Observatorio%20commodities-maiz-amarillo-duro-n-01-2025.pdf>
- Moreno, L., y Cadillo, J. (2018). Uso del estiércol porcino sólido como abono orgánico en el cultivo del maíz chala, *Anales Científicos*, 79(2), 415-419. Recuperado de <https://doi.org/10.21704/ac.v79i2.914>
- Musei, S., Kuyah, S., Nyawira, S., Ng'ang'a, S., Karugu, W., Smucker, A., & Nkurunziza, L. (2024). Sandy soil reclamation technologies to improve crop productivity and soil health: a review. *Frontiers in soil science*, 4, 1345895. Recuperado de <https://www.frontiersin.org/journals/soil-science/articles/10.3389/fsoil.2024.1345895/full>
- Ouyang, Y., Reeve, J., & Norton, J. (2022). The quality of organic amendments affects soil microbiome and nitrogen-cycling bacteria in an organic farming system. *Frontiers in Soil Science*, 2, 869136. Recuperado de <https://www.frontiersin.org/journals/soil-science/articles/10.3389/fsoil.2022.869136/full>

- Pandian, K., Vijayakumar, S., Mustaffa, M., Subramanian, P., & Chitraputhirapillai, S. (2024). Biochar—a sustainable soil conditioner for improving soil health, crop production and environment under changing climate: a review. *Frontiers in soil science*, 4, 1376159. <https://www.frontiersin.org/journals/soil-science/articles/10.3389/fsoil.2024.1376159/full>
- Parvej, M., Brandt, D., Myers, R., Nelson, K., Singh, G., & Reinbott, T. (2023). *Soil Organic Carbon: A Foundational Indicator of Soil Health*. Recuperado de <https://extension.missouri.edu/publications/g9071>
- Peña, M. (2023). *Efecto del efluente líquido porcino en el crecimiento inicial del maíz para forraje en condiciones del valle de Huaura* (tesis de pregrado). Recuperado de <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20,500,14067/8996/TESIS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rehman, A., Nawaz, S., Alghamdi, H., Alrumman, S., Yan, W., & Nawaz, M. (2020). Effects of manure-based biochar on uptake of nutrients and water holding capacity of different types of soils. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, 100036. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016420300347>
- Rollon, R., Malig-On, P., Guindang, P., & Dolorito, R. (2020). Corn (*Zea mays* L.) growth, nutrient uptake and soil fertility improvement of strongly acidic soil applied with biochar and animal manure. *Journal of Applied Biology & Biotechnology*, 8(02), 35-40. Recuperado de https://jabonline.in/admin/php/uploads/451_pdf.pdf
- Salazar, E., Fortis, M., Vásquez, A., Vásquez, C. (2003). *Abonos Orgánicos y Plasticultura*, Recuperado de https://www.smcsmx.org/files/books/abonos_org.pdf
- Scotti, R., Bonanomi, G., Scelza, R., Zoina, A., & Rao, M. (2015). Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agricultural systems. *Journal of soil science and plant nutrition*, 15(2), 333-352. Recuperado de https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-95162015000200005&script=sci_arttext

- Shao, Z., Zhang, X., Nasar, J., & Gitari, H. (2024). Synergetic Effect of Potassium, Biochar and Cattle Manure on the Growth and Yield of Maize, and Soil Physio-Chemical Characteristics. *Plants*, 13(23), 3345. <https://www.mdpi.com/2223-7747/13/23/3345>
- Soil, Q., & Water. (s. f.). *Cation exchange capacity*. <http://www.soilquality.org.au/factsheets/cation-exchange-capacity>
- Troy, S., Lawlor, P., O'Flynn, C., & Healy, M. (2014). The impact of biochar addition on nutrient leaching and soil properties from tillage soil amended with pig manure. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225(3), 1900. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-014-1900-6>
- Uzoma, K., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil, *Soil Use and Management*, 27(2), 205-212. Recuperado de <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00340.x>
- Van, L. (2018). The long-term role of organic amendments in addressing soil constraints to production. *Nutrient cycling in Agroecosystems*, 111(2), 99-102. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/s10705-018-9934-6>
- Wu, J., Wang, M., Li, P., Shen, L., Ma, M., Xu, B., & Huang, S. (2022). Effects of Pig Manure and Its Organic Fertilizer Application on Archaea and Methane Emission in Paddy Fields. *Land*, 11(4), 499. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/land11040499>
- Yost, J., Schmidt, A., Koelsch, R., & Schott, L. (2022). Effect of swine manure on soil health properties: A systematic review. *Soil Science Society of America Journal*, 86(2), 450-486. Recuperado de <https://doi.org/10.1002/saj2.20359>
- Yue, X., Liu, X., Wang, F., Shen, C., & Zhang, Y. (2023). Contrasting effects of organic materials versus their derived biochars on maize growth, soil properties and bacterial community in two type soils. *Frontiers in Microbiology*, 14, 1174921. <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2023.1174921/full>

