

Evaluación del aporte de nutrientes del biochar de *Guadua angustifolia* Kunth en el suelo y su efecto en el cultivo de *Zea mays* L., en condiciones controladas en la vereda Honda Porvenir del municipio de Pitalito

Laura Yisel Huelgos Astudillo

Maria Teresa Benavides Quiza

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Ingeniería Agroforestal

2026

Evaluación del aporte de nutrientes del biochar de *Guadua angustifolia* Kunth en el suelo y su efecto en el cultivo de *Zea mays* L., en condiciones controladas en la vereda Honda Porvenir del municipio de Pitalito

Laura Yisel Huelgos Astudillo

Maria Teresa Benavides

Asesor

Oscar Eduardo Valbuena Calderón

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente ECAPMA

Ingeniería Agroforestal

2026

Dedicatoria

A Mariana, Gabriel y a nuestros padres.

Agradecimientos

En primera instancia, queremos agradecer a Dios por guiarnos y darnos el conocimiento y la fortaleza necesaria para afrontar cada desafío que se nos ha presentado. A nuestros padres, por su apoyo incondicional, su amor y paciencia en todo este camino. A Mariana y a Gabriel, quienes han sido nuestra motivación para lograr este sueño tan anhelado.

Así mismo, queremos extender nuestro más profundo agradecimiento al Mag. Oscar y al Ing. Andrés, quienes nos brindaron las herramientas y el acompañamiento necesarios para llevar a cabo todo este proceso.

Nota de Aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Resumen

La degradación de los suelos en el sur del Huila, derivada del uso intensivo de agroquímicos, ha generado una reducción en la fertilidad y en la productividad agrícola, afectando especialmente cultivos estratégicos como el maíz (*Zea mays*). En este contexto, el biochar producido a partir de residuos de *Guadua angustifolia* Kunth surge como una alternativa sostenible para la recuperación de suelos y el fortalecimiento de la seguridad alimentaria.

El presente estudio evaluó el aporte de nutrientes del biochar de *G. angustifolia* en el suelo y su efecto en el desarrollo de *Z. mays* bajo condiciones semicontroladas en la vereda Honda Porvenir, municipio de Pitalito, Huila. Se empleó un diseño de bloques completamente al azar con cinco tratamientos y un testigo, midiendo variables como pH, fósforo disponible, cationes intercambiables y parámetros morfológicos de las plantas.

Los resultados evidenciaron que el biochar aporta macronutrientes esenciales (P, K, Ca y Mg), aumenta la disponibilidad de fósforo y mejora la retención de agua y nutrientes. Asimismo, su aplicación en combinación con fertilización orgánica o química promovió un mayor crecimiento en altura, diámetro de tallo y número de hojas, en comparación con los tratamientos sin biochar.

Se concluye que el biochar de *G. angustifolia* constituye una alternativa viable y de bajo costo para mejorar la fertilidad de suelos ácidos y degradados, además de contribuir a la reducción de la dependencia de fertilizantes sintéticos. Estos hallazgos respaldan su potencial como insumo estratégico en la agricultura rural colombiana, enmarcado en políticas nacionales de sostenibilidad y bioeconomía (Minambiente, 2018).

Palabras Clave: biochar, *Guadua angustifolia*, fertilidad del suelo, maíz, agrícola.

Abstract

Soil degradation in southern Huila, resulting from the intensive use of agrochemicals, has led to a reduction in fertility and agricultural productivity, particularly affecting strategic crops such as corn (*Zea mays*). In this context, biochar produced from *Guadua angustifolia* Kunth residues emerges as a sustainable alternative for soil restoration and strengthening food security.

This study evaluated the nutrient contribution of *G. angustifolia* biochar to the soil and its effect on the development of *Z. mays* under semi-controlled conditions in the Honda Porvenir district, Pitalito municipality, Huila. A completely randomized block design was used with five treatments and a control, measuring variables such as pH, available phosphorus, exchangeable cations, and plant morphological parameters.

The results showed that biochar provides essential macronutrients (P, K, Ca, and Mg), increases phosphorus availability, and improves water and nutrient retention. Furthermore, its application in combination with organic or chemical fertilization promoted greater growth in height, stem diameter, and number of leaves, compared to treatments without biochar.

It is concluded that *G. angustifolia* biochar constitutes a viable and low-cost alternative for improving the fertility of acidic and degraded soils, in addition to contributing to reducing dependence on synthetic fertilizers. These findings support its potential as a strategic input in Colombian rural agriculture, within the framework of national sustainability and bioeconomy policies (Minambiente, 2018).

