

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Ambiental



TESIS

“Efecto de un biocarbón y dos encalantes comerciales en la emisión de CO₂ y propiedades químicas de un suelo ácido asociado al cultivo de Zea Mays L. (maíz)”

Para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental.

Elaborado por

Jannet Julissa Rupay Condor

 [0009-0007-6365-5994](https://orcid.org/0009-0007-6365-5994)

Asesor

MSc. Teodosio Celso Quispe Ojeda

 [0000-0002-8345-4627](https://orcid.org/0000-0002-8345-4627)

Asesor externo

MSc. Roberto Carlos Cosme De La Cruz

 [0000-0002-5774-9325](https://orcid.org/0000-0002-5774-9325)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Rupay Condor [1]
Referencia/Reference	[1] J. Rupay Condor, " <i>Efecto de un biocarbón y dos encalantes comerciales en la emisión de CO2 y propiedades químicas de un suelo ácido asociado al cultivo de Zea Mays L. (maíz)</i> ". [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Rupay, 2025)
Referencia/Reference	Rupay, J. (2025). <i>Efecto de un biocarbón y dos encalantes comerciales en la emisión de CO2 y propiedades químicas de un suelo ácido asociado al cultivo de Zea Mays L. (maíz)</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*A Dios, por su guía y cada oportunidad
brindada.*

*A mis padres Ana y Alejandro, y hermano
Christian, por su amor, valores y apoyo
incondicional, cuyo esfuerzo brindado dan
lugar a los logros que consigo.*

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis compañeros y amigos que me han apoyado en el desarrollo de la presente investigación.

Al proyecto de suelos y aguas del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), en especial al MSc Roberto Cosme De La Cruz (responsable Nacional del Programa Presupuestal 089 “Reducción de la degradación de los suelos agrarios”), MSc Wendy Pérez Porras e ingeniero José Quintanilla Rosas por su apoyo, asesoría y darme la oportunidad de desarrollar mi tesis en la institución.

Al ingeniero Celso Quispe por brindarme sus conocimientos en la etapa universitaria y apoyo en el desarrollo de la tesis.

A todo el equipo del Laboratorio de Agua, Suelos y Foliaves del INIA (LABSAF), que me ayudaron en el trabajo de campo y análisis de suelo para la presente investigación.

A la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Ingeniería por la educación brindada durante mi formación profesional y ser parte de mi vida.

Resumen

La presente investigación se realizó en la sede Central del Instituto Nacional de Innovación agraria (INIA), con el objetivo de determinar el efecto de un biocarbón y dos encalantes comerciales en la emisión de CO₂ y propiedades químicas de un suelo ácido asociado al cultivo *Zea mays* L. (maíz). Se realizaron ensayos en vivero, donde se probaron tratamientos con dolomita, cal y biocarbón, además se incluyó al tratamiento sin enmienda (testigo). Se aplicó el diseño completamente al azar y se utilizó la prueba de Duncan. Los resultados de emisión de CO₂ temporal fue significativamente mayor para las tres enmiendas respecto al testigo, biocarbón (313,79%), cal agrícola (114,48%) y dolomita (112,07%). Asimismo, en CO₂ acumulado, el biocarbón presentó el mayor valor (46,9%). Respecto a las propiedades química del suelo ácido, los tratamientos con biocarbón presentaron mayores valores con diferencias significativas respecto a los otros tratamientos en conductividad eléctrica, fósforo disponible, potasio disponible, y el catión intercambiable K⁺; asimismo, los tratamientos con dolomita presentaron diferencias significativas respecto a los otros tratamientos en la CIC y el catión intercambiable Mg²⁺; por último, los tratamiento con biocarbón, dolomita y cal presentaron bajo contenido del catión intercambiable Al³⁺. Respecto al crecimiento del cultivo, los tratamientos con biocarbón presentaron diferencias significativas en el número de hojas, diámetro de tallo, peso fresco de tallo y fruto y, peso seco de tallo y fruto. Los resultados en peso fresco y seco del fruto de los tratamientos con biocarbón, fueron cerca de 5 y 9 veces mayor al testigo.

Palabras clave: Biocarbón; materiales encalantes; acidez; GEI; maíz.

Abstract

This research was conducted at the headquarters of the National Institute for Agricultural Innovation (INIA) to determine the effect of a biochar and two commercial liming agents on CO₂ emissions and the chemical properties of an acidic soil grown in the maize crop *Zea mays* L. Nursery trials were conducted, testing treatments with dolomite, lime, and biochar, and including a control treatment without amendments. A completely randomized design was used, employing the Duncan test. The results for temporal CO₂ emissions were significantly higher for all three amendments compared to the control: biochar (313.79%), agricultural lime (114.48%), and dolomite (112.07%). Furthermore, biochar had the highest cumulative CO₂ value (46.9%). Regarding the chemical properties of acidic soil, biochar treatments showed higher values with significant differences compared to the other treatments in electrical conductivity, available phosphorus, available potassium, and the exchangeable cation K⁺; likewise, dolomite treatments showed significant differences compared to the other treatments in CEC and the exchangeable cation Mg²⁺; finally, the biochar, dolomite, and lime treatments presented low contents of the exchangeable cation Al³⁺. Regarding maize growth, the biochar treatments showed significant differences in the number of leaves, stem diameter, fresh weight of stem and fruit, and dry weight of stem and fruit. The results in fresh and dry weight of fruit in the biochar treatments were approximately 5 and 9 times greater than the control.

Keywords: Biocarbón; liming material; acidity; GHG; maize.

Tabla de Contenido

Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xi
Capítulo I. Parte Introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	2
1.3 Formulación de la pregunta de investigación	3
1.3.1. Problema general	3
1.3.2. Problemas específicos	3
1.4 Objetivos	3
1.4.1 Objetivo general	3
1.4.2 Objetivos específicos	3
1.5 Hipótesis (general y específicos)	4
1.5.1 Hipótesis general	4
1.5.2 Hipótesis específicas	4
1.6 Antecedentes investigativos	4
Capítulo II. Marco teórico y conceptual	9
2.1 Marco teórico	9
2.1.1 Emisión de CO ₂ del suelo	9
2.1.2 Suelos ácidos	12
2.1.3 Encalado de suelos ácidos	16
2.1.4 Biocarbón	20
2.2 Marco conceptual	22
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	24
3.1 Lugar de ejecución del estudio	24
3.2 Suelo ácido	24
3.3 Materiales encalantes	27
3.4 Determinación de las dosis de material encalante	30
3.5 Factores o variables en estudio	30
3.6 Materiales, insumo y equipos	32
3.7 Metodología	32
3.8 Diseño de investigación	33
3.9 Análisis de datos	33
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	34
Conclusiones	65
Recomendaciones	66

Referencias bibliográficas	67
Anexos	72

Lista de Tablas

Tabla 1. Características físicas – químicas del suelo ácido	26
Tabla 2. Características de materia orgánica del biocarbón	29
Tabla 3. %CaCO ₃ equivalente de la cal y dolomita agrícola	29
Tabla 4. Diseño experimental de la evaluación de los materiales encalante por dosis	30
Tabla 5. Diseño experimental de la evaluación de los materiales encalante por repeticiones	30
Tabla 6. Promedio de pH de los tratamientos después de la incubación y cosecha	37
Tabla 7. Características de textura de los tratamientos.	52
Tabla 8. Resumen de caracterización fisicoquímica asociada a la fertilidad del suelo	53
Tabla 9. Características agronómicas del maíz luego de la aplicación de enmiendas.	64

Lista de Figuras

Figura 1. Carbono del suelo en el ciclo global del carbono para 2013 – 2022, flujos anuales en GtC/año	9
Figura 2. Comportamiento de las formas monoméricas del Al con respecto al pH de una solución	15
Figura 3. Ubicación del suelo ácido utilizado en el ensayo	25
Figura 4. Emisiones de CO ₂ temporal de un suelo con cultivo luego de la incorporación de enmiendas en un suelo ácido	34
Figura 5. Emisiones de CO ₂ acumulado de un suelo con cultivo luego de la incorporación de enmiendas en un suelo ácido	35
Figura 6. Promedio de pH de los tratamientos después de la incubación y cosecha	38
Figura 7. Comportamiento del promedio de pH de los tratamientos durante el experimento	39
Figura 8. Promedio de conductividad eléctrica de los tratamientos.	40
Figura 9. Promedio de materia orgánica de los tratamientos	41
Figura 10. Promedio de nitrógeno de los tratamientos	42
Figura 11. Promedio de fósforo disponible de los tratamientos	43
Figura 12. Promedio de potasio disponible de los tratamientos	45
Figura 13. Promedio de capacidad de intercambio catiónico de los tratamientos	46
Figura 14. Promedio del catión intercambiable de calcio de los tratamientos	47
Figura 15. Promedio de catión intercambiable de magnesio de los tratamientos	48
Figura 16. Promedio de catión intercambiable de potasio de los tratamientos.	49
Figura 17. Promedio de catión intercambiable de sodio de los tratamientos	50
Figura 18. Promedio de catión intercambiable de aluminio de los tratamientos	51
Figura 19. Promedio de altura del cultivo de los tratamientos	54
Figura 20. Promedio de número de hojas del cultivo de los tratamientos	55
Figura 21. Promedio de diámetro de tallo del cultivo de los tratamientos	56
Figura 22. Promedio del peso fresco de hojas del cultivo de los tratamientos	57
Figura 23. Promedio del peso fresco de tallo del cultivo de los tratamientos	58
Figura 24. Promedio del peso fresco de fruto del cultivo de los tratamientos	59
Figura 25. Promedio del peso seco de hojas del cultivo de los tratamientos	60
Figura 26. Promedio del peso seco de tallo del cultivo de los tratamientos	61
Figura 27. Promedio del peso seco de fruto del cultivo de los tratamientos	62
Figura 28. Promedio del área foliar del cultivo de los tratamientos	63

Introducción

Aproximadamente el 50% de suelos cultivables en el mundo, son clasificados como ácidos (Y. Wang et al., 2021). Son varias las causas de generación de acidez, siendo una de ellas cuando la precipitación supera la evapotranspiración, y lixivia las bases intercambiables del suelo en cantidades significativas (Desalegn et al., 2023). Un indicador de la acidez del suelo es el pH, es importante conocer el pH del suelo dado que tiene una gran influencia en la solubilidad de los minerales y la disponibilidad de nutrientes, además de la disponibilidad de cationes intercambiables (Ca, Mg, K) y micronutrientes (Arévalo-Gardini et al., 2015)

Para corregir la acidez del suelo, se utilizan materiales encalantes, como la cal y dolomita agrícola, ello puede promover la mineralización de la materia orgánica, lo cual se evidencia en la generación de CO₂ (H. Wu et al., 2021), dado que las condiciones de pH se vuelven favorables para la actividad biológica, se estimula la respiración del suelo y como resultado podría disminuir su stock de carbono (Yang et al., 2022a). Por otro lado, se encuentran alternativas de enmiendas orgánicas con potencial para encalar el suelo, como es el biocarbón, que incrementan la materia orgánica en el suelo (MOS) y a la vez aumenta el stock de carbono (Bolan et al., 2022). Este efecto mejorador en los suelos ácidos se debe principalmente a la disolución de carbonatos, óxidos e hidróxidos de la fracción de ceniza del biocarbón y uso potencial por microorganismos (Bolan et al., 2023). Asimismo, la tasa de emisión de CO₂ por la aplicación de enmiendas orgánicas, depende de varios factores, dentro de ellos se encuentran las condiciones ambientales, las características y cobertura de suelo, el tipo de enmienda y la tasa de incorporación (Ray et al., 2020a).

La presente tesis lleva el título de “Efecto de un biocarbón y dos encalantes comerciales en la emisión de CO₂ y propiedades químicas de un suelo ácido asociado al cultivo de *Zea mays* L. (maíz)”. La investigación ha tenido el propósito evaluar el impacto ambiental de la incorporación de las enmiendas agrícolas (dolomita, cal y biocarbón), y

para ello se ha convenido realizar la medición de la emisión de CO₂ temporal, CO₂ acumulado y las características asociadas a la fertilidad del suelo ácido. Se prevé el uso de biochar en cultivos anuales para una aplicación futura más extendida, es por ello que se consideró el uso del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) como parte del estudio.

Capítulo I. Parte Introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

Según la FAO, en el 2015, mencionó que en América Latina y el Caribe se encuentra alrededor del 14 % de tierras degradadas del mundo. Dentro de las principales causas se encuentran la erosión hídrica, uso intensivo de agroquímicos y la deforestación, los cuales como resultado generan una reducción de la cobertura vegetal, la disminución de nutrientes, agotamiento de la reserva, etc. Asimismo, la FAO menciona que el 95% de nuestros alimentos provienen del suelo, es por ello crucial detener su degradación. Por otro lado, en el año 2022, como parte de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Biodiversidad (COP15) se concluyó el pacto de proteger el 30% de la superficie terrestre y marina antes del 2030 para preservar la biodiversidad, lo cual será un gran logro para nuestros bosques, nuestra fauna, nuestros mares y suelo.

Ante ello, con la presente investigación se tiene como propósito generar información sobre el manejo y recuperación de suelos agrícolas degradados por acidez, y a su vez, haya una adecuada gestión en la emisión de gases de efecto invernadero durante la recuperación de estos, alineado al ODS 13 (Acción por el clima), ODS 2 (Hambre cero) y ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres). La propuesta de la investigación es evaluar el efecto de un biocarbón y dos encalantes comerciales (dolomita y cal agrícola) en la emisión de CO₂ y propiedades químicas de un suelo ácido asociado al cultivo maíz, a nivel de invernadero. De esta manera se permitirá identificar que enmienda genera menor emisión de CO₂ y a su vez, mejoren las propiedades químicas y el rendimiento del cultivo en suelos ácidos. Los valores obtenidos servirán como referencia para la implementación de experimentos en campo.

Además, la investigación contribuye con brindar información a los pequeños o medianos agricultores, sobre los resultados del uso del biocarbón, ya que ellos podrían

reutilizar sus residuos agrícolas para la producción de biocarbón y mejorar los indicadores de la salud del suelo, haciendo que sus suelos puedan restablecer su capacidad productiva de manera sostenible.

1.2 Descripción del problema de investigación

En el mundo, aproximadamente el 50% de suelos cultivables son clasificados como ácidos (Y. Wang et al., 2021). Dentro de las causas de la acidez del suelo sucede cuando la precipitación supera la evapotranspiración, y lixivia las bases intercambiables del suelo en cantidades significativas (Desalegn et al., 2023). Un indicador de la acidez de suelo, es el pH, la cual su variación depende de las propiedades del suelo, la cobertura vegetal, la deposición de materia que acidifica el suelo y las condiciones del clima. El pH del suelo tiene una gran influencia en la solubilidad de los minerales y la disponibilidad de nutrientes, y es un indicador clave para la disponibilidad de cationes intercambiables (Ca, Mg, K) y micronutrientes (Arévalo-Gardini et al., 2015).

Los encalantes como la cal y dolomita agrícola pueden promover la mineralización de la materia orgánica, lo cual se evidencia en la generación de CO₂ (H. Wu et al., 2021), ello se demuestra dado que las condiciones de pH se vuelven favorables para la actividad biológica, se estimula la respiración del suelo y como resultado podría disminuir su stock de carbono (Yang et al., 2022a). Las enmiendas orgánicas como el biochar han probado tener potencial para incrementar el contenido de materia orgánica en el suelo (MOS), por tal razón, el uso de biochar se presenta como una alternativa interesante para elevar el pH de suelos ácidos y a la vez aumentar el stock de carbono (Bolan et al., 2022).

En ese sentido, con el fin de evaluar el impacto ambiental de la incorporación de la dolomita, cal y biocarbón en un suelo ácido, se realizó la medición de variación de la emisión de CO₂ temporal, CO₂ acumulado y las propiedades químicas de del suelo acido. Asimismo, el uso de biochar en cultivos anuales se prevé que sea la aplicación futura más

extendida, por tal, se consideró el uso del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) como parte del estudio.

1.3 Formulación de la pregunta de investigación

1.3.1. Problema general

- ¿Cuál es el efecto de un biocarbón y dos encalantes comerciales en la emisión de CO₂ y propiedades químicas de un suelo ácido con el cultivo de *Zea mays* L. (maíz)?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Los tratamientos con biochar, dolomita o cal generan cambios en la emisión de CO₂?
- ¿Cuáles son las características químicas finales de un suelo ácido asociado al cultivo de *Zea Mays* L. (maíz)?
- ¿Cuál es el efecto del biocarbón, dolomita o cal en el crecimiento del cultivo de *Zea Mays* L. (maíz)?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Determinar los efectos de un biocarbón y dos encalantes comerciales (dolomita y cal) en la emisión de CO₂ y propiedades químicas de un suelo ácido con el cultivo de maíz (*Zea mays*).

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar la emisión de CO₂ que produce el biocarbón, dolomita y cal de un suelo ácido asociado al cultivo de *Zea Mays* L. (maíz).
- Determinar el efecto del biocarbón, dolomita y cal en las características químicas finales de un suelo ácido asociado al cultivo de *Zea Mays* L. (maíz).
- Determinar los efectos del biocarbón, dolomita y cal en el crecimiento del cultivo de *Zea Mays* L. (maíz).

1.5 Hipótesis (general y específicos)

1.5.1 Hipótesis general

- El biocarbón, dolomita y cal generarán cambios en la emisión de CO₂ y mejorarán las propiedades químicas de un suelo asociado al cultivo de *Zea mays* L. (maíz).

1.5.2 Hipótesis específicas

- El biocarbón, dolomita y cal generarán un incremento en la emisión de CO₂.
- La aplicación del biocarbón, dolomita y cal modifican las propiedades químicas finales de un suelo ácido asociado al cultivo de *Zea Mays* L (maíz).
- La aplicación de un biocarbón, dolomita y cal generan cambios en el crecimiento del cultivo de *Zea Mays* L (maíz).

1.6 Antecedentes investigativos

Para reducir la acidez de suelos ácidos se utilizan enmiendas encalantes como la dolomita y cal agrícola. Como un primer paso se tiene que determinar las dosis de encalado para que el suelo alcance el pH requerido y neutralice el aluminio, para calcular la dosis requerida de cal, se utilizan curvas de incubación del suelo en dosis creciente de encalado (Rosas-Patiño et al., 2017), y requerimiento de encalado en laboratorio (Sadzawka et al., 2006). Además, es importante conocer el tiempo de reacción del encalante con el suelo ácido, de acuerdo a Rosas-Patiño et al (2017) la mayor reacción en su investigación se presentó después de 60 días, con la aplicación de 7Mg/ha que alcanzó un pH de 5,5 a 6,0, asimismo, el contenido de Al y Fe disminuyeron (Rosas-Patiño et al., 2017). En el estudio realizado por Castro y Guerrero, los tratamientos estuvieron compuestos por dolomitas calcinadas, dolomitas molidas, hidróxidos de calcio y magnesio, escorias básicas y cales vivas, cada uno con una dosis de 1,5 t ha⁻¹CaCO₃ equivalente y el tiempo de incubación fue de 40 días; los encalantes usados evidenciaron que las enmiendas simples presentaron efectos significativos sobre la neutralización de la acidez y elevación de la

concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} . Las enmiendas simples de hidróxidos de calcio y magnesio, y las escorias básicas presentaron un mejor control de la acidez en comparación al resto de encalantes (Castro & Guerrero, 2018).

Por otro lado, el biocarbón es una opción alternativa a los materiales encalantes, dado que es un producto obtenido a partir de los residuos de materiales forestales y agrícolas, y con aptitud de incrementar la materia orgánica del suelo. Para su incorporación al suelo ácido se tiene que determinar la dosis requerida para reducir la acidez y neutralizar aluminio. Núñez Balderas et al. utilizó 11 reactores de 50 mL, donde adicionó 10 g de residuo, 25 mL de agua desionizada y biocarbón con incremento al uno por ciento por reactor (p/p). Se construyeron gráficos de neutralización-incubación (pH vs. % biocarbón) para calcular la cantidad de biocarbón que se necesita para alcanzar un pH de 6,5 (Núñez Balderas et al., 2020).

Dentro de los estudios sobre el uso de biochar como una alternativa a los encalantes, encontramos que con el uso del biocarbón, los resultados presentaron que mejoró algunas propiedades químicas del suelo como pH, CIC, contenido de P, Ca, Mg, K y Zn, pero el Na no tuvo un incremento. Además, menciona que el biocarbón no es fuente de N, por lo que no permitió un adecuado desarrollo del maíz por la falta de este nutriente. Por otro lado, disminuyó el contenido de aluminio (Al) proporcional a las dosis de aplicación del biocarbón. En comparación con la cal, el tratamiento con cal tuvo mejores resultados en cuanto a pH, Al, Ca y Mg. Por tanto, se infiere que el biocarbón es recomendable para disminuir altas concentraciones de Al, mejorar el pH, además es posible que mejore la capacidad de absorción de nutrientes y secuestrar carbono a largo plazo (Alonso et al., 2016). Asimismo, también se evidenció que las propiedades ácidas del suelo mejoraron con biocarbón y cal, pero el biocarbón tuvo mejores resultados, dado que se obtuvo mayores aumentos del pH del suelo, respiración del suelo, concentraciones de fósforo (P), potasio (K) y magnesio (Mg) en el suelo (Wu et al., 2020). Otro estudio evidenció que,

todos los tratamientos incrementaron el rendimiento del maíz: siete veces para biocarbón, cinco veces para cal, cinco veces para biocarbón lavado y ocho veces para tratamiento con cenizas, en comparación con el control en todas las temporadas. El mejor desempeño del biocarbón en comparación con la cal, a pesar de que la cal presentó el pH más alto y la concentración más baja de Al^{3+} , puede explicarse por el K, Mg y P adicionales que el biocarbón agrega al suelo. Los resultados también mostraron un claro efecto de adición de nutrientes donde la ceniza agregó la mayor cantidad de nutrientes (Hale et al., 2020).