ANEXOS

Tabla58*Datos de campo*

Biocarbón	Estiércol de cerdo	Bloque	Altura de planta (cm)	Peso fresco de follaje (g)	Peso fresco de raíz (g)	Peso fresco total (g)	Diámetro (cm)	Peso seco de follaje (g)	Peso seco de raíz (g)	Peso seco total (g)	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total
Sin	0	1	57,20	231,00	28,00	259,00	3,18	25,54	6,72	32,26	30,70	5,20	35,90
Sin	0	2	61,40	222,00	31,00	253,00	3,50	24,04	6,29	30,33	33,90	8,60	42,50
Sin	0	3	66,20	238,00	23,00	261,00	3,18	29,03	6,54	35,57	31,30	4,50	35,80
Sin	0	4	62,00	235,00	27,00	262,00	3,50	26,63	7,02	33,65	32,90	9,00	41,90
Sin	5	1	63,30	207,00	30,00	237,00	3,50	25,88	5,07	30,95	36,60	5,00	41,60
Sin	5	2	67,40	230,00	31,00	261,00	2,55	19,42	6,41	25,83	31,90	8,00	39,90
Sin	5	3	62,80	189,00	24,00	213,00	3,18	24,23	8,43	32,66	37,40	9,40	46,80
Sin	5	4	64,30	290,00	43,00	333,00	2,86	22,78	7,72	30,50	32,50	4,60	37,10
Sin	10	1	64,40	245,00	35,00	280,00	3,50	23,56	7,01	30,57	33,10	4,80	37,90
Sin	10	2	69,70	252,00	36,00	288,00	3,18	20,33	7,85	28,18	35,30	4,70	40,00
Sin	10	3	62,20	225,00	33,00	258,00	3,18	24,37	9,81	34,18	32,50	4,60	37,10
Sin	10	4	66,30	217,00	42,00	259,00	3,56	15,34	5,19	20,53	34,10	8,40	42,50
Sin	15	1	67,80	245,00	41,00	286,00	3,50	16,83	6,95	23,78	36,30	9,90	46,20
Sin	15	2	64,60	248,00	38,00	286,00	3,23	21,16	10,71	31,87	35,00	8,20	43,20
Sin	15	3	69,20	251,00	37,00	288,00	3,50	18,86	6,46	25,32	37,80	9,70	47,50
Sin	15	4	66,30	220,00	39,00	259,00	3,18	22,20	8,56	30,76	37,00	9,40	46,40
Con	0	1	55,50	160,00	17,00	177,00	3,18	14,98	5,29	20,27	33,80	5,50	39,30
Con	0	2	56,20	113,00	29,00	142,00	3,18	11,50	2,75	14,25	35,80	5,60	41,40
Con	0	3	51,00	160,00	32,00	192,00	2,86	15,97	5,11	21,08	34,50	10,60	45,10
Con	0	4	51,40	156,00	30,00	186,00	2,55	16,38	4,83	21,21	34,10	5,20	39,30
Con	5	1	70,10	310,00	38,00	348,00	3,50	21,04	5,83	26,87	36,40	10,90	47,30
Con	5	2	70,40	265,00	36,00	301,00	3,50	24,86	6,70	31,56	38,50	9,70	48,20
Con	5	3	70,60	236,00	39,00	275,00	3,76	22,46	6,63	29,09	37,90	9,20	47,10
Con	5	4	64,50	245,00	33,00	278,00	3,55	26,12	7,72	33,84	35,20	5,60	40,80
Con	10	1	69,20	282,00	45,00	327,00	3,45	28,18	7,39	35,57	33,60	7,90	41,50
Con	10	2	60,00	262,00	43,00	305,00	3,38	25,72	7,01	32,73	35,10	5,40	40,50
Con	10	3	65,50	250,00	39,00	289,00	3,66	25,86	7,74	33,60	39,90	8,30	48,20
Con	10	4	69,50	253,00	48,00	301,00	3,75	24,83	7,89	32,72	37,90	6,30	44,20
Con	15	1	62,00	255,00	49,00	304,00	3,55	25,98	6,79	32,77	38,50	5,80	44,30
Con	15	2	68,20	249,00	43,00	292,00	3,23	28,51	6,02	34,53	39,00	6,80	45,80
Con	15	3	69,00	262,00	46,00	308,00	3,76	25,89	6,22	32,11	37,40	7,50	44,90
Con	15	4	63,00	262,00	43,00	305,00	3,18	25,66	5,37	31,03	37,70	8,80	46,50