La adición de enmiendas al suelo es utilizada para aumentar la fertilidad del suelo, sin embargo, estas influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En el estudio de Z. Wang, se evaluó el efecto de la hoja de bambú y las aplicaciones de biocarbón derivadas en la salida de CO_2 del suelo en una plantación de castaños chinos por 12 meses, los resultados evidenciaron que el tratamiento con hojas aumentó la salida de CO_2 , en cuanto al tratamiento con biocarbón, en el primer mes después de la aplicación, aumentó la salida de CO_2 del suelo. Asimismo, la emisión acumulada anual de CO_2 del suelo aumentó en un 16 % con el tratamiento de hojas de bambú en comparación con el control, sin embargo, no hubo diferencia entre los tratamientos biocarbón y control. Por otro lado, el almacenamiento de C orgánico del suelo (COS) aumentó con la adición de biocarbón, pero no con la adición de hojas de bambú. En comparación con la aplicación de hojas de bambú frescas, la aplicación de biocarbón disminuyó las emisiones de CO_2 y aumentó el secuestro de C en el suelo (Z. Wang et al., 2014). Asimismo, en el estudio de Biasi C., los resultados mostraron que la cal puede contribuir significativamente en la salida de CO_2 del suelo. En el laboratorio, más del 50 % de la salida de CO_2 se atribuyó a los carbonatos de cal durante la incubación a corto plazo. Las emisiones de CO_2 derivadas de la cal fueron mucho más bajas en el campo y solo se detectaron durante los primeros (2 a 4) meses después de la aplicación. Sin embargo, un máximo del 12% de las emisiones mensuales de CO_2 de las turberas cultivadas procedían de la cal. Las tasas de respiración biótica fueron similares en suelos encalados y no encalados, lo que sugiere que un pH más

alto no aumentó, al menos a corto plazo, las pérdidas de carbono de los suelos de turba cultivada. La fertilización y la acidificación adicionales no contribuyeron a una mayor liberación de CO₂ de la cal. Según las estimaciones, aproximadamente una sexta parte de la cal aplicada se liberaría como CO₂ de las turberas gestionadas, y todas las emisiones derivadas de la cal se producirían durante el primer año de aplicación (equivalente a aproximadamente el 4,6 % de las pérdidas anuales totales de CO₂ del suelo). Este estudio pone en evidencia que existe un gran riesgo de sobrestimar la actividad microbiana heterótrofa en suelos encalados al medir la liberación de CO₂ sin separar la producción de CO₂ abiótico y biótico (Biasi et al., 2008).

Por otro lado, en el estudio de Saarnio, se informa que, de manera general, los biocarbón de alta temperatura con alto contenido de C, aromaticidad y capacidad de sorción probablemente disminuirán la liberación de GEI, mientras que los biocarbón de baja temperatura se degradarán más fácilmente, proporcionando sustratos para los microbios y, por lo tanto, promoviendo la producción de GEI al menos a corto plazo. Además, concluye que, se necesitan más experimentos de campo para verificar los impactos netos a largo plazo de la incorporación de biocarbón en la liberación de GEI de suelos agrícolas gestionados normalmente (Saarnio, 2015). En el estudio de Wang se evaluó la reacción de la enmienda de biocarbón de paja de trigo con fertilizante (mezcla de urea y nitrapirina). Los resultados, evidenciaron un aumento de salida de CO₂ del suelo en un promedio de 19 %. Asimismo, la incorporación de biocarbón incrementó el contenido C en el suelo ácido (promedio de 11,1 Mg C/ha) en relación con los tratamientos sin incorporación de biocarbón (promedio de 2,2 Mg C/ha). Por tanto, se concluyó que la adición de biocarbón en suelo ácido bajo el cultivo intensivo de vegetales contribuye al secuestro de C del suelo, sin embargo, solo tiene efectos pequeños tanto en el crecimiento de las plantas como en las emisiones de gases de efecto invernadero (J. Wang et al., 2015).

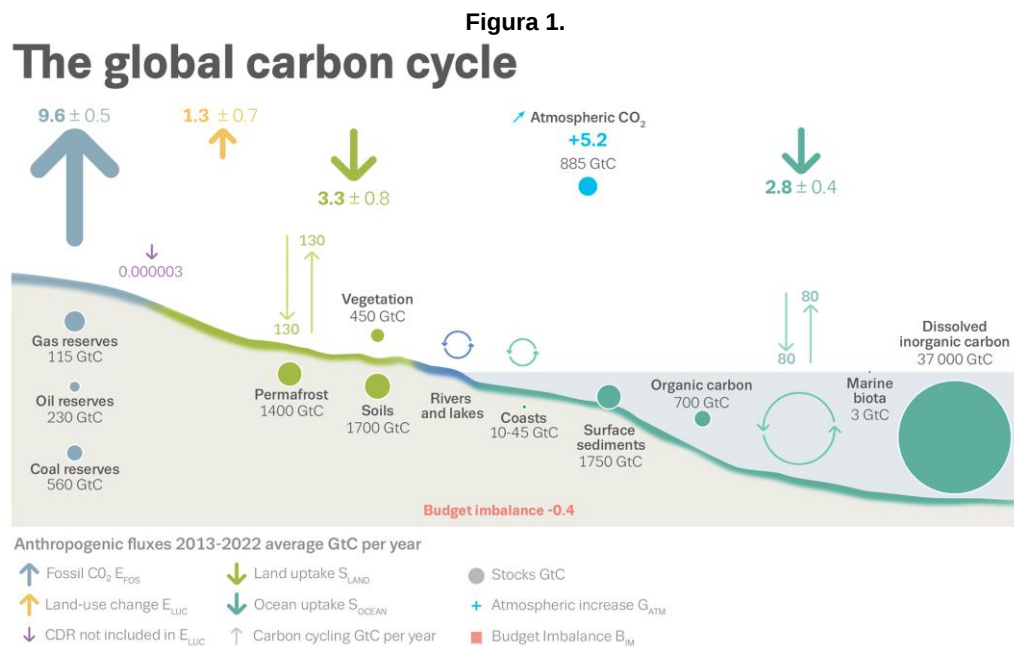
Por último, para poder determinar la medida de emisión de CO₂, Yazdanpanah utilizó el método de incubación-absorción alcalina, para ello se realizó el muestreo de suelo a profundidades de 0 a 15 cm, se tomaron muestras de suelo (100 g) al 75% de la capacidad de campo, se colocaron a 25 °C durante 7 días en frascos herméticos; la emisión de CO₂ queda atrapado en exceso de NaOH 0,5 N. El álcali se titula con HCl (con el indicador de fenolftaleína) en presencia de BaCl₂ para precipitar el carbonato. Posteriormente, la emisión de CO₂ se calculó por diferencia entre muestras y blancos sin suelo (Yazdanpanah, 2016).

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Emisión de CO₂ del suelo

El ciclo de carbono en la tierra se representa como en la Figura 1, según el cual implica al suelo, vegetación, océano y la atmósfera. Se estima la presencia de carbono en el suelo alrededor de 1 700 PgC a 1 m de profundidad, siendo mayor que el contenido de carbono en la atmósfera (aproximadamente 885 PgC) y la vegetación terrestre (450 PgC) (Friedlingstein et al., 2023).



Carbono del suelo en el ciclo global del carbono para 2013 – 2022, flujos anuales en GtC/año

Fuente: Friedlingstein et al., 2023.

La circulación de carbono orgánico terrestre y la atmósfera es positivo cuando hay captura de estos y negativo cuando se genera la emisión de CO₂ (FAO, 2002).

Cuando hablamos de respiración del suelo, nos referimos a la liberación de CO₂ del suelo hacia la atmósfera (Raich & Schlesinger, 1992), la cual incluye dos componentes: respiración heterótrofa o microbiana, la cual incluye la descomposición de hojarascas y

materia orgánica del suelo (MOS), y por otro lado se encuentra la respiración autótrofa o radicular, que es la salida de carbono de las raíces y sus simbiontes (Zhou et al., 2016).

Debido al proceso biológico complejo de la respiración del suelo, esta se ve afectada por una variedad de factores. Entre los cuales se encuentran la temperatura, humedad, aireación, materia orgánica, pH, organismos, uso de suelo, fertilidad, entre otros (Fang Jingyun et al., 1998).

Debido que a lo largo de los años las características del clima han ido cambiando, es difícil predecir los efectos en el suelo debido a la complejidad; por ejemplo, ante una elevada temperatura, se genera una descomposición de la materia orgánica más rápida por el aumento de las funciones de los microorganismos en el suelo. Ante dichos cambios, se eleva la emisión de CO_2 y CH_4 debido a la respiración del suelo, por otro lado, también se ve el efecto de estimular el crecimiento de las plantas y aumentar la captura de carbono y generar aportes en el suelo.

En la respiración del suelo, también influye la humedad, dado que en condiciones secas la salida de CO_2 del suelo es bajo; sin embargo, en condiciones intermedias de humedad en el suelo, este alcanza el máximo nivel, y ante condiciones altas de humedad, disminuye la emisión de CO_2 , ya que predomina las condiciones anaeróbicas que disminuyen las funciones microbianas aeróbicas. Asimismo, para que se encuentre en una condición óptima, el suelo suele estar cerca a la capacidad de campo, donde se encuentre en su mayoría los espacios de los macroporos llenos en su mayoría de agua, lo va a facilitar la difusión de sustratos solubles (Luo & Zhou, 2006).

Otro factor es el pH del suelo, ello va a regular las reacciones químicas y la variedad de enzimas en los microorganismos. Las bacterias más conocidas generalmente su crecimiento se evidencia dentro del intervalo desde 4 a 9 unidades de pH. Entre el rango

de 4 a 6 unidades de pH, se encuentran los hongos, siendo moderadamente acidófilos. Por tanto, la característica de pH del suelo tiene una influencia en el desarrollo de los microorganismos que se encuentran en el suelo, y como consecuencia en su respiración (Luo & Zhou, 2006). De acuerdo a lo citado por Luo & Zhou (2006), cuando los suelos se encuentran con un pH de 3, la generación de CO₂ será de 2 a 12 veces menor que los suelos que presentan un pH 4, por el efecto contrario que genera un pH bajo en la actividad de los microorganismos (Sitaula et al. 1995). Por otro lado, se encontró que la emisión de CO₂ generalmente aumenta con el pH cuando es inferior a 7 y disminuye con el pH del suelo por encima de 7 (Kowalenko e Ivarson 1978). La emisión de CO₂ disminuye un 18% a pH 8,7 y un 83% a pH 10 en comparación con pH 7 (Rao y Pathak 1996). Xu y Qi (2001) encontraron que el pH en los 10 cm superiores mantuvo una correlación negativa con la emisión de CO₂ del suelo, lo que explica el 34 % de la diferencia en la salida de CO₂ del suelo.

El uso de enmiendas tradicionales puede generar la mineralización de la materia orgánica, lo cual se verá un incremento de emisión de CO₂ (Wu et al., 2021), ello se explica dado a las condiciones favorables en el pH, lo cual estimula la actividad biológica y respiración del suelo, y por tanto podría disminuir el stock de carbono (Yang et al., 2022). Sin embargo, habría un mayor ingreso de carbono y protección física de la materia orgánica por mejoras en la estructura, que revertirían el proceso (Paradelo et al., 2015). Por tanto, dado al efecto directo sobre el pH, el proceso de encalado aumentaría el carbono orgánico del suelo (COS), favoreciendo los ciclos de nutrientes y disminuirían las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como el N₂O y CH₄ del suelo (Wang et al., 2021). Asimismo, estudios previos mostraron que, a mayores tasas de aplicación de cada enmienda orgánica, mayores emisiones de CO₂ del suelo. Además, las emisiones de CO₂ acumuladas variarán de acuerdo a la fuente de enmienda orgánica (Ray et al., 2020b).

2.1.2 Suelos ácidos

Generalidades

Los suelos ácidos se forman por un proceso natural que ocurre en las primeras etapas de formación de suelo. Un indicador de la acidez es la medición de pH, siendo suelo ácido a un pH inferior al neutro, es decir, menor a 7. El pH mide la concentración de los iones de H^+ , la cual se expresa como el logaritmo negativo de la concentración de H^+ .

La acidez del suelo se debe a diferentes maneras, entre ellas la lixiviación de bases del perfil debido a una mayor precipitación en comparación con la evapotranspiración, conocida como acidificación natural. Otras maneras, ocurre mediante la deposición ácida de la atmósfera, uso de fertilizantes amoniacales, cultivos intensivos y sistemas de pastoreo en los que se encuentran las leguminosas. La acidez del suelo también se genera producto de la descomposición o mineralización de la materia orgánica (Fageria & Nascente, 2014). Cuando la característica de pH del suelo es neutra la fase de intercambio con los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ se encuentran saturado, y cubren con la carga eléctrica de la superficie de los coloides del suelo. Debido a las raíces se genera la acidificación por la pérdida de los cationes mencionados. Al absorber los cationes en la planta, se liberará H^+ para equilibrarse en su interior, por lo que se genera la reducción de pH (Espinosa & Molina, 2015).

Principales causas de la acidez del suelo

➤ Lixiviación de bases

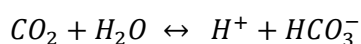
Puede generarse debido a la lixiviación de bases como calcio, magnesio, potasio y sodio del perfil del suelo, ello puede darse cuando la precipitación es mayor que la evapotranspiración en una determinada región. Según lo mencionado por Bolan y Hedley (2003), las áreas donde la precipitación excede la evapotranspiración, la acidificación del suelo es un proceso continuo, la cual puede ser acelerado por la actividad de las plantas,

y seres vivos o ralentizado por prácticas de manejo cuidadosas (Fageria & Nascente, 2014).

El desplazamiento de los cationes en el suelo hacia capas inferiores (lixiviación), aporta a la acidificación, debido que los aniones, formando pares iónicos, arrastran a los cationes con ayuda del desplazamiento del agua. La degradación de la materia orgánica aporta aniones a la solución del suelo, tales como: nitrato (NO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}) y cloruro (Cl^-), los cuales desplazan a los cationes para formar los pares iónicos (Espinosa & Molina, 1999).

➤ **Mineralización de materia orgánica**

Otra causa es por la degradación de los residuos orgánicos por los microorganismos, estos producen CO_2 que luego se transforma en HCO_3^- y libera H^+ , por tanto, se reduce el pH y el bicarbonato se combina con los cationes básicos lavándolos del perfil, dándole condiciones de acidez al suelo. Cabe indicar que la materia orgánica también contiene grupos carboxílicos y fenólicos activos que liberan iones H^+ a la solución del suelo. (Fageria & Nascente, 2014).

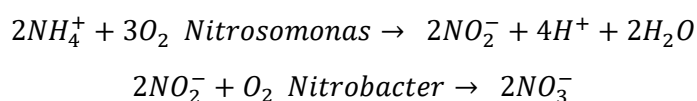


Asimismo, la mineralización de la materia orgánica también produce NH_4^+ , como parte de la descomposición, por lo que luego pasa por un proceso de nitrificación, como se describe en el siguiente ítem. (Espinosa & Molina, 1999).

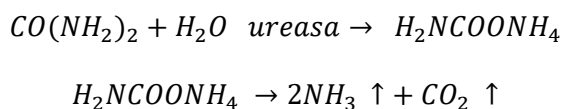
➤ **Uso de fertilizantes nitrogenados**

Entre los fertilizantes nitrogenados encontramos al sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), nitrato de amonio (NO_3NH_4) y la urea ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$). Cuando el sulfato de amonio y nitrato de amonio se aplican al suelo liberan amonio (NH_4^+) y posteriormente se convierte en nitrato

(NO₃⁻) a través de la oxidación biológica, este proceso se denomina nitrificación y es provocado por dos bacterias nitrosomonas y nitrobacter. La nitrificación produce un exceso de H⁺ que provocan la acidez del suelo, tal como se describe en la siguiente formula. Este es un proceso natural donde las plantas como parte de su nutrición utilizan principalmente NO₃⁻ y las reacciones requieren de O₂ necesario por lo que el suelo tiene que encontrarse aireado (Fageria & Nascente, 2014).



Cuando se incorpora la urea al suelo, es atacada por la enzima ureasa facilitando la hidrólisis del material. Primero se forma el carbamato de amonio (compuesto inestable), lo cual produce que se eleve el pH (mayor a 8) alrededor del granulo de urea, en este ambiente el carbamato de amonio se descompone rápidamente en amoniaco (NH₃) y CO₂, tal como la siguiente formula. El NH₃ es un gas que se volatiliza fácilmente de la superficie del suelo, y se perdería apreciable cantidad de N del sistema. El NH₃ en contacto con el agua se transforma en NH₄⁺ permaneciendo de forma estable en el suelo. El NH₄⁺ obtenido luego de la hidrólisis de la urea pasa por los mismos procesos de oxidación biológica o nitrificación mencionado anteriormente. (Espinosa & Molina, 1999).

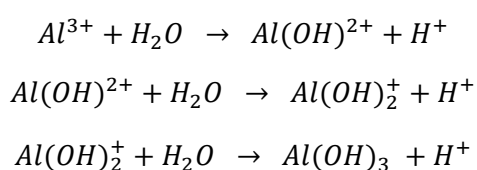


Lo recomendable es neutralizar la acidez del suelo (Al³⁺ y H⁺) a niveles adecuados y no mediante la determinación de la acidez generada de oxidación del N orgánico o amoniacal a nitrato, de tal manera que no afecte la utilización de fertilizantes de reacción ácida en el desarrollo de los cultivos. Otro factor que produce la acidificación del suelo es

mediante las cosechas donde se extraen los elementos básicos y la fijación biológica de nitrógeno respecto a la simbiosis leguminosa – rizobio (Bernier & Alfaro, 2006).

➤ **Aluminio intercambiable o acumulación de Al^{3+}**

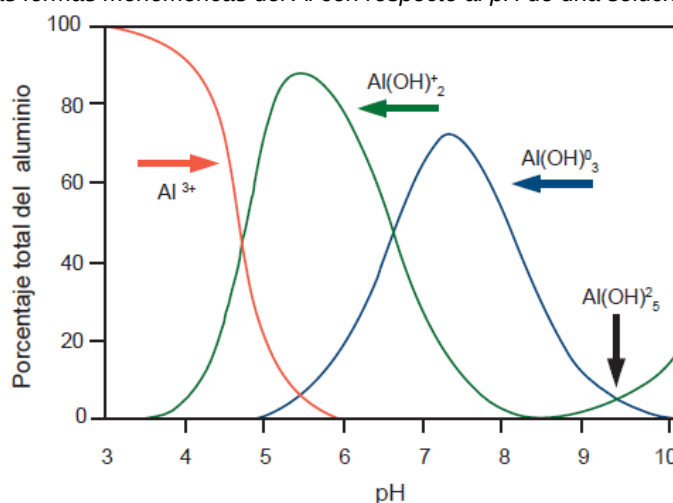
Según Espinosa y Molina (1999) mediante hidrólisis los iones Al^{3+} son desplazados y forman complejos monoméricos y poliméricos hidroxialumínicos, como se muestra en las siguientes reacciones:



Cada reacción libera H^+ , que provoca la acidificación del suelo. Dicha acidez va a generar la mayor presencia de Al^{3+} que reaccionará de nuevo. En la siguiente Figura se presenta el comportamiento del Al con respecto al pH de una solución. Se puede observar en la Figura que la presencia de Al^{3+} se genera a un pH de 5.3 en la solución y que mayor dicha cantidad ya se inicia la formación de $Al(OH)_3$ que se precipita.

Figura 2.

Comportamiento de las formas monoméricas del Al con respecto al pH de una solución



Fuente: IPNI, 1999.

2.1.3 Encalado de suelos ácidos

El resultado del encalado es neutralizar la acidez provocada por los siguientes elementos Al^{3+} y H^+ mediante la aplicación de Ca, Mg o ambos (Kamprath, 1984).

El proceso luego de incorporar los encalantes en el suelo, puede resumirse, que al incorporar los encalantes en el suelo las concentraciones de Ca^{2+} (ion calcio) aumentan en el complejo de intercambio aumentando también la saturación de bases. El Ca^{2+} reemplaza a los iones de Al^{3+} (ion aluminio) y estos son neutralizados por los grupos OH^- . Luego el pH del suelo se incrementa dado que la hidrólisis de Al^{3+} disminuye con la aplicación de la cal o dolomita y hay menos espacio para los protones en el complejo de intercambio (Manrique et al., 2021).

Materiales encalantes

Son materiales utilizados para el proceso de encalado. El encalado consiste en agregar y/o incorporar al suelo materiales con características básicas para su neutralización (Bernier & Alfaro, 2006). La característica como el tamaño de partícula de los materiales básicos, así como el contenido de CaO y MgO son importantes para determinar el valor neutralizante (Sven Villagarcia Hermoza & Guillermo Aguirre Yato, 2014). Dentro de las utilizadas o comerciales se encuentran la cal y dolomita.

➤ Cal agrícola o calcita – CaCO_3

Es un producto de cantera o crudo, sometido a un proceso de molienda y posteriormente cernido. Su contenido de CaO, es del orden de 45 – 56% en forma de carbonato de calcio (CaCO_3). (Sven Villagarcia Hermoza & Guillermo Aguirre Yato, 2014).

➤ **Dolomita – $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$**

La dolomita reacciona lentamente a diferencia de la cal viva, sin embargo, tiene la ventaja de suministrar Mg al suelo. Una dolomita pura contiene 21,6% de Ca y 13,1% de Mg (Espinosa & Molina, 1999).

De acuerdo a Villagarcía y Guillermo (2014), mencionan que, para aumentar el pH de un suelo ácido, la enmienda más utilizada es la dolomita molida donde el 50% pasa por malla 100 y el 100% debe pasar por la malla 50 (50 hilos por pulgada cuadrada). Además, se requiere de manera teórica 1 tn de CaCO_3 o 1 tn de dolomita por cada mg de acidez intercambiable en 100 g de suelo; cabe mencionar que ello dependerá de la cantidad de arcilla y la MOS.

➤ **Cal apagada – Hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)**

La cal viva (óxido de calcio - CaO) proviene del calcinamiento de la forma carbonatada CaCO_3 , donde se libera CO_2 y queda CaO , esta al reaccionar o colocarlo en contacto con agua se forma hidróxido de calcio o cal apagada. La cal viva cuando se incorpora al suelo, de manera inmediata reacciona y se obtiene el resultado rápido (iguales resultados se obtienen con el hidróxido de calcio).

De acuerdo a Villagarcía y Guillermo (2014), la concentración de la cal apagada es un polvo con riqueza de 50% al 72% de CaO en forma de hidrato.

Calidad de los materiales encalantes

De acuerdo a Espinoza y Molina (1999), para determinar la calidad de los materiales encalantes, se fundamenta en los siguientes factores:

- Pureza química: ello va a depender de la composición química y otras sustancias presentes. Para ello se utiliza el equivalente químico (EQ), que se define como la

capacidad del material para neutralizar la acidez comparado con el poder de neutralización del CaCO_3 químicamente puro, la cual se le otorga el valor de 100%, siendo para el caso de la dolomita un valor de 108% y del hidróxido de calcio 138%.

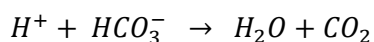
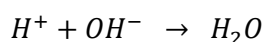
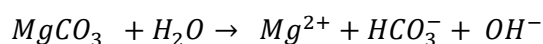
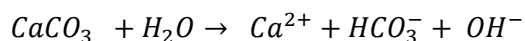
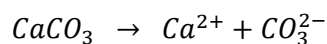
- Tamaño de partículas: ello va a determinar la velocidad de reacción, cuando el tamaño es reducido, aumenta la superficie de contacto. La eficiencia relativa granulométrica según el tipo de malla es que si los materiales son retenidos en malla de 8 no son efectivos, si pasan la malla 8 pero se retienen en malla 20 son 20% efectivos (reacción muy lenta), si pasan la malla 20 pero se retienen en la 60 son 60% efectivos (reacción de un período de 10 a 18 meses). Los materiales que pasan completamente por la malla 60 tienen 100% de efectividad (reaccionan entre 3 y 6 meses). Si pasan por una malla 80 es demasiado fina (reaccionan en 1 a 3 meses). Como recomendación es que el 100% del material pase por la malla 8 y entre el 70 a 80% pase por la malla de 60.

Por otro lado, para valorar de forma conjunta la pureza química y el tamaño de partícula se utiliza el índice de eficiencia denominado poder relativo de neutralización total, la cual se obtiene por el producto de la eficiencia granulométrica y el equivalente químico y se divide entre 100.

Emisión de CO_2 en el encalado

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático – IPCC (2006), incorporar la cal o dolomita en el suelo, va a generar emisiones de CO_2 , ya que al disolverse la cal van a liberar bicarbonato (2HCO_3^-), que luego son convertidos en CO_2 y agua (H_2O). Así también, en otros estudios se han corroborado que al incorporar estos encalantes puede provocar un incremento inmediato de las emisiones de CO_2 (Manrique et al., 2021).

Dicha emisión se genera producto de las reacciones de la cal en el suelo, al entrar en contacto los encalantes con el agua del suelo permiten la neutralización de los iones H^+ . Las reacciones se presentan a continuación.



De acuerdo a las fórmulas químicas indicadas la disociación del $CaCO_3$ y $MgCO_3$ están directamente relacionada con la cantidad de iones OH^- removidos por la neutralización del H^+ y forman H_2O . El pH aumenta dado que disminuye las concentraciones de H^+ en el suelo. Asimismo, el ion calcio y magnesio (Ca^{2+} y Mg^{2+}) promueve la disolución del $CaCO_3$, sin embargo, no interviene en el incremento de pH del suelo. Este catión servirá como nutriente para las plantas y se encontrará en la superficie de los coloides del suelo.

Asimismo, de acuerdo a las reacciones, vemos que el ion carbonato el ion CO_3^{2-} se disipa como CO_2 después de las reacciones de hidrólisis. Por otro lado, el incremento de pH permite la precipitación del Al^{3+} como $Al(OH)_3$, la cual es un compuesto insoluble, eliminando de esta forma el efecto tóxico del Al^{3+} en las plantas y la principal fuente de iones H^+ .

2.1.4 Biocarbón

➤ Definición de biocarbón

El biocarbón es un material con alto contenido de carbono, se obtiene mediante un proceso de pirólisis (escaso o limitada presencia de oxígeno) y a temperaturas muy altas, utilizado para fines agrícolas. Asimismo, se diferencia del carbón vegetal por el uso que en el suelo y no como combustible (Johannes Lehmann & Stephen Joseph, 2009).

De acuerdo a los resultados de números reportes, el biocarbón mejora la producción de los cultivos y la calidad del suelo de manera constante mediante el encalado y efectos de fertilización en suelos infértiles y de bajo pH como los suelos tropicales erosionados (Basak et al., 2022).

➤ Biocarbón como enmienda en suelos ácidos

Los cambios observados con la incorporación del biocarbón en el suelo se evidenciaron en el aumento de pH en suelos ácido o mejor retención de nutrientes, cambio en la composición y abundancia de los microorganismos. Estos cambios pueden tener impactos en los ciclos de nutrientes, su estructura, o afectar de forma indirecta el crecimiento de las plantas y cambio en el ciclo de la materia orgánica (Lyon et al., 2022).

El efecto de encalado del biocarbón en el suelo se debe principalmente a la disolución de carbonatos, óxidos e hidróxidos de la fracción de cenizas del biocarbón. Entre los estudios se ha demostrado que el carbonato que es parte del biocarbón, puede proporcionar una alcalinidad considerable, en el cual se puede utilizar como un agente encalante y mejorar la fertilidad en suelos ácidos (Bolan et al., 2023).

La alcalinidad y pH variará de acuerdo a la materia prima y el grado de temperatura en el proceso de pirólisis (Yuan et al., 2011).

Asimismo, se presentaron resultados de la incorporación del biocarbón de cáscara de maní a suelos rojos altamente ácidos, la cual mejoró el crecimiento del cultivo de repollo al reducir la toxicidad del Al debido al aumento del pH del suelo y disponibilidad de nutrientes (Shetty & Prakash, 2020).

Por otro lado, en el estudio de Schnee (2021), se concluye que, si bien el biocarbón puede mejorar las existencias de materia orgánica de suelo, se debe prestar atención al entorno del suelo al que se modifica. En suelos arcillosos de baja actividad, la enmienda con biocarbón puede conducir a la extracción de C y, por lo tanto, debe recomendarse junto con enmiendas orgánicas ricas en nutrientes (Schnee et al., 2021).

➤ **Biocarbón y cambio climático**

La pirólisis da como resultado la estabilidad del carbono del biocarbón, en la que queda el carbono secuestrado a largo plazo en el suelo. El carbono en biocarbón puede permanecer en el suelo durante largos periodos, según estudios pueden variar entre 90 y 1600 años. (Singh et al., 2012). Asimismo, estudios mostraron que el biocarbón puede mejorar el ecosistema al reducir la generación de CO₂ del suelo de las prácticas agrícolas (Z. Wang et al., 2013) .

El biocarbón puede mejorar el ecosistema al reducir la generación de CO₂ del suelo de las prácticas agrícolas. Los resultados inconsistentes y las aclaraciones de varios estudios resaltan la importancia de relacionar el impacto de las diferentes tasas de biocarbón en las emisiones de CO₂ y el rendimiento del maíz. Esta revisión resume las propiedades del biocarbón, proporciona la referencia científica para su aplicación para lograr maíz de alta y buena calidad y reducir la generación de CO₂ (Mosharrof et al., 2021).

Woolf et al. (2010) informaron que el biocarbón y su almacenamiento en el suelo pueden contribuir a una reducción de hasta el 12 % de las emisiones de CO₂ generado por el hombre (Woolf et al., 2010).

Es importante determinar las características del material utilizado y de las condiciones de pirólisis para producir un biocarbón con las propiedades deseadas para una aplicación específica. Asimismo, para una práctica sostenible del biocarbón, debe producirse de materiales degradables (como tala forestal, biomasa muerta, residuos de cultivos y desechos de jardines urbanos). Además, el reactor donde se produce el biocarbón deben ser eficiente para que no produzcan GEI o sean en la menor medida (Deal et al., 2012).

Si bien incorporar biocarbón al suelo puede incrementar la emisión de CO₂, ello dependerá de la temperatura de pirolisis a la cual fue elaborado. Se encuentran casos en los que se han producido a 300 °C y se incrementaron las emisiones, en cambio a 450 °C y 600 °C disminuyeron, a su vez depende de la antigüedad en el suelo, siendo mayor la emisión después de un año de incorporación (Yang et al., 2022a). Asimismo, el biocarbón que ha sido elaborado por diferentes fuentes de biomasa puede tener diferentes reacciones, por el tamaño de las partículas, la composición, la temperatura de pirolisis, el tiempo, y las proporciones de C:N y C:O en la fase lábil del biochar (ŠLAPÁKOVÁ et al., 2018).

2.2 Marco conceptual

- **Materia orgánica de suelo:** se denomina a los compuestos orgánicos que se encuentran en el suelo en diferentes etapas de descomposición, como los tejidos de plantas y animales muertos, con un tamaño menor a 2 mm y organismos del suelo. Tiene un papel fundamental para estabilizar la estructura del suelo, la retención y liberación de

nutrientes de las plantas, y el mantenimiento de la capacidad de retención de agua. Se puede dividir en dos grupos, en reservas activas con renovación en meses o pocos años y reservas pasivas con renovación en miles de años. (Lefèvre et al., 2017)

- Carbono orgánico de suelo: es una parte de ciclo global del carbono, este reservorio es dinámico, circulando en diferentes formas moleculares. La cantidad de carbono orgánico de suelo dependerá del equilibrio de la cantidad de carbono que ingresa al suelo y lo que sale como parte de los gases de respiración basados en C, proveniente de la mineralización microbiana y de la lixiviación del suelo como carbono orgánico disuelto (rio u océano). (Lefèvre et al., 2017)
- Enmienda de suelo: es un producto o mezclas que mejoran las características físicas, biológicas y químicas del suelo. Las enmiendas pueden ser orgánicas (de origen animal, vegetal o mixto) y químicas (mineral) (Damián Suclupe, 2018)
- Capacidad de Intercambio Catiónico: mide la capacidad del medio de cultivo para adsorber cationes intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) que están disponibles para la planta y resistirán la lixiviación de nutrientes durante el riego. Depende del pH, por ejemplo, la turba en su estado natural puede ser tan baja como 50 cmol kg^{-1} , sin embargo, después de encalar a un pH superior a 5,5, tiene valores mayores a 100 cmol kg^{-1} (MAHER et al., 2008).

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Lugar de ejecución del estudio

La presente investigación se realizó en el vivero del Centro Experimental La Molina del Instituto Nacional de Innovación Agraria (CELM-INIA), en el distrito de La Molina, provincia y departamento Lima. Las coordenadas geográficas UTM son 288198.41 E 8664372.34 N – 18 S; a una altitud de 241 m s. n. m.

3.2 Suelo ácido

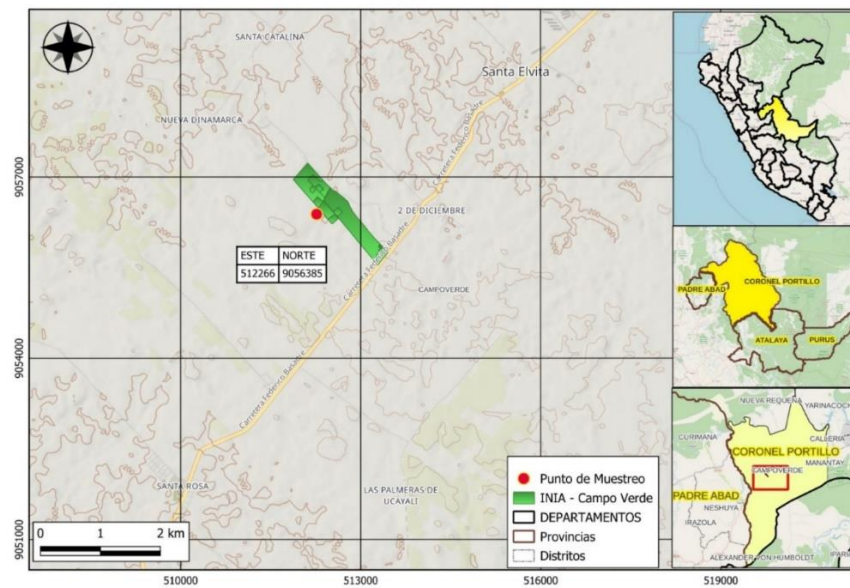
3.2.1 Muestreo del suelo y pretratamiento

La muestra de suelo se obtuvo de la capa arable (0 a 20 cm de profundidad) de un campo de pastizal, en el distrito de Campo Verde, provincia Coronel Portillo y departamento de Ucayali, cuyas coordenadas geográficas UTM son 512266 E 9056385 N.

Para el muestreo se realizó el recorrido en campo y se delimitó el área. Se realizaron muestras aleatorias en el campo de pastizal considerando la profundidad de 20 cm, recolectando 200 kg del suelo. Las muestras de suelo ácido se transportaron a través de bolsas de nylon hacia el CELM-La Molina. El suelo pasó por el proceso de pretratamiento (ISO 11464), secado al aire libre, tamizado a través de un tamiz de 2mm (10 mesh), homogenización y cuarteo. Luego se procedió a seleccionar una muestra de suelo ácido de 1kg para realizar su caracterización en el laboratorio de la UNALM y INIA Canaán.

Figura 3.

Ubicación del suelo ácido utilizado en el ensayo



Fuente: Labsaf, 2023.

3.2.2 Caracterización del suelo ácido

Para el análisis de caracterización de suelo ácido se trasladó una muestra de suelo al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la UNALM, la cual empleó los siguientes métodos para determinar las características físico químicas del suelo:

1. pH: Medida en el potenciómetro de la suspensión de suelo: agua (1:1).
2. Textura de suelo: % de arena, limo y arcilla; método del hidrómetro.
3. Salinidad: medida de la conductividad eléctrica (CE) del extracto acuoso en la relación suelo: agua (1:1).
4. Calcareo total (CaCO_3): método gaso-volumétrico utilizando un calcímetro.
5. Materia orgánica: método de Walkley y Black, oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio. $\%M.O = \%C \times 1.724$.
6. Nitrógeno total: método del micro-Kjeldahl.

7. Fósforo disponible: método de Olsen modificado, extracción con NaHCO_3 0.5M pH 8.5.
8. Potasio disponible: extracción con acetato de amonio $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N, pH 7.
9. Capacidad de intercambio catiónico (CIC): saturación con acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N), pH 7.
10. Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ cambiables: remplazamiento con acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 1N), pH 7 cuantificación por fotometría de llama y/o absorción atómica.
11. $\text{Al}^{+3} + \text{H}^+$: Método de Yuan. Extracción con KCl.

Los resultados del suelo presentaron un pH de 4,47, siendo un suelo fuertemente ácido, es un suelo franco, con bajo contenido de fosforo y potasio. Asimismo, presenta alto contenido de acidez cambiabile (2,2 ppm), bajo contenido de cationes cambiables Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ y Na^+ . Además, el contenido de carbono y nitrógeno total resultaron ser muy bajos.

Tabla 1.

Características físicas – químicas del suelo ácido

Características	Unidades	Resultado	Clasificación
pH (1:1)	-	4,47	Extremadamente ácido
C.E. (1:1)	dS/m	0,05	No salino
CaCO_3	%	0	No calcáreo
M.O.	%	2,76	Medio
Fósforo disponible	ppm	3	Bajo
Potasio disponible	ppm	51	Bajo
Arena	%	42	
Limo	%	36	
Arcilla	%	22	
Clase Textural	-	-	Franco
CIC	meq/100g	13,28	
Ca^{+2}	meq/100g	2,52	
Mg^{+2}	meq/100g	1,2	
K^+	meq/100g	0,22	
Na^+	meq/100g	0,1	

Características	Unidades	Resultado	Clasificación
$Al^{+3} + H^{+}$	meq/100g	2,2	
Suma de cationes	meq/100g	6,24	
Suma de bases	meq/100g	4,04	
% Sat. de bases	meq/100g	30	
Carbono total	meq/100g	1,52	

Elaboración propia

3.3 Materiales encalantes

Características de los materiales encalantes según los fabricantes:

- Dolomita agrícola:

Características Físico-Químicas	
Fabricante	: Minerales & Derivados Sudamericana SAC
Nombre comercial	: Dolomita agrícola
Nombre técnico	: Enmienda agrícola
Formula	: $CaMg(CO_3)_2$
Estado físico	: Sólido
Apariencia	: Arena fina cremosa
Calcio como CaO	: 29 – 32%
Magnesio como MgO	: 18 – 21%
Densidad	: 2.93 g/cm ³
Punto de fusión	: 27 °C
Solubilidad en agua	: 1850 mg/L a 20 °C
pH	: 12 en solución de $Ca(OH)_2$ a 20°C
Humedad	: 3 – 4% max.
Granulometría	: 50% máx. retenido en malla 100.

- Cal agrícola:

Características Físico-Químicas	
Fabricante	: Fertinova
Nombre comercial	: Fertical
Formula	: $Ca(OH)_2$ menor al 40%
Composición química	: Hidróxido de calcio: 39.53% Carbonato de calcio: 60%
Estado	: Sólido en polvo
Color	: Blanco
Tamaño de partícula	: 100% menor a 2 mm malla 10 70% menor a malla 0.84 malla 20 50% menor a 0.3 mm malla 50

- Biocarbón:

Composición	
Fabricante	: Inkan negro
Composición	: Estiércol de gallina y compost vegetal, y otros aditivos, la composición exacta

podría ser variado de acuerdo con un análisis y las necesidades del suelo a que será aplicada.		
Materia orgánica	:	15 – 30 %
Nitrógeno	:	2%
Fosforo	:	2%
Potasio	:	2%
Magnesio	:	1%
Hierro	:	2%
pH	:	7
Conductividad eléctrica (dS/m)	:	8
Capacidad de intercambio catiónico (cmol(+)/kg)	:	86
Proceso de pirolisis	:	Mayor a 700°C

Para el experimento, la cal y dolomita agrícola no hubo un pretratamiento, se mantuvo las condiciones del fabricante. Sin embargo, la masa de biocarbón originalmente se molió y pasó por el tamiz de 2 mm y se mezcló completamente para obtener una consistencia granular fina que se mezclaría más uniformemente con la masa de suelo. Asimismo, una muestra de biocarbón se trasladó al Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes de la UNALM donde se realizó el análisis de materia orgánica y en Laboratorio de Suelo, Agua y Foliares del INIA Sede Central se determinaron los porcentajes de carbono total. Por otro lado, se determinó el %CaCO₃ equivalente cal y dolomita agrícola. A continuación, se presenta los métodos utilizados y resultados de los análisis respectivos.

Métodos para el análisis de Materia Orgánica del biocarbón:

1. Nitrógeno: Método de Kjeldahl.
2. Fósforo: Método del azul de molibdeno. Método alternativo: Amarillo del Vanadato Molibdato.
3. Potasio: Espectrofotometría de absorción atómica.
4. Calcio: Espectrofotometría de absorción atómica.
5. Magnesio: Espectrofotometría de absorción atómica.
6. Sodio: Espectrofotometría de absorción atómica.

7. Humedad: Diferencia de peso, gravimetría.
8. pH: Potenciometría. Determinación en pasta saturada.
9. Conductividad eléctrica: Medición indirecta del contenido de sales solubles en el extracto acuoso obtenido de la pasta saturada.
10. Materia orgánica: Determinación del carbono orgánico por el método de Walkley y Black o del Dicromato de potasio, mediante el cual se estima la materia orgánica así: $\% \text{ Corg.} \times 1,724 = \% \text{ Materia orgánica}$.

Tabla 2.

Características de materia orgánica del biocarbón

Parámetro	Unidades	Resultado
pH	-	8,32
C.E.	dS/m	18,3
M.O.	%	18,81
N	%	1,32
P ₂ O ₅	%	3,07
K ₂ O	%	3,14
CaO	%	7,14
MgO	%	1,7
Hd	%	11,28
Na	%	1,43
C _T	%	29,9

Fuente: LASPAF UNALM, 2022.

Métodos para el análisis de $\% \text{CaCO}_3$ equivalente de la cal y dolomita agrícola: AOAC: Official Methods of Analysis – Metodología 955.01 se determinó el $\% \text{CaCO}_3$ de la cal agrícola.

Tabla 3.

$\% \text{CaCO}_3$ equivalente de la cal y dolomita agrícola

Encalante	Unidades	Resultado
Cal agrícola	$\% \text{CaCO}_3$ equivalente	122,625
Dolomita agrícola		43,02

Fuente: propia

3.4 Determinación de las dosis de material encalante

La cal, dolomita agrícola y biocarbón se utilizaron para corregir la acidez del suelo y elevar el pH. Para ello se realizó el requerimiento de encalado del suelo ácido según la metodología N° 15 de Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile (Sadzawka et al., 2006), siendo $6,48 \text{ ton CaCO}_3/\text{ha. } 0.2m$, por consiguiente, se realizó los cálculos y ensayos previos en laboratorio para neutralizar, la cual se consideró alcanzar un valor de pH alrededor de 6,5. Se aplicó 0,019 g de cal agrícola, 0,063 g de dolomita agrícola y 40 g de biocarbón por 1 kg de suelo ácido.

3.5 Factores o variables en estudio

Para el experimento se aplicaron cal agrícola, dolomita agrícola y biocarbón, las dosis para elevar neutralizar fueron 0,019g, 0,063g y 40g en 1kg de suelo ácido, respectivamente. Asimismo, en cuatro tratamientos se utilizó el maíz como cultivo indicador. Los factores en estudio y los tratamientos se observan se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4.

Diseño experimental de la evaluación de los materiales encalante por dosis

Tratamiento	Material encalante	Dosis (g/1kg suelo ácido)
T1	Testigo	0
T2	Dolomita agrícola	0,063
T3	Cal agrícola	0,019
T4	Biocarbón	40

Fuente: propia

Tabla 5.

Diseño experimental de la evaluación de los materiales encalante por repeticiones

Tratamiento	Suelo ácido + Material encalante + cultivo	Repeticiones				
		I	II	III	IV	V
T1	Testigo	101	102	103	104	105
T2	Dolomita agrícola	201	202	203	204	205
T3	Cal agrícola	301	302	303	304	305

T4	Biocarbón	401	402	403	404	405
Elaboración propia						

a) Independientes (Tratamientos)

- Dosis de cal agrícola
- Dosis de dolomita agrícola
- Dosis de biocarbón

b) Dependientes (Evaluadas)

En el suelo

- Emisión de CO₂ temporal y acumulada
- pH
- Conductividad eléctrica
- Materia orgánica
- Nitrógeno, fósforo y potasio disponible
- Textura (Porcentaje de arena, limo y arcilla)
- Capacidad de Intercambio Catiónico
- Cationes intercambiables Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺
- Acidez intercambiable

En las plantas

- Número de hojas
- Altura de la planta
- Diámetro del tallo
- Peso fresco y seco de hojas, tallo y fruto
- Área foliar

3.6 Materiales, insumo y equipos

a) Materiales

Los materiales utilizados fueron: macetas, letreros, wincha, regla, vernier, balanza y vasitos de plástico, bolsas ziploc, malla 10 mesh, espátula, cuchillo, sacabocado, martillo y pinza.

b) Insumos

Semilla de maíz híbrido PM-213, dolomita agrícola, cal agrícola, biocarbón y fertilizantes.

c) Equipos

Cámara fotográfica, laptop, potenciómetro y conductímetro.

3.7 Metodología

Ensayo en vivero

Previamente, el suelo ácido mediante el tendido de un plástico para su secado al aire, posteriormente se molió y fue pasado por una malla 10 mesh (2 mm de apertura). Luego el suelo tamizado fue homogenizado con la ayuda de una lampa.

Asimismo, 5kg de suelo ácido seco fue incorporado en cada maceta (unidad experimental), luego se agregó la dosis correspondiente de cada tipo de material encalante y fue homogenizado. Después se incubó por un período de 35 días a una humedad constante del 80% de la capacidad de campo. Finalizado los 35 días, se realizó la siembra de cultivo del maíz PM 213. Al día 30 luego de la siembra (DDS) se realizó la primera fertilización aplicando 0.5 g de urea, 1g superfosfato triple (SFT) y 0.5 de cloruro de potasio (KCl). Luego de transcurridos 36 DDS se realizó la segunda fertilización (1 g de úrea, 2g SFT y 1g de KCl), a los 43 DDS se aplicó 1 g de urea, 2g SFT y 1g de KCl. Finalmente, se

agregaron 200 mL de soluciones nutritivas hidropónicas a 57 DDS. La cosecha se realizó aproximadamente 100 días después de la siembra.

3.8 Diseño de investigación

El diseño experimental empleado en la presente investigación fue el diseño completamente al azar, con tres enmiendas, un testigo y cinco repeticiones. Asimismo, se utilizó el análisis de varianza del DCA y se realizó la prueba de comparación de medias Duncan a un nivel de significación de 0,05.

Modelo de observación:

$$\gamma_{ij} = \mu + \tau_i + \xi_{ij}$$

Donde:

- γ_{ij} : Variable respuesta al usa la i-ésima enmienda.
- μ : Media poblacional
- τ_i : Efecto aleatorio de la i-ésima enmienda
- ξ_{ij} : Error experimental

3.9 Análisis de datos

Los datos obtenidos de cada evaluación tanto del suelo como del crecimiento de maíz se procesaron conforme al Análisis de varianza para un diseño completo al azar (DCA) al 95% de confiabilidad. Donde se halló diferencia significativa entre los tratamientos se procedió a ejecutar la prueba de Duncan para comparar los tratamientos. Se empleó el software estadístico InfoStat.

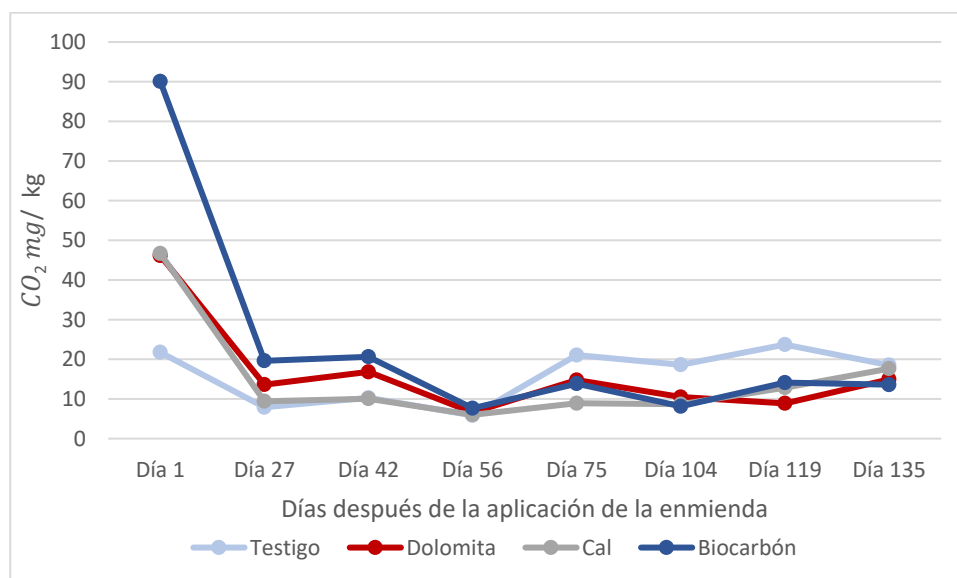
Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Evaluación de la emisión de CO₂ que genera el biocarbón, cal agrícola y dolomita agrícola en un suelo ácido con el cultivo de maíz.

La emisión temporal dentro de las 24 horas fue significativamente mayor para las tres enmiendas: biocarbón (313,79%), cal agrícola (114,48%), dolomita (112,07%), respecto al testigo. Asimismo, a partir del día 27, los tratamientos disminuyeron. Se llegó a observar que la emisión de CO₂ temporal llegó a ser menor que el testigo a partir de la medición hecha al día 75: biocarbón (-34,20%), cal agrícola (-57,72%), dolomita (-29,93%); esto evidenciaría un posible menor impacto en la emisión de GEI con el uso de enmiendas a largo plazo (Figura 4). Para el CO₂ acumulado, luego de la cosecha, el biocarbón presentó el mayor valor (46,9%), seguido de los tratamientos con dolomita (3,5%) y la cal (-5,9%) (Figura 5).

Figura 4.

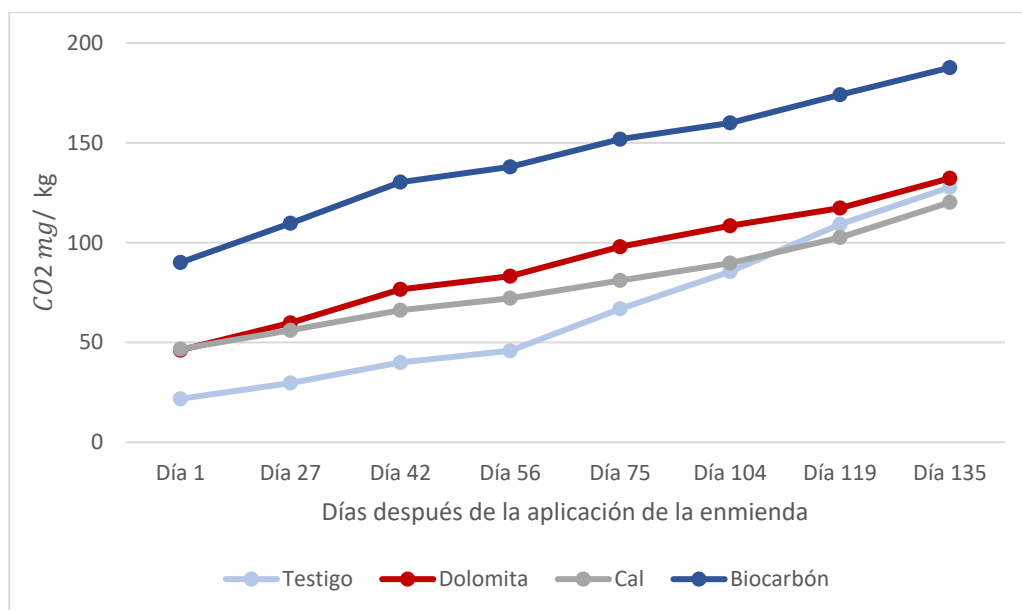
Emisiones de CO₂ temporal de un suelo con cultivo luego de la incorporación de enmiendas en un suelo ácido.



Fuente: Propia

Figura 5.

Emisiones de CO₂ acumulado de un suelo con cultivo luego de la incorporación de enmiendas en un suelo ácido.



Fuente: Propia

Si bien el biocarbón tiene naturaleza estable, este puede liberar algunos compuestos volátiles o materia orgánica lábil. Asimismo, en el subsuelo es susceptible a los procesos microbianos, que dependen de los agregados formados por su incorporación. Estudios previos han mostrado incrementos significativos en la respiración del suelo con tratamientos de abonos orgánicos respecto a la fertilización inorgánica (Ge et al., 2009). En algunos casos se ha demostrado que durante las primeras horas la emisión de CO₂ puede aumentar, asimismo, se ha encontrado estudios donde se sustenta que la pérdida de C durante la emisión de CO₂ a corto plazo es insignificante comparado con cantidad de C que se almacena dentro del biochar a largo plazo. Por otro lado, se ha encontrado que entre el 17% y 23% de C contenido en el biocarbón puede mineralizar y con ello generar CO₂. (Mukherjee & Lal, 2013)

Acorde a lo reportado, otros autores han encontrado una alta tasa emisión de CO₂ en los primeros días de incubación con la aplicación de biocarbón y dolomita en un suelo ácido (Oo et al., 2018).

La emisión de GEI de suelos con aplicación de biocarbón dependerá del tipo de biomasa, condiciones de pirólisis (temperatura, duración), tipo de suelo, condiciones climáticas y propiedades físicas del suelo. Puede no tener ningún efecto o incluso aumentar las emisiones de GEI; durante las primeras horas, en algunos casos, puede aumentar la emisión de CO₂. Algunos autores mencionan incrementos del 12% en la emisión de CO₂, al aplicar 40 t.ha⁻¹ de biocarbón en suelos sin fertilización (Zhang et al., 2009).

En cuanto a las emisiones de CO₂ por la aplicación de las enmiendas tradicionales, se ha hallado que serían dependientes de la humedad, en un estudio se encontró que las emisiones por dolomita fueron significativamente mayores a una humedad del 90% (H. Wu et al., 2020), condición similar a la del presente estudio. En la mayoría de los casos, la aplicación de cal agrícola aumentaría la respiración del suelo. Sin embargo, una vez instalado un cultivo, el aumento de la respiración se compensaría con un aumento de la producción de biomasa vegetal o también sucedería que la eliminación del producto impediría la acumulación a largo plazo de COS (Page et al., 2009).

La alta emisión de CO₂ dentro de las primeras 24 horas, sobre todo con el biocarbón, se explicaría por el incremento de materia orgánica disuelta, la cual es rápidamente mineralizada; además, la elevación del pH intensifica la actividad microbiana. Sobre esto último se ha señalado un incremento en individuos copiótrofos frente a los oligótrofos, los cuáles al encontrarse en mayor número incrementarían la emisión de CO₂ (Yang et al., 2022).

4.2 Efecto de biocarbón, cal y dolomita agrícola en las características finales de un suelo ácido.

4.2.1 pH

El análisis de varianza sobre el pH, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 1,248%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de pH después de incubación y cosecha, mediante la prueba de Duncan. Después de la incubación, se observó que los tratamientos con dolomita y biocarbón no presentaron diferencias significativas entre ellas, sin embargo, presentaron diferencias significativas con el testigo y el tratamiento con cal. Por otro lado, después de la cosecha, se presentaron diferencia significativa entre los tratamientos.

Además, se observa que después de la cosecha, el tratamiento con dolomita presentó el mayor nivel de pH (6,720). Sin embargo, después de la incubación los tratamientos con dolomita y biocarbón presentaron los mayores niveles de pH, sin diferencia significativa entre ellos, es decir, para las dosis determinadas para ambas enmiendas, el nivel de pH fue estadísticamente similar.

Tabla 6.

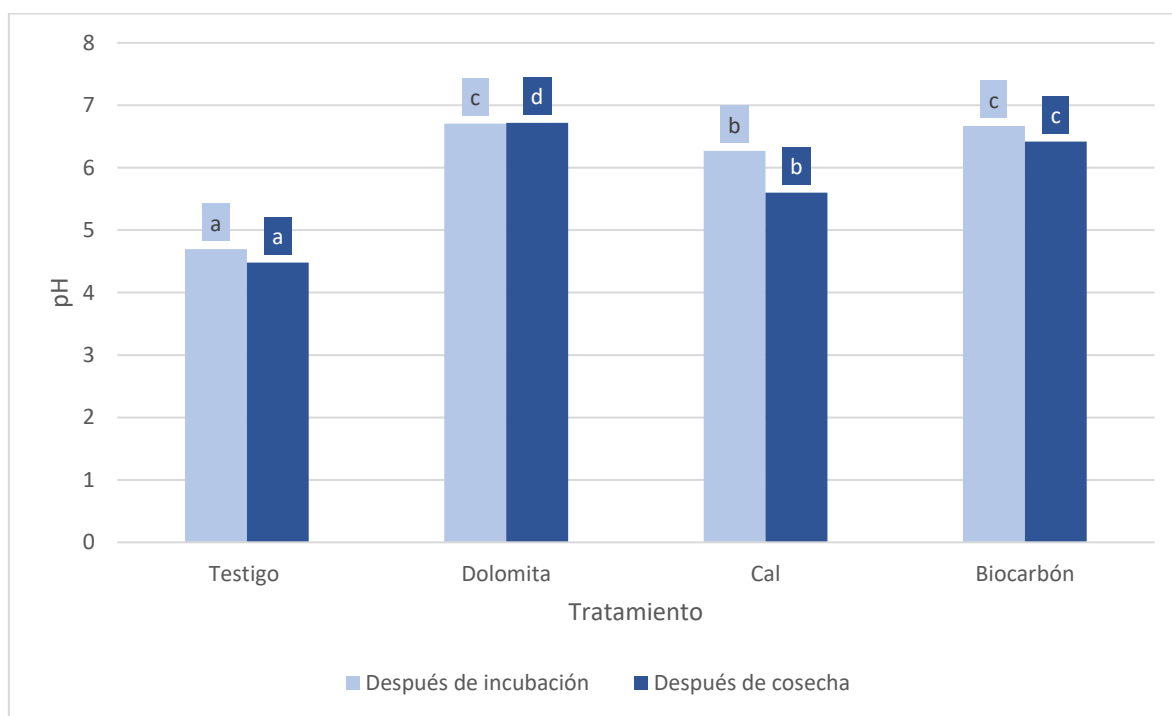
Promedio de pH de los tratamientos después de la incubación y cosecha

Enmienda	pH	
	Después de incubación	Después de cosecha
Testigo	4,696 a	4,480 a
Dolomita	6,705 c	6,720 d
Cal	6,270 b	5,600 b
Biocarbón	6,669 c	6,420 c

Fuente: Propia

Figura 6.

Promedio de pH de los tratamientos después de la incubación y cosecha



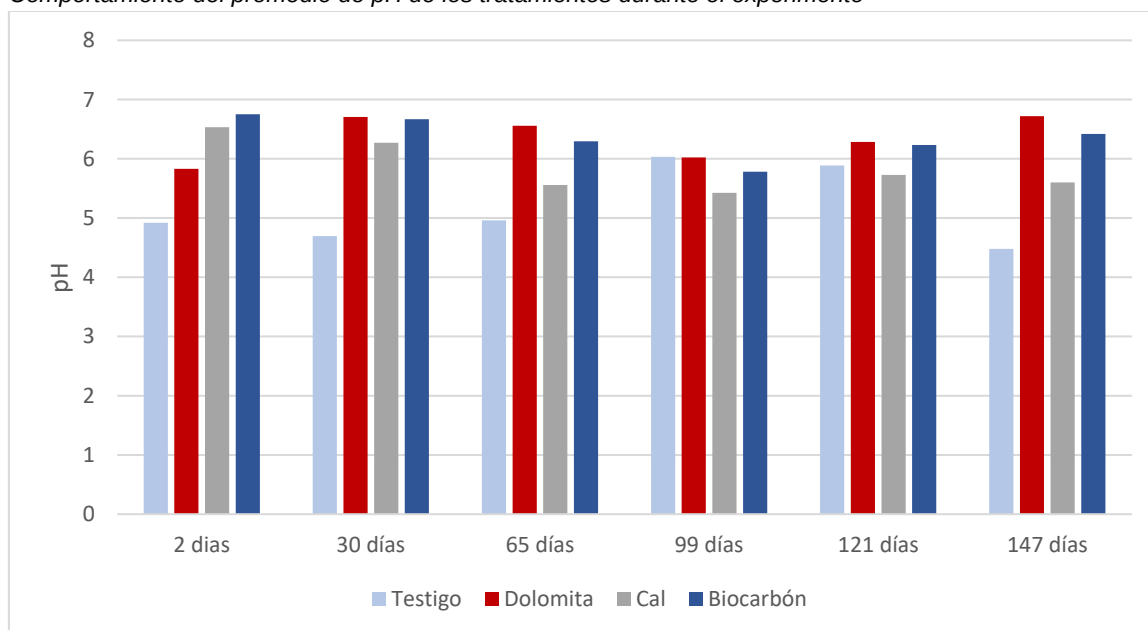
Fuente: Propia

Por otro lado, durante la primera medición se pudo observar que, los tratamientos con cal agrícola y biocarbón tuvieron una rápida reacción con el suelo ácido, elevando su pH cerca de 6,5. Luego de un mes, los tres tratamientos estuvieron dentro del valor deseado de pH. En el segundo mes, los tratamientos de dolomita estuvieron alrededor del valor deseado de pH, al igual que el biocarbón. Sin embargo, los tratamientos que contenían cal agrícola, disminuyeron su valor. En el tercer mes, el testigo aumentó su pH, presuntamente debido a la aplicación de fertilizantes (úrea, SFT y KCl). En cambio, observamos una reducción de pH en los tratamientos de dolomita, cal y biocarbón. Luego de 57 DDS, se fertilizó el suelo con solución hidropónica (dosis según proveedor) a fin de no disminuir el pH. Al cuarto mes, se observó una ligera disminución en el testigo; por el contrario, ocurrió un ligero aumento de pH en los tratamientos con enmiendas.

Como parte de los resultados finales en cuanto al parámetro de pH, los tratamientos con dolomita y biochar mantuvieron el pH deseado hasta la cosecha; sin embargo, los tratamientos con la cal agrícola disminuyeron su valor.

Figura 7.

Comportamiento del promedio de pH de los tratamientos durante el experimento



Fuente: Propia.

Asimismo, sabemos que la dolomita y cal agrícola aumentan el pH por las disociaciones de CaCO_3 y MgCO_3 ; sin embargo, el aumento de pH en el suelo por parte del biocarbón se atribuye principalmente a la disolución de carbonatos, óxidos e hidróxidos de la fracción de cenizas del biocarbón. Asimismo, de manera general, incorporar el biocarbón a diferentes tipos de suelo podría aumentar y mantener el pH del suelo al menos por 180 días, el cual es el tiempo suficiente para dos periodos de crecimiento del cultivo tiempo ideal suficiente para dos períodos de crecimiento del cultivo. (Bolan et al., 2023).

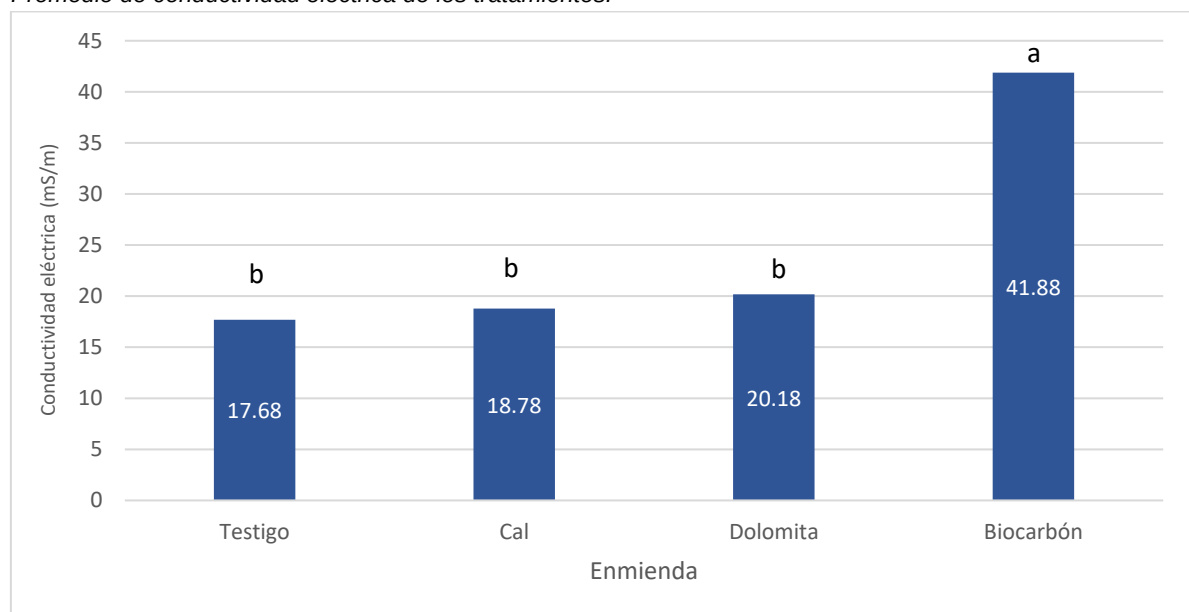
4.2.2 Conductividad eléctrica

De acuerdo al análisis de varianza sobre conductividad eléctrica, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación

de 11,640%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de conductividad eléctrica después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que el testigo (17,68 mS/m), los tratamientos con cal (18,78 mS/m) y dolomita (20,18 mS/m), los valores de conductividad eléctrica fueron estadísticamente similar. Sin embargo, presentaron diferencias significativas con el tratamiento de biocarbón (41,88 mS/m).

Figura 8.

Promedio de conductividad eléctrica de los tratamientos.



Fuente: Propia

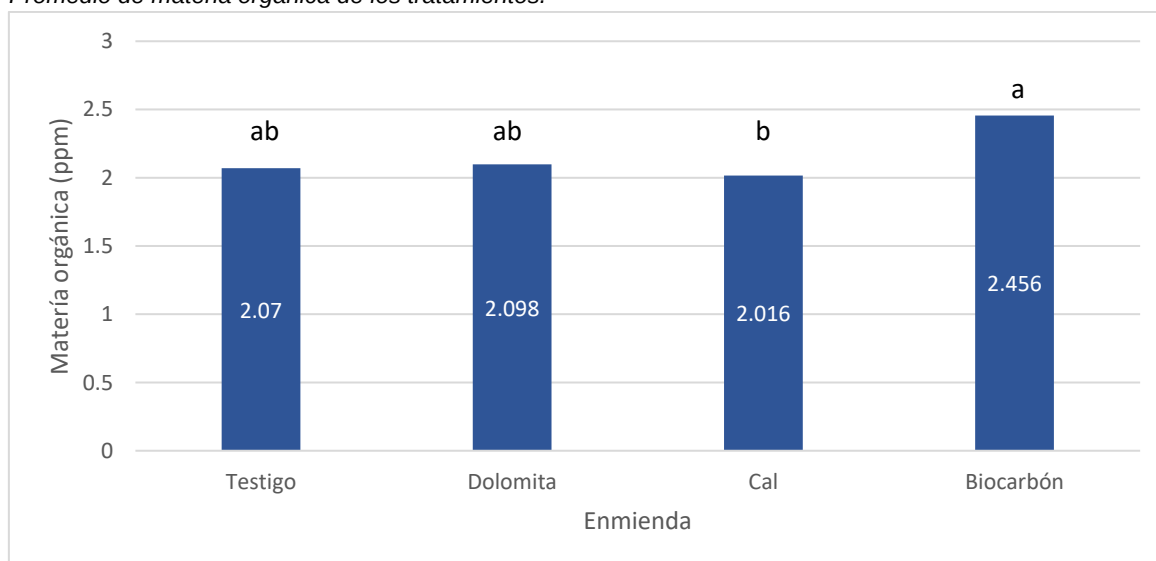
Se encontró que al incorporar el biocarbón al suelo ácido tuvo un efecto en el parámetro de conductividad, permitiéndolo alcanzar un valor de 41,88 mS/m. La conductividad eléctrica es representada por la cantidad de sales disueltas y estas se miden como cenizas, por tanto, un biocarbón con alto contenido de cenizas, la conductividad eléctrica será mayor (Guerra Laura, 2015). Asimismo, diferentes temperaturas de pirólisis, las materias primas, las condiciones de preprocesamiento, las velocidades de calentamiento y los catalizadores utilizados pueden afectar la conductividad eléctrica del biocarbón. (Kane et al., 2021)

4.2.3 Materia orgánica

De acuerdo al análisis de varianza sobre materia orgánica, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 13,798%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de materia orgánica después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que el testigo (2,070%) y los tratamientos de cal (2,016%) y dolomita (2,098%) no presentan diferencias significativas. Por otro lado, el testigo y los tratamientos de dolomita y biocarbón (2,456%), tampoco presentan diferencias significativas. Sin embargo, los tratamientos de cal (2,016%) y biocarbón (2,456%) presentan diferencias estadísticamente significativas.

Figura 9.

Promedio de materia orgánica de los tratamientos.



Fuente: Propia

La diversidad de especies y composición de los microorganismos se inhibe por la acidificación del suelo (Wan et al., 2020), lo cual afecta la mineralización de la materia orgánica. Al neutralizar el suelo ácido, le damos condiciones al suelo para la generación de la mineralización de la materia orgánica, por tanto, se observa que luego de la cosecha la cantidad de materia orgánica disminuyó respecto a la caracterización al inicio, en los tratamientos de cal agrícola. Asimismo, vemos que el tratamiento con biocarbón, luego de

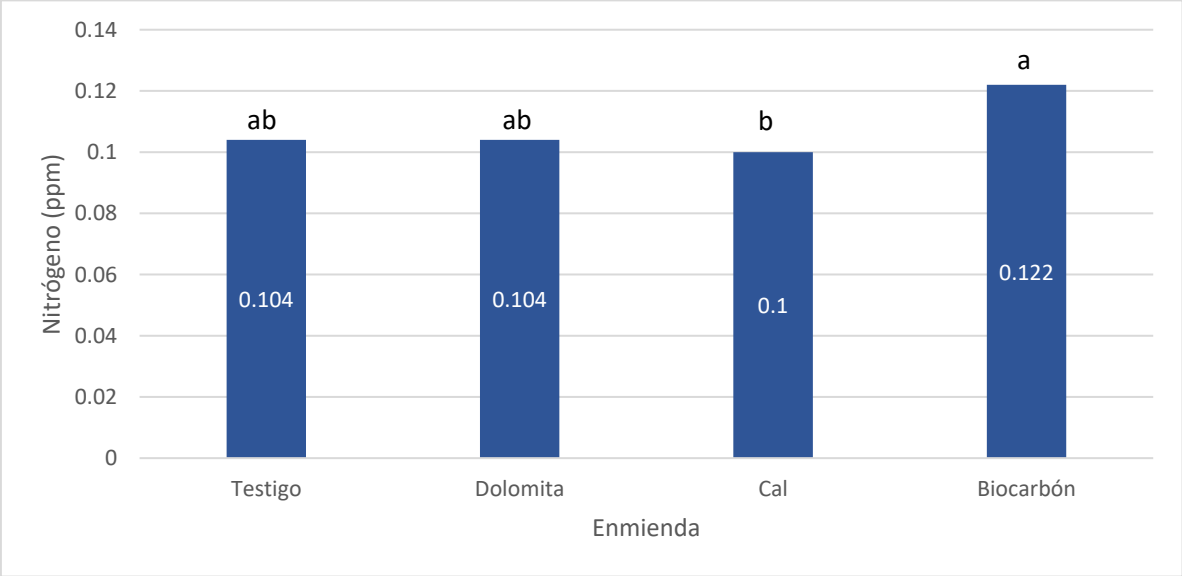
la cosecha presentó mayor contenido de materia orgánica en el suelo, con un 18,6% respecto al testigo.

4.2.4 Nitrógeno disponible

De acuerdo al análisis de varianza sobre nitrógeno disponible, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 13,798%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de nitrógeno después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que el testigo (0,104%) y los tratamientos de cal (0,1%) y dolomita (0,104%) no presentan diferencias significativas. Por otro lado, el testigo y los tratamientos de dolomita y biocarbón (0,122%), tampoco presentan diferencias significativas. Sin embargo, los tratamientos de cal (0,1%) y biocarbón (0,122%) presentan diferencias estadísticamente significativas.

Figura 10.

Promedio de nitrógeno de los tratamientos.



Fuente: Propia

Como se puede observar en la figura anterior los tratamientos de biocarbón fueron ligeramente mayor en un 17,30% respecto al testigo en cuanto nitrógeno, sin embargo, éstas no son representativas. Este resultado, concuerda con los resultados de Zhu et al.

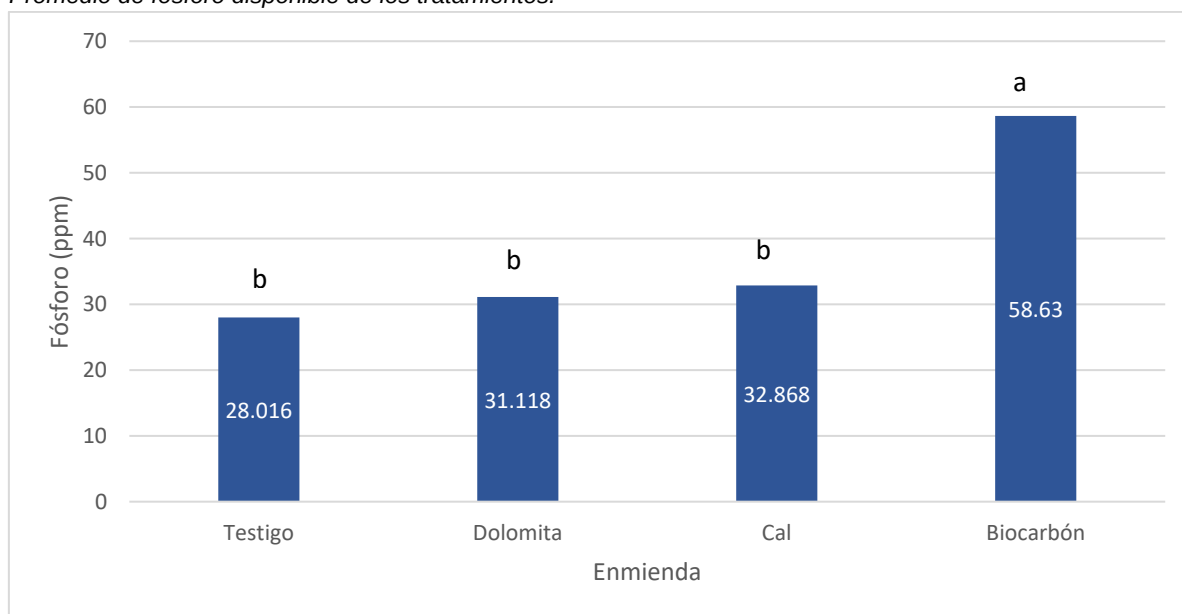
(2014), donde los tratamientos que se incorporó solo fertilizante y los tratamientos con biocarbón y fertilizante en suelo ácido, no afectó N disponible del suelo (ZHU et al., 2014).

4.2.5 Fósforo disponible

De acuerdo al análisis de varianza sobre fósforo, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 17,511%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de fósforo después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que el testigo (28,016%) y los tratamientos de dolomita (31,118%), cal (32,868%) no presentan diferencias significativas. Por otro lado, los tratamientos mencionados con los tratamientos de biocarbón (58,63%) presentan diferencias estadísticamente significativas.

Figura 11.

Promedio de fósforo disponible de los tratamientos.



Fuente: Propia

Respecto a la figura anterior se puede apreciar que los tratamientos con biocarbón presentaron una diferencia de 109,32% de contenido de fosforo disponible respecto al testigo. Estos resultados coinciden con las investigaciones donde se menciona que el

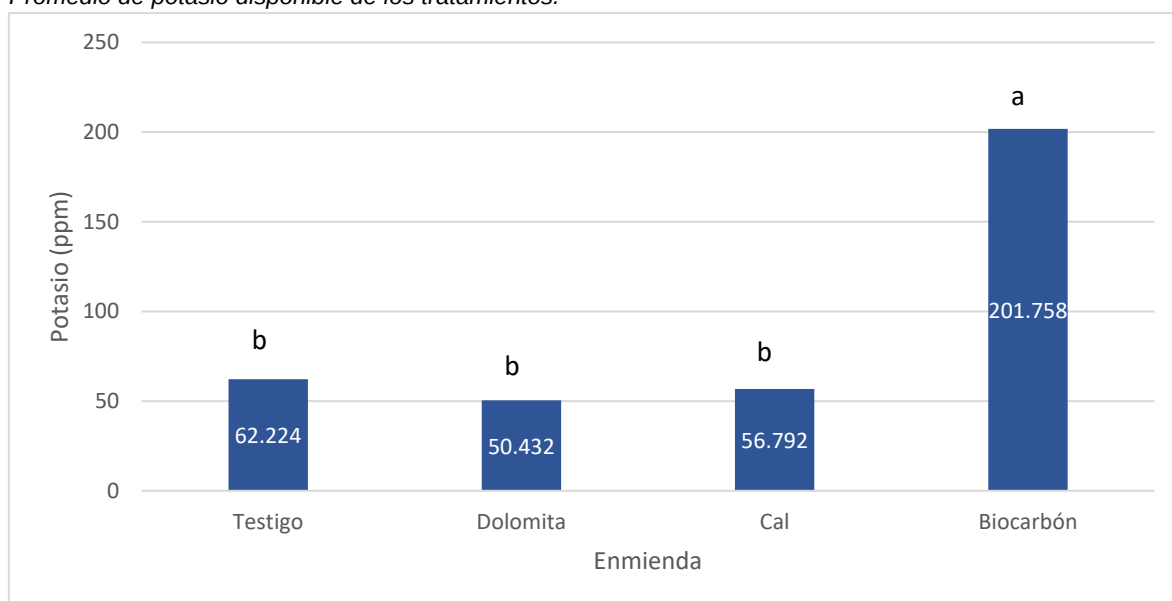
biocarbón mejora significativamente el P disponible para las plantas en suelos enmendados con biocarbón al menos durante cinco años. Asimismo, mencionan que la aplicación de biocarbón a suelos ácidos ($\text{pH} < 6,5$) y neutros ($\text{pH} 6,5-7,5$) aumentó significativamente la disponibilidad de P, mientras que no hubo un efecto significativo en suelos alcalinos ($\text{pH} > 7,5$) (Glaser & Lehr, 2019), además, se tiene una similitud con los resultados de Zhu et al. (2014), Alonso et al. (2016), Wu et al. (2020) y Hale et al. (2020), donde los tratamientos donde se incorporó el biocarbón aumentó el pH del suelo y el P disponible, y disminuyó el Al^{3+} intercambiable del suelo.

4.2.6 Potasio disponible

De acuerdo al análisis de varianza sobre potasio, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 18,124%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de potasio después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que los tratamientos de dolomita (50,432%), cal (56,792%) y el testigo (62,224%) no presentan diferencias significativas. Por otro lado, los tratamientos mencionados con los tratamientos de biocarbón (201,758%) presentan diferencias estadísticamente significativas.

Figura 12.

Promedio de potasio disponible de los tratamientos.



Fuente: Propia

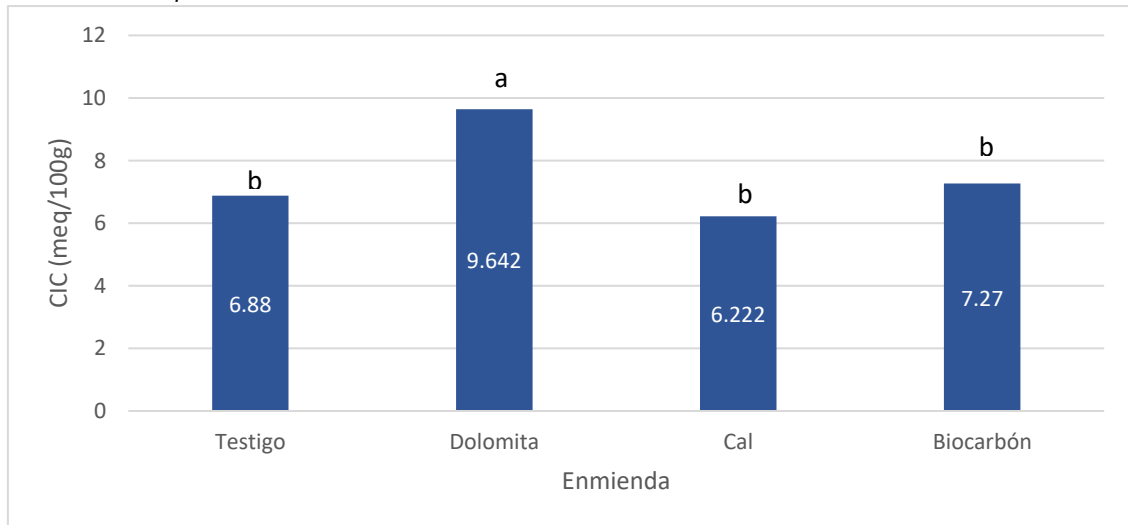
Como se puede observar en la figura anterior, los tratamientos con biocarbón presentaron mayor contenido de potasio disponible, siendo 224,24% mayor al testigo. En cuanto a los tratamientos de dolomita y cal, estos disminuyeron respecto al testigo. Los resultados coinciden con las investigaciones realizadas por Alonso et al. (2016), Wu et al. (2020) y Hale et al. (2020), donde los tratamientos donde se incorporó el biocarbón presentaron mayores cantidades en potasio disponible, respecto a los tratamientos de cal.

4.2.7 Capacidad de intercambio catiónico

De acuerdo al análisis de varianza sobre CIC, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 15,33%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de CIC después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que los tratamientos de cal (6,22 meq/100g), testigo (6,88 meq/100g) y biocarbón (7,27 meq/100g) no presentan diferencias significativas. Por otro lado, los tratamientos mencionados con los tratamientos de dolomita (9,64 meq/100g) presentan diferencias estadísticamente significativas. Por tanto, los tratamientos con dolomita presentar mayor capacidad para la retención de nutrientes.

Figura 13.

Promedio de capacidad de intercambio catiónico de los tratamientos.



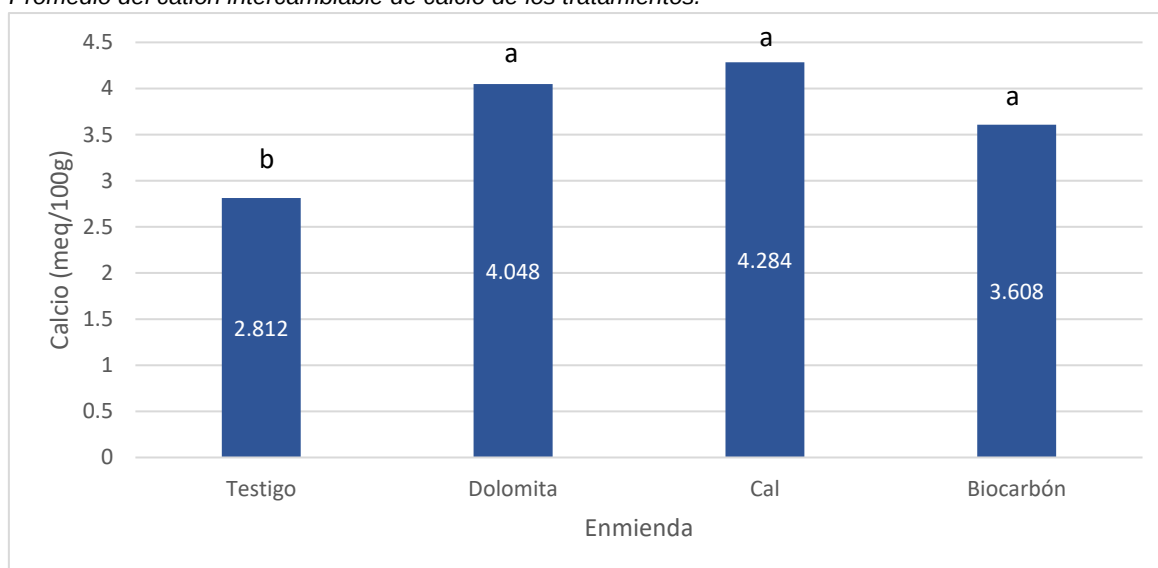
Fuente: Propia

4.2.8 Cation intercambiable de calcio

De acuerdo al análisis de varianza sobre calcio, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 15,747%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias del catión intercambiable de calcio después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que los tratamientos de biocarbón (3,608 meq/100g), dolomita (4,048 meq/100g) y cal (4,284 meq/100g) no presentan diferencias significativas. Por otro lado, los tratamientos mencionados con el testigo (2,812 meq/100g) presentan diferencias estadísticamente significativas.

Figura 14.

Promedio del catión intercambiable de calcio de los tratamientos.



Fuente: Propia

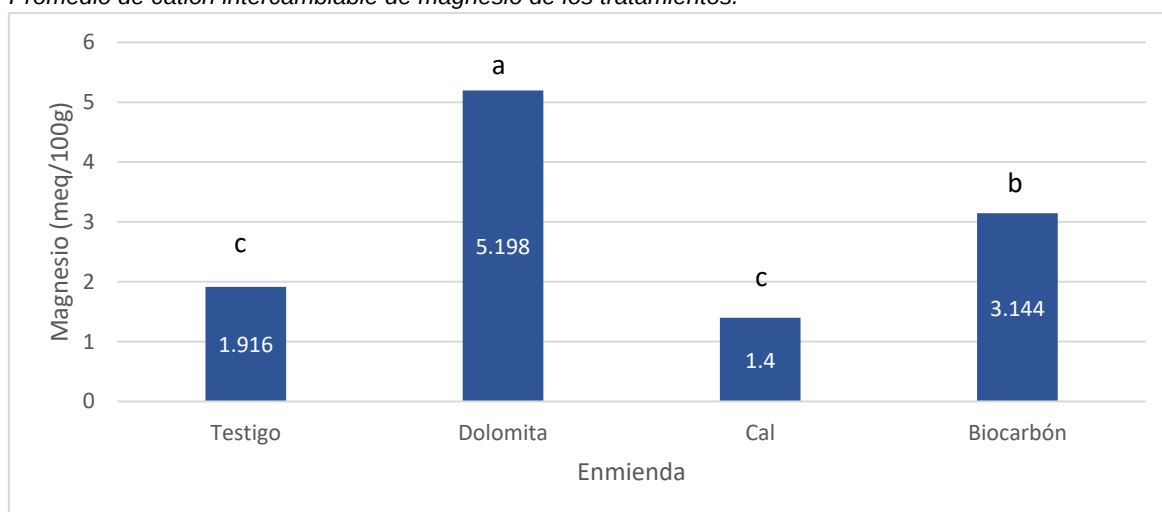
La cal, dolomita y biocarbón presentan dentro de su composición el contenido de calcio, los cuales permitieron elevar su contenido respecto al testigo. De acuerdo a lo mencionado por Alonso et al. (2016), el biocarbón aumentó en el contenido de Ca, asimismo, en comparación con la cal, este presentó mayor contenido de Ca. Al igual que los resultados obtenidos por Castro y Guerrero (2018), el uso de dolomitas e hidróxido de calcio, generaron una elevación en la concentración de Ca.

4.2.9 Catión intercambiable de magnesio

De acuerdo al análisis de varianza sobre el catión intercambiable de magnesio, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 20,903%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias del catión intercambiable de magnesio después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que los tratamientos de cal (1,4 meq/100g) y el testigo (1,916 meq/100g) no presentan diferencias significativas. Por otro lado, los tratamientos de biocarbón (3,144 meq/100g) y dolomita (5,198 meq/100g) presentan diferencias significativas.

Figura 15.

Promedio de catión intercambiable de magnesio de los tratamientos.



Fuente: Propia

De acuerdo a los resultados, los tratamientos con dolomita presentaron mayor cantidad magnesio, siendo mayor en un 171% respecto al testigo, seguido a ello se encuentran los tratamientos con biocarbón con 64% mayor al testigo. Ello se debe a las características de cada enmienda y el aporte que tuvieron estas en el suelo. En el estudio realizado por Alonso et al. (2016), los resultados mostraron que el biocarbón aumentó en el contenido de Mg, asimismo, en comparación con la cal, este presentó mayor contenido de Mg. Por otro lado, en el estudio realizado por Castro y Guerrero (2018), el uso de dolomitas e hidróxido de calcio, generaron una elevación en la concentración de Mg.

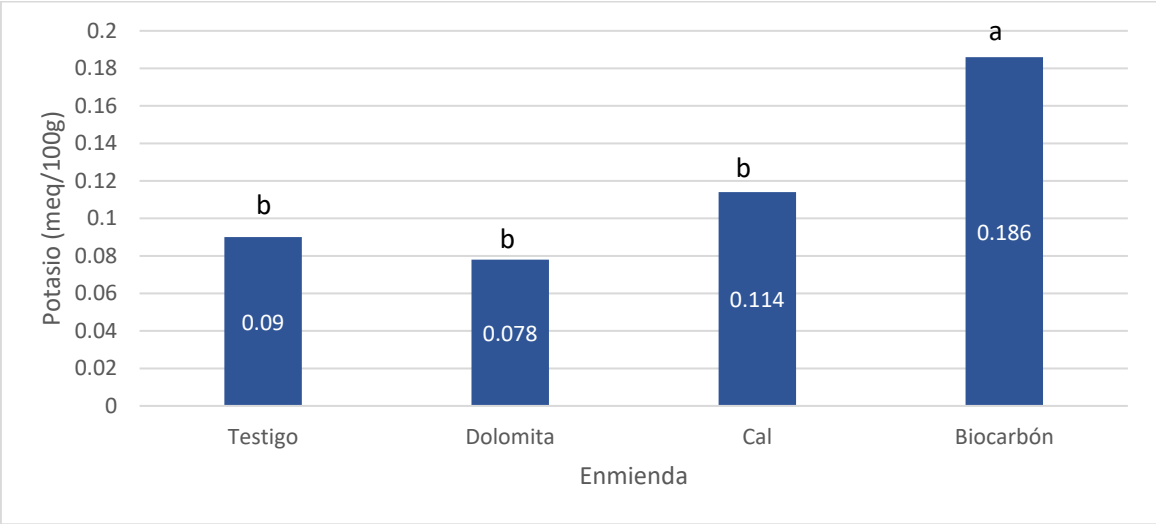
4.2.10 Catión intercambiable de potasio

De acuerdo al análisis de varianza sobre el catión intercambiable de potasio, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 32,066%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias del catión intercambiable de potasio después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que los tratamientos de dolomita (0,078 meq/100g), testigo (0,09 meq/100g) y cal (0,114 meq/100g) no presentan diferencias significativas. Por otro lado, los

tratamientos mencionados con los tratamientos de biocarbón (0,186 meq/100g) presentan diferencias estadísticamente significativas.

Figura 16.

Promedio de catión intercambiable de potasio de los tratamientos.



Fuente: Propia

Como se puede observar el potasio mayor contenido potasio al suelo siendo 106,6% mayor respecto al testigo, ello se debe al contenido del material utilizado para la producción del biocarbón. De acuerdo a lo mencionado por Bialias et al., 2023, Las temperaturas de pirólisis más altas (>500 °C) aumentan el contenido total de potasio, los biocarbón producidos a menor a 500 °C tienen mayores contenidos de K soluble en agua e intercambiable con iones (Bilias et al., 2023). El biocarbón del presente estudio es mayor a 700°C e igual contiene mayor cantidad de potasio intercambiable.

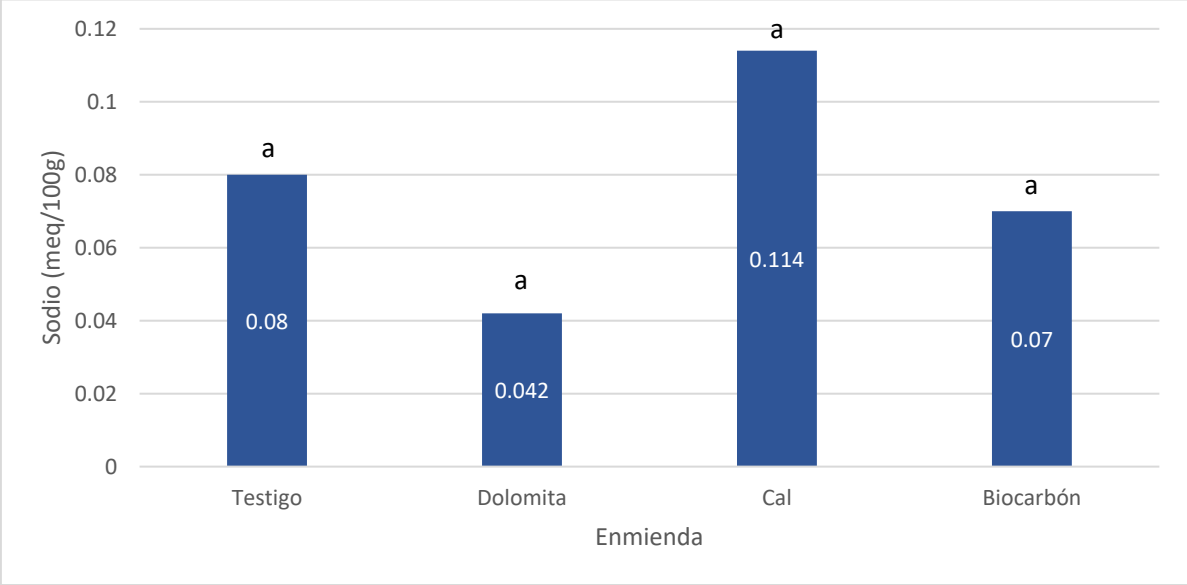
4.2.11 Catión intercambiable de sodio

De acuerdo al análisis de varianza sobre el catión intercambiable de sodio, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 90,210%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias del catión intercambiable de sodio después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se

observó que los tratamientos de dolomita (0,042 meq/100g), biocarbón (0,07 meq/100g), testigo (0,08 meq/100g) y cal (0,114 meq/100g) no presentan diferencias significativas.

Figura 17.

Promedio de catión intercambiable de sodio de los tratamientos.



Fuente: Propia

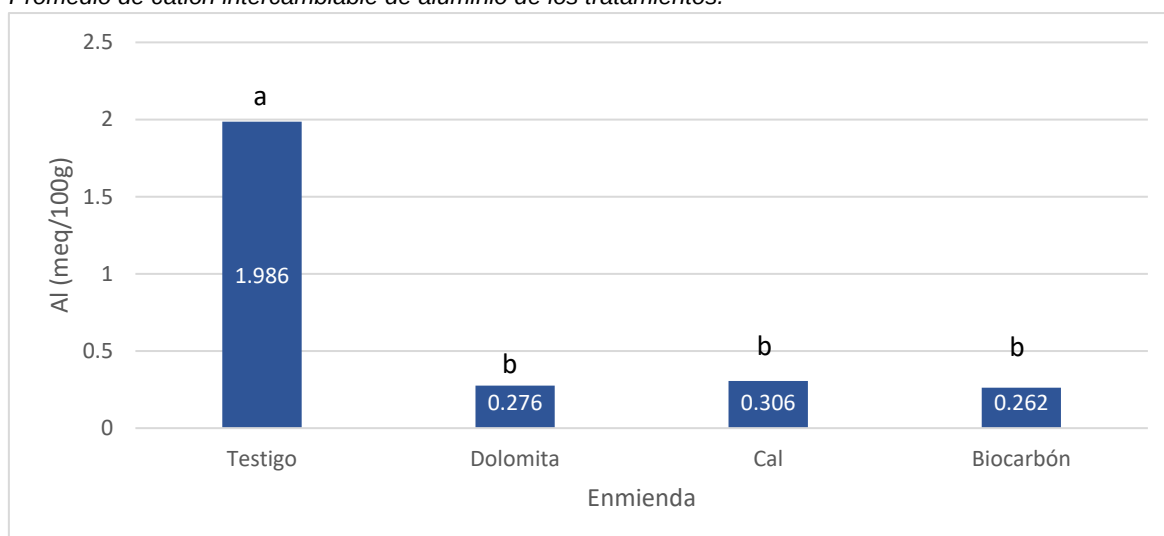
De acuerdo a los resultados de Bialias et al., 2023, el contenido de sodio en los tratamientos de biocarbón y cal dolomítica no incrementaron (Bilias et al., 2023), de manera coincidente con la presente investigación.

4.2.12 Catión intercambiable de aluminio

De acuerdo al análisis de varianza sobre catión intercambiable de aluminio, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 11,199%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de catión intercambiable de aluminio después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que los tratamientos de biocarbón (0,262 meq/100g), dolomita (0,276 meq/100g) y cal (0,306 meq/100g) no presentan diferencias significativas. Por otro lado, los tratamientos mencionados con el testigo (1,986 meq/100g) presentan diferencias estadísticamente significativas.

Figura 18.

Promedio de catión intercambiable de aluminio de los tratamientos.



Fuente: Propia

Se puede observar que las enmiendas disminuyeron el contenido de aluminio, siendo los tratamientos con biocarbón que disminuyeron en mayor cantidad en un 86,81% respecto al testigo, seguido de la dolomita 86,10% y finalmente los tratamientos con cal en un 84,59%. Generalmente, se incorporan materiales encalantes en suelos ácidos, que hidrolizan el agua y producen iones OH^- , neutralizan los iones H^+ y precipita el Al^{+3} en forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$, de acuerdo a los resultados obtenidos por Alonso et al, 2016, Wu et al, 2020, Hale et al., 2020 y Bialias et al., 2023, demuestran la reducción de Al^{+3} con el uso de cal, cal dolomítica y biocarbón (Alonso et al, 2016, Wu et al, 2020, Hale et al., 2020 y Bialias et al., 2023)

4.2.13 Textura

Los resultados en cuanto a la textura de los tratamientos muestran que no hubo diferencias entre los tipos de enmiendas, estos fueron homogéneos. La clase de textura de los tratamientos fueron Franco.

Tabla 7.*Características de textura de los tratamientos.*

Enmienda	%Arena	%Limo	%Arcilla	Clase
Testigo	34,2	42	23,8	Franco
Dolomita	33,8	40,8	25,4	Franco
Cal	33,2	42	25	Franco
Biocarbón	34	44,4	22,2	Franco

Fuente: Propia

Finalmente, de acuerdo a los resultados, los cambios en los parámetros fisicoquímicos del suelo con la aplicación de las enmiendas presentaron lo siguiente: los tratamientos con biocarbón fueron significativamente mayores, el Pd (109,32%) y Kd (224,24%), CIC (5,67%) y cationes intercambiables: Ca^{2+} (28,3%), Mg^{2+} (64,4%), K^{+} (106,67%); el Ca^{2+} y Mg^{2+} con la dolomita (43,95% y 171,73%) y el Ca^{2+} con la cal agrícola (52,35%). Además, todos los tratamientos con enmiendas disminuyeron la cantidad de Al^{3+} , el biocarbón en 86,81%, la dolomita en 86,10 % y la cal agrícola en 84,59% (Tabla 8).

Tabla 8.

Resumen de caracterización fisicoquímica asociada a la fertilidad del suelo

Tratamiento	pH		CE		MO		N		P		K		CIC		Ca ⁺²		Mg ⁺²		K ⁺		Na ⁺		Al ³⁺	
			mS.m ⁻¹		(%)				mg.Kg ⁻¹								cmol. Kg ⁻¹							
Testigo	4,48	d	17,68	b	2,07	ab	0,104	ab	28,01	b	62,224	b	6,88	b	2,812	b	1,91	c	0,090	b	0,08	a	1,986	a
Dolomita	6,72	a	20,18	b	2,10	ab	0,104	ab	31,11	b	50,432	b	9,642	a	4,048	a	5,19	a	0,078	b	0,042	a	0,276	b
Cal	5,60	c	18,78	b	2,02	b	0,100	b	32,86	b	56,792	b	6,222	b	4,284	a	1,40	c	0,114	b	0,114	a	0,306	b
Biocarbón	6,42	b	41,88	a	2,46	a	0,122	a	58,63	a	201,758	a	7,270	b	3,608	a	3,14	b	0,186	a	0,07	a	0,262	b

*Promedios con la misma letra representan tratamientos estadísticamente similares (p < 0.05) según la prueba de Duncan. N, P y K en su forma disponible.

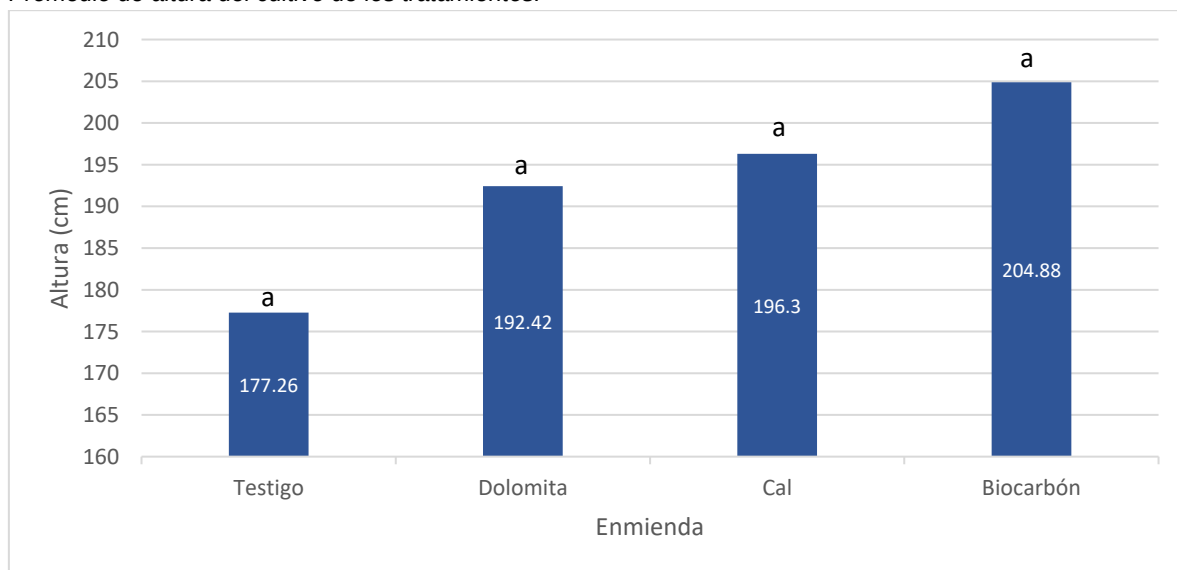
4.3 Efecto de biocarbón, cal y dolomita agrícola en el desarrollo del cultivo de maíz.

4.3.1 Altura, número de hojas y diámetro de tallo

Los resultados respecto a la altura de las plantas presentan un coeficiente de variación de 15,27%, según el análisis de varianza. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de la altura después de la cosecha mediante la prueba de Duncan, se observó que los tratamientos de testigo (177.26 cm), dolomita (192.42 cm), cal (196.3 cm) y biocarbón (204.88 cm) no presentan diferencias significativas. Sin embargo, se puede observar que el tratamiento con biocarbón presenta un incremento mayor con 15,58%, seguido de los tratamientos con cal (10,74%) y dolomita (8,55%).

Figura 19.

Promedio de altura del cultivo de los tratamientos.



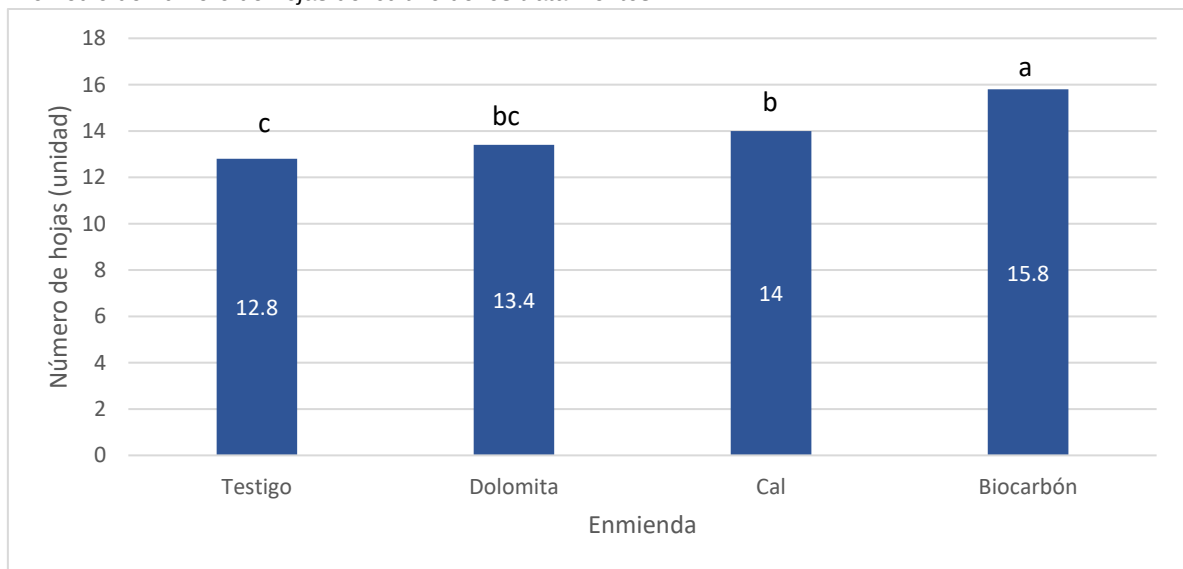
Fuente: Propia

Respecto a los resultados del número de hojas de los tratamientos, según el análisis de varianza, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 5,30%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, y se observó que el testigo (12,8) y el tratamiento de dolomita (13,4) no presentan diferencias

significativas, al igual que el tratamiento de dolomita y cal (14). Sin embargo, el testigo y los tratamientos con cal y biocarbón (15,8) si presentaron diferencias estadísticamente significativas. Asimismo, se puede observar que los tratamientos con biocarbón presentaron un mayor incremento con un 23,44%, seguido de los tratamientos con cal con un 9,38% y dolomita con 4,69% respecto al testigo.

Figura 20.

Promedio de número de hojas del cultivo de los tratamientos.

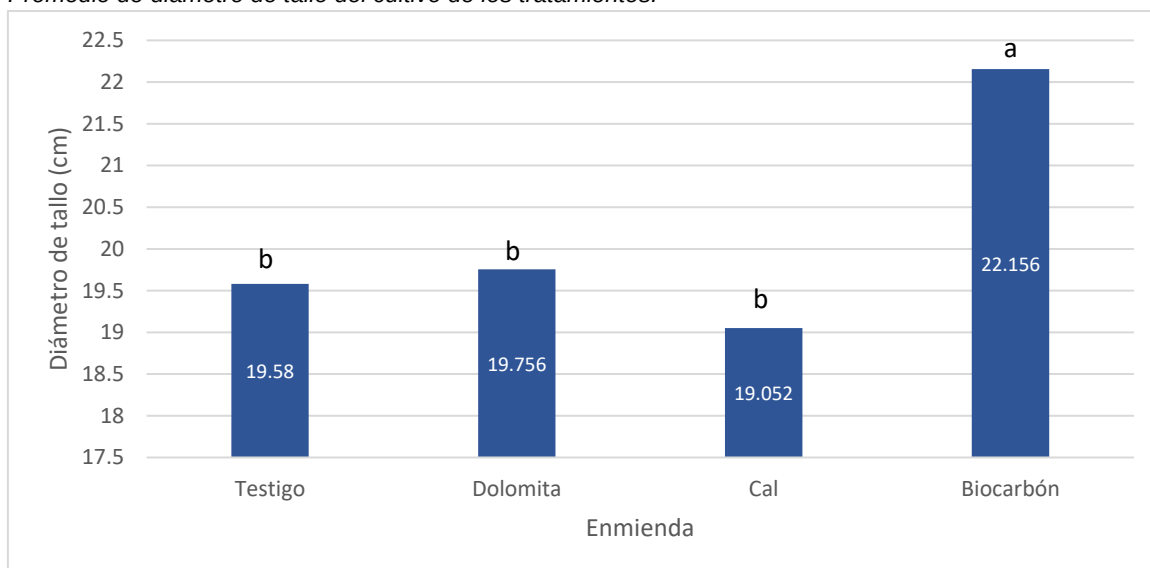


Fuente: Propia

Por otro lado, los resultados del diámetro de tallo de los tratamientos, según el análisis de varianza, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 8,82%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, y se observó que el tratamiento con cal (19,05 cm), testigo (19,58 cm) y dolomita (19,76 cm) no presentan diferencias significativas. Sin embargo, el tratamiento con biocarbón (22,16 cm) con el testigo, y los tratamientos de cal y dolomita por separado presentaron diferencias estadísticamente significativas. En cuanto al porcentaje de incremento respecto al testigo, los tratamientos con biocarbón presentaron un mayor valor 13,17%.

Figura 21.

Promedio de diámetro de tallo del cultivo de los tratamientos.



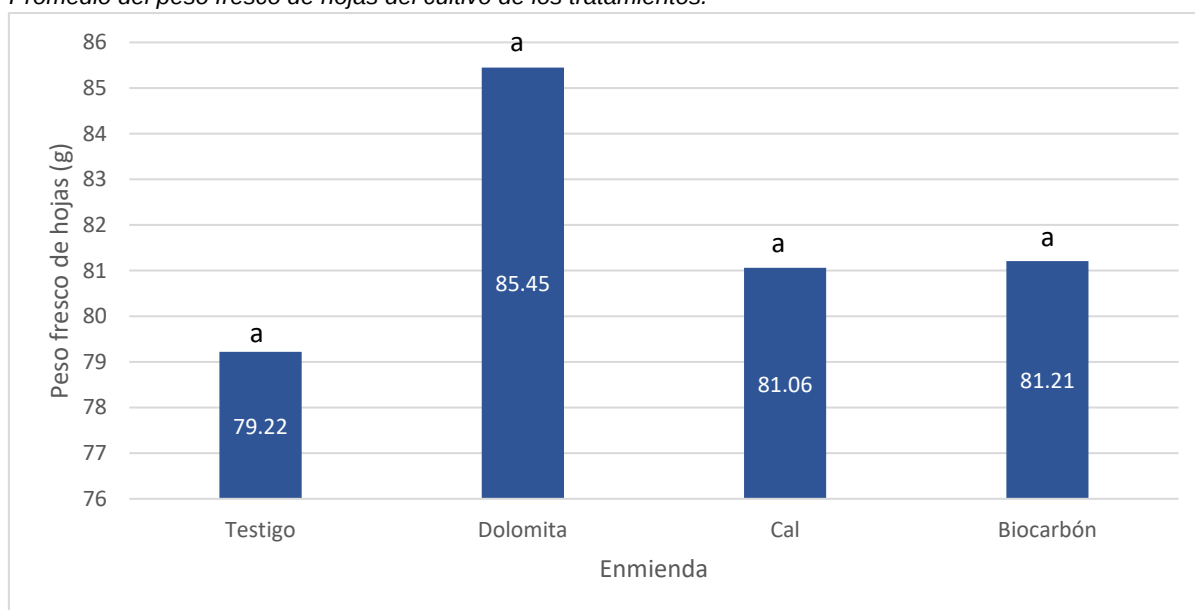
Fuente: Propia

4.3.2 Peso fresco y seco de hojas, tallo, fruto

De acuerdo al análisis de varianza sobre el peso fresco de hojas, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 12,43%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de peso fresco de hojas después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que el testigo (79,22 g), los tratamientos de cal (81,06 g), biocarbón (81,21 g), y dolomita (85,45 g) no presentan diferencias significativas. Respecto al porcentaje de los tratamientos con respecto al testigo fueron de 7,86% (dolomita), 2,51% (biocarbón) y 2,32% (cal), según lo observado en campo, los tratamientos con dolomita presentaron mayor altura, sin embargo, las hojas que se encontraban en la parte baja de la planta se encontraban en proceso de secarse.

Figura 22.

Promedio del peso fresco de hojas del cultivo de los tratamientos.

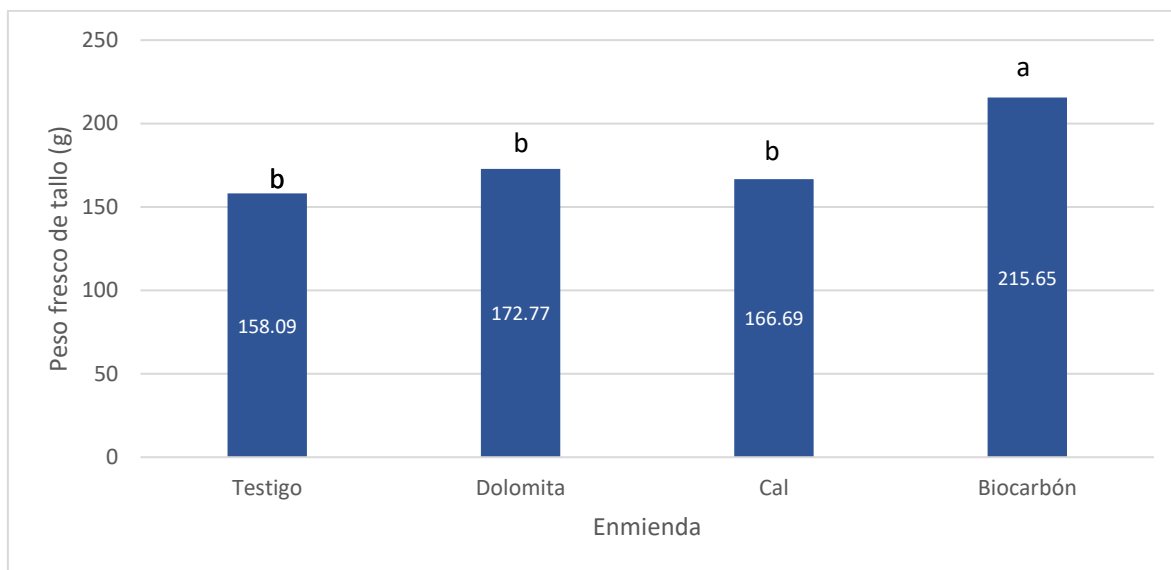


Fuente: Propia

De acuerdo al análisis de varianza sobre el peso fresco de tallo, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 9,79%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de peso fresco de tallo después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que el testigo (158,09 g), los tratamientos de cal (166,69 g) y dolomita (172,77 g) no presentan diferencias significativas. Sin embargo, el tratamiento de biocarbón (215,65 g) y cada uno de los tratamientos por separado presenta diferencias estadísticamente significativas. Respecto al porcentaje de los tratamientos respecto al testigo, los tratamientos con biocarbón fueron 36,41% mayor, seguido de la dolomita (9,29%) y cal (5,44%).

Figura 23.

Promedio del peso fresco de tallo del cultivo de los tratamientos.

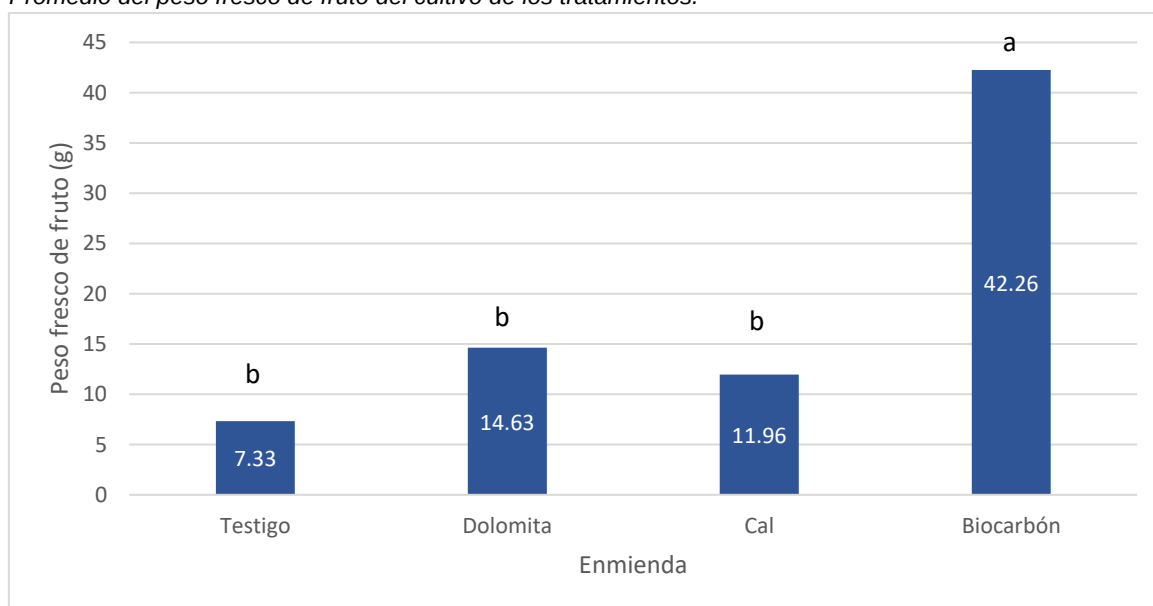


Fuente: Propia

De acuerdo al análisis de varianza sobre el peso fresco de fruto, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 60,26%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de peso fresco de fruto después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que el testigo (7,33 g), los tratamientos de cal (11,96 g) y dolomita (14,63 g) no presentan diferencias significativas. Sin embargo, el tratamiento de biocarbón (42,26 g) y cada uno de los tratamientos por separado presenta diferencias estadísticamente significativas. Respecto al porcentaje de los tratamientos respecto al testigo, los tratamientos con biocarbón fueron 476,53% mayor, seguido de la dolomita (99,59%) y cal (63,16%).

Figura 24.

Promedio del peso fresco de fruto del cultivo de los tratamientos.

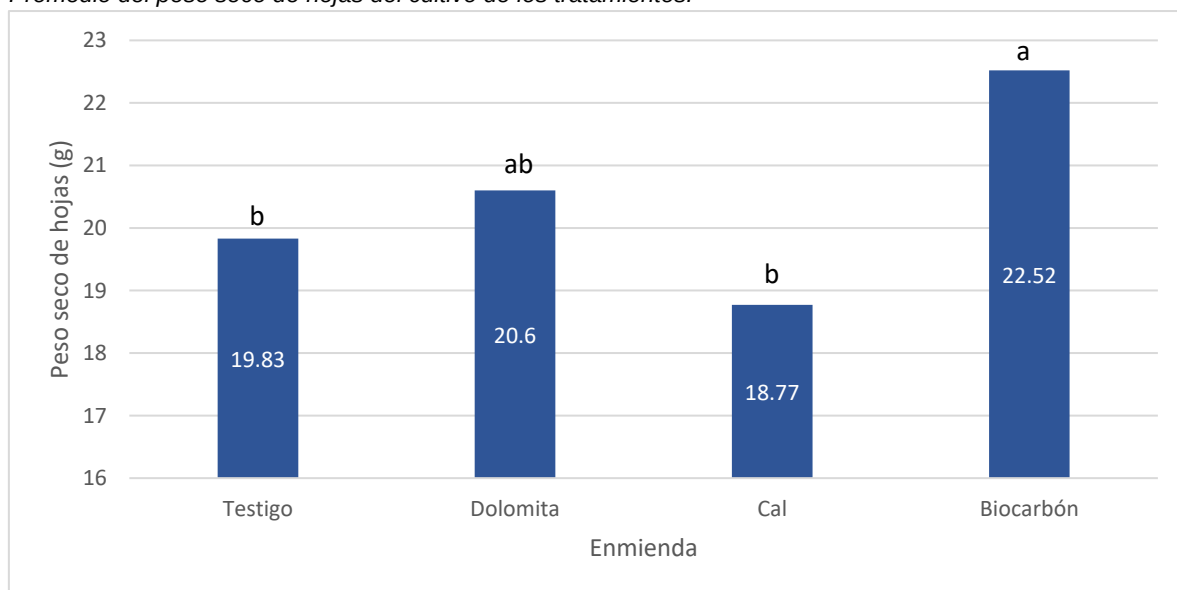


Fuente: Propia

De acuerdo al análisis de varianza sobre el peso seco de hojas, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 8,60%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de peso seco de hojas después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que el biocarbón (22,52 g) y dolomita (20,60 g) no presentan diferencias significativas; al igual que el tratamiento de la dolomita, testigo (19,83 g) y cal (18,77 g) no presentan diferencias significativas. Sin embargo, el tratamiento de biocarbón, con el testigo y cal por separado presentan diferencias estadísticamente significativas. Respecto al porcentaje de los tratamientos respecto al testigo, los tratamientos con biocarbón fueron 13,57% mayor, seguido de la dolomita (3,88%) y el tratamiento con cal estuvo por debajo del testigo.

Figura 25.

Promedio del peso seco de hojas del cultivo de los tratamientos.

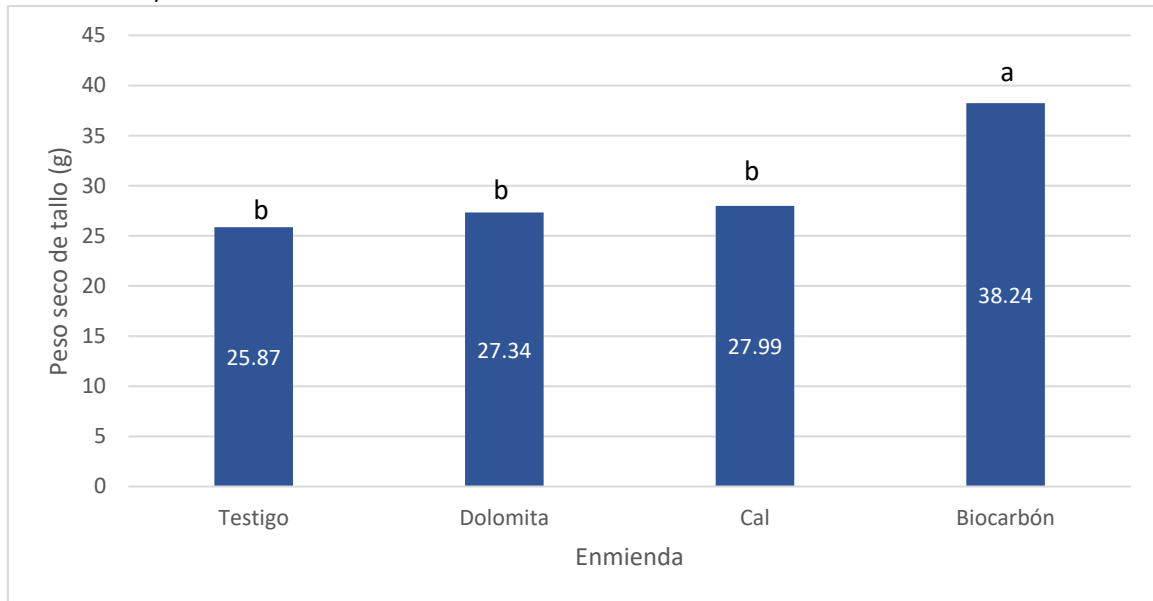


Fuente: Propia

De acuerdo al análisis de varianza sobre el peso seco de tallo, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 9,03%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de peso seco de tallo después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que el testigo (25,87 g), los tratamientos de dolomita (27,34 g) y cal (27,99 g) no presentan diferencias significativas. Sin embargo, el tratamiento de biocarbón (38,24 g) y cada uno de los tratamientos por separado presenta diferencias estadísticamente significativas. Respecto al porcentaje de los tratamientos respecto al testigo, los tratamientos con biocarbón fueron 47,81% mayor, seguido de la cal (8,19%) y dolomita (5,68%).

Figura 26.

Promedio del peso seco de tallo del cultivo de los tratamientos.

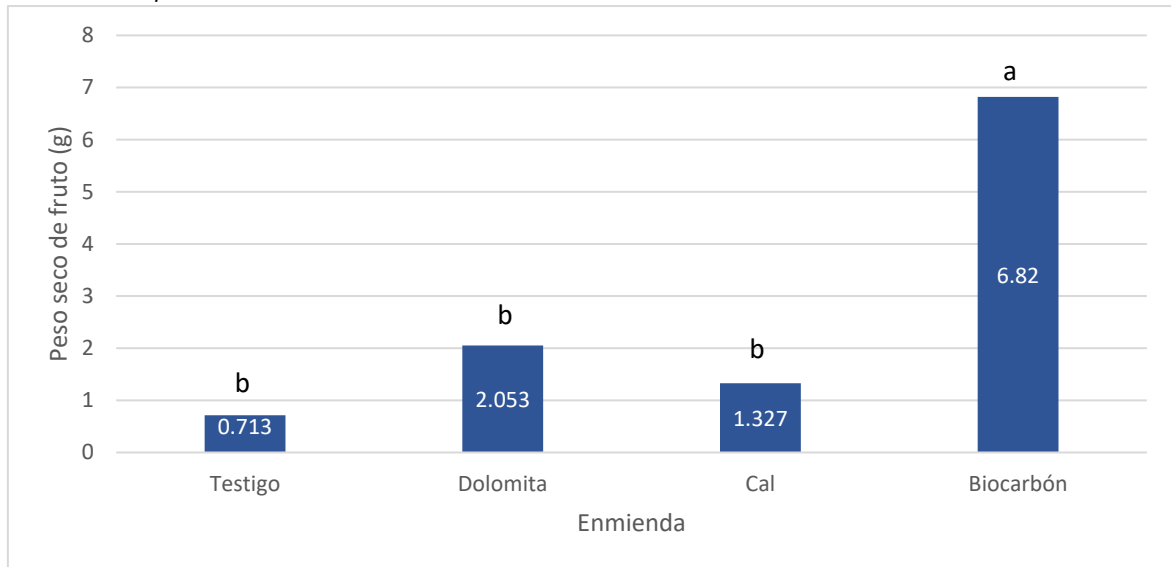


Fuente: Propia

De acuerdo al análisis de varianza sobre el peso seco de fruto, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 72,88%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias de peso fresco de fruto después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que el testigo (0,71 g), los tratamientos de cal (1,33 g) y dolomita (2,05 g) no presentan diferencias significativas. Sin embargo, el tratamiento de biocarbón (6,82 g) y cada uno de los tratamientos por separado presenta diferencias estadísticamente significativas. Respecto al porcentaje de los tratamientos respecto al testigo, los tratamientos con biocarbón fueron 856,52% mayor, seguido de la dolomita (187,94%) y cal (86,11%).

Figura 27.

Promedio del peso seco de fruto del cultivo de los tratamientos.



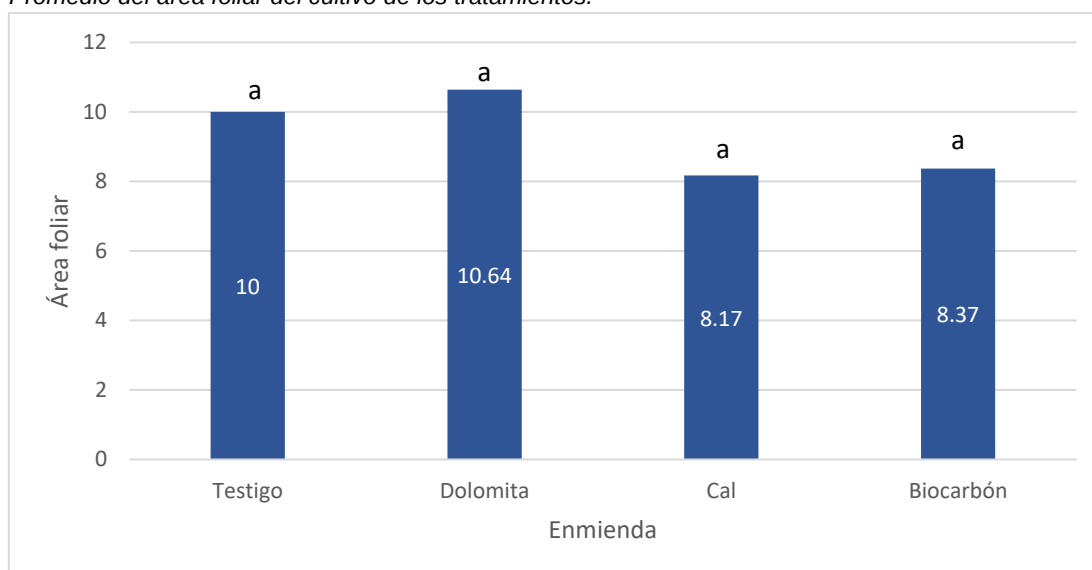
Fuente: Propia.

4.3.3 Área foliar

De acuerdo al análisis de varianza sobre el área foliar, en cuanto al testigo y las enmiendas (dolomita, cal y biocarbón), presentan un coeficiente de variación de 37,53%. Asimismo, se realizó el análisis de comparaciones de medias del área foliar después de la cosecha, mediante la prueba de Duncan, se observó que el testigo (10 g), los tratamientos de cal (8,17 g), biocarbón (8,37 g) y dolomita (10,64 g) no presentan diferencias significativas.

Figura 28.

Promedio del área foliar del cultivo de los tratamientos.



Fuente: Propia

Por tanto, de las evaluaciones agronómicas hechas al cultivo de maíz, se halló una mayor cantidad de hojas con el tratamiento de biocarbón (23,43%) y cal agrícola (9,3%); un mayor diámetro de tallo (13,15%); peso fresco de tallo (36,4%), peso fresco de fruto (476,53%); peso seco de hojas (13,57%), peso seco de tallo (47,81%), peso seco de fruto (856,52%), con el biocarbón (Tabla 9). Lo cual significaría un efecto considerable del uso de biocarbón en el cultivo de maíz, pudiéndose obtener un aumento en el rendimiento del cultivo y mayor rentabilidad, para lo cual la estrategia sería reducir la cantidad de fertilizante nitrogenado, debido a que el costo del biocarbón es mucho menor al costo del fertilizante nitrogenado sintético (Ladd et al., 2017).

Respecto a los resultados de Hale et al. (2020), los tratamientos con biocarbón incrementaron el rendimiento del maíz siete veces y cinco veces los tratamientos con cal. (Hale et al., 2020).

Tabla 9.

Características agronómicas del maíz luego de la aplicación de enmiendas.

Tratamiento	Altura		N° de hojas		Diámetro de tallo		Peso fresco de hojas		Peso fresco de tallo		Peso fresco de fruto		Peso seco de hojas		Peso seco de tallo		Peso seco de fruto		Área foliar	
	cm				mm								g						cm ²	
Testigo	177,26	a	12,8	c	19,58	b	79,22	a	158,09	b	07,33	b	19,83	b	25,87	b	0,713	b	10	a
Dolomita	192,42	a	13,4	bc	19,756	b	85,45	a	172,77	b	14,63	b	20,6	ab	27,34	b	2,053	b	10,64	a
Cal	196,3	a	14	b	19,052	b	81,06	a	166,69	b	11,96	b	18,77	b	27,99	b	1,327	b	8,17	a
Biocarbón	204,88	a	15,8	a	22,156	a	81,21	a	215,65	a	42,26	a	22,52	a	38,24	a	6,82	a	8,37	a

*Promedios con la misma letra representan tratamientos estadísticamente similares ($p < 0.05$) según la prueba de Duncan. El N, P y K en su forma disponible.

Conclusiones

Dentro de las primeras 24 horas, la aplicación de las enmiendas generaron la mayor emisión de CO₂. El tratamiento con biocarbón presentó el mayor valor, esto se explicaría por la presencia de mayor cantidad de materia orgánica disuelta y la elevación del pH, lo que intensificó la actividad microbiana. En la emisión de CO₂ acumulada, los tratamientos de cal llegaron a disminuir respecto al testigo.

La aplicación de las dosis de dolomita, cal y biocarbón disminuyeron los valores de aluminio intercambiable en el suelo ácido, a su vez que incrementaron el pH y Ca²⁺. El tratamiento de biocarbón mejoró el contenido de P y K disponible, CIC y cationes intercambiables, y la dolomita mejoró en la CIC y Mg²⁺.

Adicionalmente, se observó un mejor crecimiento y desarrollo a través de los parámetros agronómicos evaluados, donde se denota un efecto significativo con el uso de biocarbón. El uso de biocarbón presentó mejores resultados en el crecimiento del cultivo, N° de hojas, características del tallo, peso fresco y seco del fruto, siendo casi 5 y 9 veces mayor al testigo.

El biocarbón es una alternativa para mejorar las propiedades del suelo, resaltando el incremento del carbono en el suelo.

Recomendaciones

Para determinar las dosis de cal o dolomita se debe considerar el porcentaje de carbonato de calcio y tamaño de las partículas de estos, además se recomienda realizar ensayos previos para conocer el comportamiento y tiempo de reacción de la cal, dolomita y biocarbón al incorporarlo al suelo ácido.

Dado que la emisión de CO₂ fue muy alta después de la aplicación del biocarbón, se recomienda incorporarlo profundamente en el perfil del suelo para minimizar sus pérdidas. Asimismo, se debe evaluar otros tipos de biocarbón generados a alta temperatura ya que contienen menor cantidad de carbono lábil.

Evaluar diferentes tasas de aplicación de las enmiendas en diversas condiciones edafoclimáticas y en un mayor período de tiempo, sobre todo con el uso del biocarbón ya que hay informes en campo mencionan que este puede reducir la acidez del suelo hasta 4 y 8 años.

Referencias bibliográficas

- Alonso, L., Cruz, A., Jiménez, D., Ocampo, Á., & Parra, S. (2016). Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento de maíz. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 19(2), 341-349. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262016000200011&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Arévalo-Gardini, E., Canto, M., Alegre, J., Loli, O., Julca, A., & Baligar, V. (2015). Changes in Soil Physical and Chemical Properties in Long Term Improved Natural and Traditional Agroforestry Management Systems of Cacao Genotypes in Peruvian Amazon. *PLOS ONE*, 10(7), e0132147. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132147>
- Basak, B. B., Sarkar, B., Saha, A., Sarkar, A., Mandal, S., Biswas, J. K., Wang, H., & Bolan, N. S. (2022). Revamping highly weathered soils in the tropics with biochar application: What we know and what is needed. En *Science of the Total Environment* (Vol. 822). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153461>
- Bernier, R., & Alfaro, M. (2006). *Acidez de los suelos y efectos del encalado*. <https://hdl.handle.net/20.500.14001/7075>
- Biasi, C., Lind, S. E., Pekkarinen, N. M., Huttunen, J. T., Shurpali, N. J., Hyvönen, N. P., Repo, M. E., & Martikainen, P. J. (2008). Direct experimental evidence for the contribution of lime to CO₂ release from managed peat soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 10(40), 2660-2669. <https://doi.org/10.1016/J.SOILBIO.2008.07.011>
- Bilias, F., Kalderis, D., Richardson, C., Barbayiannis, N., & Gasparatos, D. (2023). Biochar application as a soil potassium management strategy: A review. *Science of The Total Environment*, 858, 159782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159782>
- Bolan, N., Hoang, S. A., Beiyuan, J., Gupta, S., Hou, D., Karakoti, A., Joseph, S., Jung, S., Kim, K.-H., Kirkham, M. B., Kua, H. W., Kumar, M., Kwon, E. E., Ok, Y. S., Perera, V., Rinklebe, J., Shaheen, S. M., Sarkar, B., Sarmah, A. K., ... Van Zwieten, L. (2022). Multifunctional applications of biochar beyond carbon storage. *International Materials Reviews*, 67(2), 150-200. <https://doi.org/10.1080/09506608.2021.1922047>
- Bolan, N., Sarmah, A. K., Bordoloi, S., Bolan, S., Padhye, L. P., Van Zwieten, L., Sooriyakumar, P., Khan, B. A., Ahmad, M., Solaiman, Z. M., Rinklebe, J., Wang, H., Singh, B. P., & Siddique, K. H. M. (2023). Soil acidification and the liming potential of biochar. *Environmental Pollution*, 317, 120632. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120632>
- Castro, H., & Guerrero, J. C. (2018). Evaluación de materiales de encalado mediante pruebas de incubación en un oxisol de la altillanura colombiana. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(2), 14-26. <https://doi.org/10.22267/rcia.183502.88>
- Damian Suclupe, M. J. (2018). Plan de enmiendas, yeso agrícola, compost mejorado y enriquecido con EM y humus de lombriz, para mejorar el suelo. *Arnaldoa*, 25(1), 141-158. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.251.25109>
- De Rentabilidad, I., Producción, E. N., Maíz En Perú: N-Fertilizantes, D., Biochar, Y., Ladd, B., & Dumler, S. (2017). *INCREASING PROFITABILITY IN MAIZE PRODUCTION IN PERU: N-FERTILISER AND BIOCHAR*. 15(2), 351-358.

- Deal, C., Brewer, C. E., Brown, R. C., Okure, M. A. E., & Amoding, A. (2012). Comparison of kiln-derived and gasifier-derived biochars as soil amendments in the humid tropics. *Biomass and Bioenergy*, 37, 161-168. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.017>
- Desalegn, M. Y., Miheretu, B. A., & Gobeze, T. (2023). Impact of land use/land cover changes on soil erosion risk in upper Mile River sub-watershed, North Eastern highlands of Ethiopia. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/24749508.2023.2206063>
- Espinosa, J., & Molina, E. (2015). *Acidez y encalado de los suelos (Soil acidity and liming) Soil acidity and evaluation of application of liming materials View project Soil physical-chemical and biological properties in Andean Ecuador View project*. <https://doi.org/10.13140/2.1.3888.9281>
- Fageria, N. K., & Nascente, A. S. (2014). Management of Soil Acidity of South American Soils for Sustainable Crop Production. *Advances in Agronomy*, 128, 221-275. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802139-2.00006-8>
- Fang Jingyun, Liu Shaohui, & Zhao Kun. (1998). Factors affecting soil respiration in reference with temperature's role in the global scale. *Chinese Geographical Science*, 8(3), 246-255. <https://doi.org/10.1007/S11769-997-0018-9/METRICS>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijckx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15(12). <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- Glaser, B., & Lehr, V.-I. (2019). Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. *Scientific Reports*, 9(1), 9338. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45693-z>
- Guerra Laura, P. A. (2015). *Producción y caracterización de Biochar a partir de la biomasa residual de sistemas agroforestales y de agricultura convencional en la Amazonía Peruana*.
- Hale, S. E., Nurida, N. L., Jubaedah, Mulder, J., Sørmo, E., Silvani, L., Abiven, S., Joseph, S., Taherymoosavi, S., & Maizeelissen, G. (2020). The effect of biochar, lime and ash on maize yield in a long-term field trial in a Ultisol in the humid tropics. *Science of the Total Environment*, 719. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137455>
- Johannes Lehmann, & Stephen Joseph. (2009). *Biochar for Environmental Management*.
- Kamprath, E. J. (1984). *9 Crop Response to Lime on Soils in the Tropics*.
- Kane, S., Ulrich, R., Harrington, A., Stadie, N. P., & Ryan, C. (2021). Physical and chemical mechanisms that influence the electrical conductivity of lignin-derived biochar. *Carbon Trends*, 5, 100088. <https://doi.org/10.1016/J.CARTRE.2021.100088>
- Lefèvre, C., Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). *CARBONO ORGÁNICO DEL SUELO: el potencial oculto* (FAO). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6e5e1fa9-ef55-4198-9160-fa580483f991/content>

- Luo, Y., & Zhou, X. (2006). Controlling Factors. *Soil Respiration and the Environment*, 79-105. <https://doi.org/10.1016/B978-012088782-8/50005-X>
- Lyon, S. W., Fischer, B. M. C., Morillas, L., Conejo, J. R., Sánchez-Murillo, R., Serrano, A. S., Frentress, J., Cheng, C. H., Garcia, M., & Johnson, M. S. (2022). On the Potential of Biochar Soil Amendments as a Sustainable Water Management Strategy. *Sustainability (Switzerland)*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/su14127026>
- MAHER, M., PRASAD, M., & RAVIV, M. (2008). ORGANIC SOILLESS MEDIA COMPONENTS. En *Soilless Culture* (pp. 459-504). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-044452975-6.50013-7>
- Manrique, D., Torres, C., Gomez, L., & Moreno, H. (2021). Emisiones de CO₂ por aplicación de cal en suelos ácidos de Colombia. *Grupo de Cambio Global – Subdirección de estudios Ambientales (SEA) – IDEAM*.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia Jefe, W., Péan, C., De Operaciones, J., Pidcock, R., De Comunicaciones, J., Connors Funcionaria, S., Robin, J. B., Funcionario, M., Funcionario, Y. C., Zhou, X., Maycock Editor, T., Tignor, M., & Waterfield, T. (2019). *Resumen para responsables de políticas - Calentamiento global de 1,5 °C*. www.environmentalgraphiti.org
- Mosharrof, M., Uddin, M. K., Sulaiman, M. F., Mia, S., Shamsuzzaman, S. M., & Haque, A. N. A. (2021). Combined Application of Rice Husk Biochar and Lime Increases Phosphorus Availability and Maize Yield in an Acidic Soil. *Agriculture 2021, Vol. 11, Page 793, 11(8)*, 793. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE11080793>
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions. *Agronomy 2013, Vol. 3, Pages 313-339, 3(2)*, 313-339. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY3020313>
- Núñez Balderas, L. V., Aguirre Gómez, A., Hidalgo Moreno, C., Carrillo Ávila, N., & Etchevers Barra, J. D. (2020). Acid residues remediation from mines using biochar, monopotassium phosphate and lime: Mine residues remediation with biochar, lime and phosphates. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 36(3), 593-605. <https://doi.org/10.20937/RICA.53224>
- Oo, A. Z., Sudo, S., Akiyama, H., Win, K. T., Shibata, A., Yamamoto, A., Sano, T., & Hirono, Y. (2018). Effect of dolomite and biochar addition on N₂O and CO₂ emissions from acidic tea field soil. *PloS one*, 13(2). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0192235>
- Page, K. L., Allen, D. E., Dalal, R. C., & Slattery, W. (2009). Processes and magnitude of CO₂, CH₄, and N₂O fluxes from liming of Australian acidic soils: A review. En *Australian Journal of Soil Research* (Vol. 47, Número 8, pp. 747-762). <https://doi.org/10.1071/SR09057>
- Raich, J. W., & Schlesinger, W. H. (1992). The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus, Series B*, 44 B(2), 81-99. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v44i2.15428>
- Ray, R. L., Griffin, R. W., Fares, A., Elhassan, A., Awal, R., Woldesenbet, S., & Risch, E. (2020a). Soil CO₂ emission in response to organic amendments, temperature, and rainfall. *Scientific Reports*, 10(1), 5849. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62267-6>

- Ray, R. L., Griffin, R. W., Fares, A., Elhassan, A., Awal, R., Woldesenbet, S., & Risch, E. (2020b). Soil CO₂ emission in response to organic amendments, temperature, and rainfall. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62267-6>
- Rosas-Patiño, G., Puentes-Páramo, Y. J., & Menjivar-Flores, J. C. (2017). Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(3), 529-541. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742
- Saarnio, S. (2015). Impacts of biochar amendment on greenhouse gas emissions from agricultural soils. En *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers* (pp. 259-293). Wiley. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub63.2014.0045>
- Sadzawka, A., Carrasco, M., Grez, R., De La Luz María, Flores, H., & Neaman, A. (2006). *Métodos de Análisis Recomendados para los Suelos de Chile*. 164.
- Schnee, L. S., Ngakou, A., & Filser, J. (2021). Does biochar enhance soil organic matter formation in tropical soils? *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 648(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012195>
- Shetty, R., & Prakash, N. B. (2020). Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminium toxicity. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69262-x>
- Singh, B. P., Cowie, A. L., & Smernik, R. J. (2012). Biochar carbon stability in a clayey soil as a function of feedstock and pyrolysis temperature. *Environmental Science and Technology*, 46(21), 11770-11778. <https://doi.org/10.1021/es302545b>
- ŠLAPÁKOVÁ, B., JEŘÁBKOVÁ, J., VOŘÍŠEK, K., TEJNECKÝ, V., & DRÁBEK, O. (2018). The biochar effect on soil respiration and nitrification. *Plant, Soil and Environment*, 64(3), 114-119. <https://doi.org/10.17221/13/2018-PSE>
- Sven Villagarcia Hermoza, & Guillermo Aguirre Yato. (2014). *Manual de uso de fertilizantes para las condiciones del Perú*. Fondo Editorial - UNALM.
- Wan, W., Tan, J., Wang, Y., Qin, Y., He, H., Wu, H., Zuo, W., & He, D. (2020). Responses of the rhizosphere bacterial community in acidic crop soil to pH: Changes in diversity, composition, interaction, and function. *Science of the Total Environment*, 700. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134418>
- Wang, J., Chen, Z., Xiong, Z., Chen, C., Xu, X., Zhou, Q., & Kuzyakov, Y. (2015). Effects of biochar amendment on greenhouse gas emissions, net ecosystem carbon budget and properties of an acidic soil under intensive vegetable production. *Soil Use and Management*, 31(3), 375-383. <https://doi.org/10.1111/sum.12202>
- Wang, Y., Yao, Z., Zhan, Y., Zheng, X., Zhou, M., Yan, G., Wang, L., Werner, C., & Butterbach-Bahl, K. (2021). Potential benefits of liming to acid soils on climate change mitigation and food security. *Global Change Biology*, 27(12), 2807-2821. <https://doi.org/10.1111/gcb.15607>
- Wang, Z., Li, Y., Chang, S. X., Zhang, J., Jiang, P., Zhou, G., & Shen, Z. (2014). Contrasting effects of bamboo leaf and its biochar on soil CO₂ efflux and labile organic carbon in an intensively managed Chinese chestnut plantation. *Biology and Fertility of Soils*, 50(7), 1109-1119. <https://doi.org/10.1007/S00374-014-0933-8/METRICS>

- Wang, Z., Zheng, H., Luo, Y., Deng, X., Herbert, S., & Xing, B. (2013). Characterization and influence of biochars on nitrous oxide emission from agricultural soil. *Environmental Pollution*, 174, 289-296. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.12.003>
- Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(5). <https://doi.org/10.1038/ncomms1053>
- Wu, H., Hao, X., Xu, P., Hu, J., Jiang, M., Shaaban, M., Zhao, J., Wu, Y., & Hu, R. (2020). CO₂ and N₂O emissions in response to dolomite application are moisture dependent in an acidic paddy soil. *Journal of Soils and Sediments*, 20(8), 3136-3147. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02652-w>
- Wu, H., Hu, J., Shaaban, M., Xu, P., Zhao, J., & Hu, R. (2021). The effect of dolomite amendment on soil organic carbon mineralization is determined by the dolomite size. *Ecological Processes*, 10(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00278-x>
- Wu, S., Zhang, Y., Tan, Q., Sun, X., Wei, W., & Hu, C. (2020). Biochar is superior to lime in improving acidic soil properties and fruit quality of Satsuma mandarin. *Science of the Total Environment*, 714. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136722>
- Yang, Y., Sun, K., Liu, J., Chen, Y., & Han, L. (2022a). Changes in soil properties and CO₂ emissions after biochar addition: Role of pyrolysis temperature and aging. *Science of The Total Environment*, 839, 156333. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156333>
- Yang, Y., Sun, K., Liu, J., Chen, Y., & Han, L. (2022b). Changes in soil properties and CO₂ emissions after biochar addition: Role of pyrolysis temperature and aging. *Science of the Total Environment*, 839. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156333>
- Yazdanpanah, N. (2016). CO₂ emission and structural characteristics of two calcareous soils amended with municipal solid waste and plant residue. *Solid Earth*, 7(1), 105-114. <https://doi.org/10.5194/se-7-105-2016>
- Yuan, J. H., Xu, R. K., & Zhang, H. (2011). The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, 102(3), 3488-3497. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.11.018>
- Zhang, A., Liu, Y., Pan, G., Hussain, Q., Li, L., Zheng, J., & Zhang, X. (2009). Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain. *Plant and Soil*, 351(1-2), 263-275. <https://doi.org/10.1007/S11104-011-0957-X>
- Zhou, L., Zhou, X., Shao, J., Nie, Y., He, Y., Jiang, L., Wu, Z., & Hosseini Bai, S. (2016). Interactive effects of global change factors on soil respiration and its components: a meta-analysis. *Global change biology*, 22(9), 3157-3169. <https://doi.org/10.1111/gcb.13253>
- ZHU, Q.-H., PENG, X.-H., HUANG, T.-Q., XIE, Z.-B., & HOLDEN, N. M. (2014). Effect of Biochar Addition on Maize Growth and Nitrogen Use Efficiency in Acidic Red Soils. *Pedosphere*, 24(6), 699-708. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(14\)60057-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(14)60057-6)

Anexos

Anexo 01: Análisis de varianza y prueba de Duncan – Resultados de suelo de los tratamientos	1
Anexo 02: Análisis de varianza y prueba de Duncan – Resultados del desarrollo de cultivo de los tratamientos.....	7
Anexo 03: Análisis de varianza y prueba de Duncan – Resultados del cultivo de los tratamientos	12

Anexo 01

Análisis de varianza y prueba de Duncan – Resultados de suelo de los tratamientos

➤ Potencial de hidrógeno

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
pH	20	0.99	0.99	1.25

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F. V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	15.07	3	5.02	957	<0.0001
Enmienda	15.07	3	5.02	957	<0.0001
Error	0.08	16	0.01		
Total	15.15	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0053 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Dolomita	6.72	5	0.03	A
Biocarbón	6.42	5	0.03	B
Cal	5.6	5	0.03	C
Testigo	4.48	5	0.03	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ Conductividad eléctrica

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CE	20	0.94	0.93	11.64

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1999.45	3	666.48	81.09	<0.0001
Enmienda	1999.45	3	666.48	81.09	<0.0001
Error	131.51	16	8.22		
Total	2130.96	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 8.2195 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	41.880	5	1.28	A
Dolomita	20.180	5	1.28	B
Cal	18.780	5	1.28	B
Testigo	17.680	5	1.28	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Materia Orgánica**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
MO	20	0.32	0.19	13.04

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.60	3	0.20	2.53	0.0942
Enmienda	0.60	3	0.20	2.53	0.0942
Error	1.27	16	0.08		
Total	1.87	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0794 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	2.46	5	0.13	A
Dolomita	2.10	5	0.13	A B
Testigo	2.07	5	0.13	A B
Cal	2.02	5	0.13	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Nitrógeno disponible**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
N	20	0.29	0.16	13.80

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.0015	3	0.00049	2.20	0.1272
Enmienda	0.0015	3	0.00049	2.20	0.1272
Error	0.0035	16	0.00022		
Total	0.005	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0002 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	0.12	5	0.01	A
Dolomita	0.10	5	0.01	A B
Testigo	0.10	5	0.01	A B
Cal	0.10	5	0.01	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Fósforo disponible**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Pdisponible	20.00	0.81	0.78	17.51

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2992.54	3	997.51	22.94	<0.0001
Enmienda	2992.54	3	997.51	22.94	<0.0001
Error	695.73	16	43.48		
Total	3688.28	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 43.4833 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	58.63	5	2.95	A
Cal	32.87	5	2.95	B
Dolomita	31.12	5	2.95	B
Testigo	28.02	5	2.95	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Potasio disponible**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Kdisponible	20.00	0.95	0.94	18.12

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	79491.81	3	26497.27	93.67	<0.0001
Enmienda	79491.81	3	26497.27	93.67	<0.0001
Error	4526.15	16	282.88		
Total	84017.95	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 282.8842 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	201.76	5	7.52	A
Testigo	62.22	5	7.52	B
Cal	56.79	5	7.52	B
Dolomita	50.43	5	7.52	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Capacidad de Intercambio Catiónico**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
CIC	20.00	0.61	0.54	15.33

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	33.29	3	11.10	8.38	0.0014
Enmienda	33.29	3	11.10	8.38	0.0014
Error	21.18	16	1.32		
Total	54.47	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 1.3237 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Dolomita	9.64	5	0.515	A
Biocarbón	7.27	5	0.515	B
Testigo	6.88	5	0.515	B
Cal	6.22	5	0.515	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ Catión intercambiable de calcio

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Ca+2	20.00	0.54	0.45	15.75

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6.29	3	2.10	6.22	0.0053
Enmienda	6.29	3	2.10	6.22	0.0053
Error	5.40	16	0.34		
Total	11.69	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.3373 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Cal	4.28	5	0.26	A
Dolomita	4.05	5	0.26	A
Biocarbón	3.61	5	0.26	A
Testigo	2.81	5	0.26	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Catión intercambiable de magnesio**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Mg+2	20.00	0.88	0.86	20.90

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	42.79	3	14.26	38.43	<0.0001
Enmienda	42.79	3	14.26	38.43	<0.0001
Error	5.94	16	0.37		
Total	48.73	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.3711 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Dolomita	5.20	5	0.27	A
Biocarbón	3.14	5	0.27	B
Testigo	1.92	5	0.27	C
Cal	1.40	5	0.27	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Catión intercambiable de potasio**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
K+	20	0.61	0.54	32.07

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.04	3	0.012	8.31	0.0015
Enmienda	0.04	3	0.012	8.31	0.0015
Error	0.02	16	0.001		
Total	0.06	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0014 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	0.19	5	0.02	A
Cal	0.11	5	0.02	B
Testigo	0.09	5	0.02	B
Dolomita	0.08	5	0.02	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Catión intercambiable de sodio**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Na ⁺	20	0.15	0.00	90.21

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.01	3	0.004	0.93	0.45
Enmienda	0.01	3	0.004	0.93	0.45
Error	0.08	16	0.005		
Total	0.09	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0048 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Cal	0.11	5	0.03	A
Testigo	0.08	5	0.03	A
Biocarbón	0.07	5	0.03	A
Dolomita	0.04	5	0.03	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Catión intercambiable de aluminio**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Al ³⁺	20	0.99	0.99	11.20

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	10.90	3	3.63	578.9	<0.0001
Enmienda	10.90	3	3.63	578.9	<0.0001
Error	0.10	16	0.01		
Total	11.00	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.0063 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Testigo	1.99	5	0.04	A
Cal	0.31	5	0.04	B
Dolomita	0.28	5	0.04	B
Biocarbón	0.26	5	0.04	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Anexo 02

Análisis de varianza y prueba de Duncan – Resultados del desarrollo de cultivo de los tratamientos

➤ Altura

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
altura	20	0.13	0.00	15.27

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	1998.92	3	666.31	0.77	0.5277
Enmienda	1998.92	3	666.31	0.77	0.5277
Error	13852.31	16	865.77		
Total	15851.23	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 865.7693 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	204.88	5	13.16	A
Cal	196.300	5	13.16	A
Dolomita	192.420	5	13.16	A
Testigo	177.260	5	13.16	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ Número de hojas

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
hojas	20	0.74	0.69	5.30

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	25.2	3	8.4	15.27	0.0001
Enmienda	25.2	3	8.4	15.27	0.0001
Error	8.8	16	0.55		
Total	34	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.5500 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	15.8	5	0.33	A
Cal	14.000	5	0.33	B
Dolomita	13.400	5	0.33	B C
Testigo	12.800	5	0.33	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Diámetro del tallo**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
diam tallo	20	0.36	0.24	8.82

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	28.54	3	9.51	3.02	0.06
Enmienda	28.54	3	9.51	3.02	0.06
Error	50.44	16	3.15		
Total	78.98	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 3.1522 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	22.16	5	0.79	A
Dolomita	19.760	5	0.79	B
Testigo	19.580	5	0.79	B
Cal	19.050	5	0.79	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Peso fresco hojas**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso fresco hojas	20	0.06	0.00	12.43

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	104.29	3	34.76	0.34	0.8
Enmienda	104.29	3	34.76	0.34	0.8
Error	1650.33	16	103.15		
Total	1754.62	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 103.1458 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Dolomita	85.45	5	4.54	A
Biocarbón	81.210	5	4.54	A
Cal	81.060	5	4.54	A
Testigo	79.220	5	4.54	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Peso fresco del tallo**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso fresco tallo	20	0.67	0.61	9.79

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	9844.2	3	3281.4	10.77	0.0004
Enmienda	9844.2	3	3281.4	10.77	0.0004
Error	4874.13	16	304.63		
Total	14718.33	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 304.6332 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	215.65	5	7.81	A
Dolomita	172.77	5	7.81	B
Cal	166.69	5	7.81	B
Testigo	158.09	5	7.81	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Peso fresco del fruto**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso fresco fruto	20	0.64	0.57	60.26

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	3729.09	3	1243.03	9.44	0.0008
Enmienda	3729.09	3	1243.03	9.44	0.0008
Error	2107.29	16	131.71		
Total	5836.38	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 131.7054 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	42.26	5	5.13	A
Dolomita	14.630	5	5.13	B
Cal	11.960	5	5.13	B
Testigo	7.330	5	5.13	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Peso seco de hojas**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso seco hojas	20	0.43	0.33	8.60

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	37.56	3	12.52	4.06	0.03
Enmienda	37.56	3	12.52	4.06	0.03
Error	49.37	16	3.09		
Total	86.93	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 3.0856 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	22.52	5	0.79	A
Dolomita	20.60	5	0.79	A B
Testigo	19.83	5	0.79	B
Cal	18.77	5	0.79	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Peso seco del tallo**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso seco tallo	20	0.80	0.77	9.03

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	479.96	3	159.99	22.01	<0.0001
Enmienda	479.96	3	159.99	22.01	<0.0001
Error	116.29	16	7.27		
Total	596.25	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 7.2681 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	38.24	5	1.21	A
Cal	27.990	5	1.21	B
Dolomita	27.340	5	1.21	B
Testigo	25.870	5	1.21	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Peso seco fruto**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
peso seco fruto	20	0.65	0.58	72.88

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	116.11	3	38.7	9.79	0.0007
Enmienda	116.11	3	38.7	9.79	0.0007
Error	63.26	16	3.95		
Total	179.37	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 3.9538 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Biocarbón	6.82	5	0.89	A
Dolomita	2.050	5	0.89	B
Cal	1.330	5	0.89	B
Testigo	0.710	5	0.89	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

➤ **Área foliar**

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
área foliar	20	0.10	0.00	37.53

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
Modelo	22.13	3	7.38	0.61	0.62
Enmienda	22.13	3	7.38	0.61	0.62
Error	194.67	16	12.17		
Total	216.8	19			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 12.1669 gl: 16

Enmienda	Medias	n	E.E.	
Dolomita	10.64	5	1.56	A
Testigo	10.000	5	1.56	A
Biocarbón	8.370	5	1.56	A
Cal	8.170	5	1.56	A

Medias con una letra común no son significativa

Anexo 03

Análisis de varianza y prueba de Duncan – Resultados del cultivo de los tratamientos