Keywords: biochar, *Guadua angustifolia*, soil fertility, corn, agricultural sustainability.

Tabla de Contenido

Introducción	12
Planteamiento del Problema	14
Objetivos.....	16
General	16
Específicos	16
Marco Referencial.....	17
Marco Teórico.....	17
Propiedades del Biochar.....	17
Marco Conceptual	19
Marco Contextual.....	21
Marco Legal	22
Metodología	25
Tipo de Investigación.....	26
Caracterización del Biochar	27
Definición de Tratamientos a Implementar.....	28
Resultados y Discusión.....	32
Objetivo Específico 1	32
Objetivo Específico 2.....	36
Objetivo Específico 3	40
Identificación de Variación por Tratamiento	40
Altura por Tratamiento.....	41
Análisis Estadístico Mediante ANOVA	41

Discusión Resultados Obtenido por InfoStat	45
Discusión Resultados Obtenidos en Laboratorio	45
Conclusiones.....	48
Recomendaciones	50
Referencias Bibliográficas	51

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Descripción de Tratamientos</i>	28
Tabla 2 <i>Distribución de Bloques en Campo</i>	29
Tabla 3 <i>Test de Tukey ($p < 0,05$)</i>	41
Tabla 4 <i>Test de Tukey ($p < 0,05$)</i>	43
Tabla 5 <i>Test de Tukey ($p < 0,05$)</i>	44

Lista de Figuras

Figura 1 <i>El Biochar y sus Aplicaciones Potenciales</i>	17
Figura 2 <i>Geolocalización del Lote de Estudio</i>	22
Figura 3 <i>Diagrama de Flujo Metodología</i>	25
Figura 4 <i>Distribución de Bolsas por Bloque en Campo</i>	29
Figura 5 <i>Corte de la Guadua con Medidas de un Metro</i>	32
Figura 6 <i>Llenado de las Canecas</i>	32
Figura 7 <i>Guadua Pirolisada y Enfriamiento</i>	33
Figura 8 <i>Molienda y Carbón de Guadua Molid</i>	34
Figura 9 <i>Mezcla del Biochar, Prueba de Puño y Toma de Muestra</i>	35
Figura 10 <i>pH del Suelo por Tratamiento</i>	37
Figura 11 <i>Índice de Materia Orgánica por Tratamiento</i>	38
Figura 12 <i>Conductividad por Tratamiento</i>	39
Figura 13 <i>Altura de la Planta (cm) por Tratamiento</i>	41
Figura 14 <i>Diámetro de Tallo (cm) por Tratamiento</i>	42
Figura 15 <i>Número de Hojas por Tratamiento</i>	44

Introducción

La seguridad alimentaria global se cimienta en la salud y calidad del suelo, considerándolo como el eje central de la producción agrícola y el sistema agroalimentario mundial. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura subraya que la condición del suelo es determinante para la calidad y productividad de los cultivos, lo cual repercute directamente en la disponibilidad de alimentos nutritivos para las comunidades (García Ruiz, Mazo Zuluaga, & Ramírez Arango, 2015). Sin embargo, la degradación de los suelos, exacerbada por prácticas agrícolas intensivas y el uso desmedido de fertilizantes químicos, plantea serios retos ambientales y económicos a escala global (Kogut, 2023). La pérdida de materia orgánica, la alteración del pH, la disminución de la biodiversidad microbiana y una menor resiliencia del suelo han llevado a la (FAO, 2024) a advertir que los suelos contaminados comprometen no solo la sostenibilidad ambiental, sino también la vida misma, facilitando la acumulación de contaminantes en los cultivos y su posterior transferencia a la cadena alimentaria.

Particularmente en Colombia, el uso de agroquímicos como el glifosato ha contribuido a una preocupante carga de residuos químicos en los suelos agrícolas (Colombia, 2021). Este herbicida ha demostrado tener efectos adversos en cultivos como el maíz (*Zea mays* L.), disminuyendo la simbiosis micorrízica y aumentando la vulnerabilidad a enfermedades, lo que pone en riesgo la producción alimentaria. La situación es especialmente crítica en el departamento del Huila, conocido por su vocación agropecuaria, donde el uso prolongado de agroquímicos ha intensificado los problemas de degradación del suelo. Sin embargo, iniciativas locales han comenzado a mostrar caminos hacia una agricultura más sostenibles, como la sustitución de cultivos de amapola por sistemas de leguminosas (Vargas, 2019).

En este contexto, el biochar, un material carbonoso obtenido de la pirólisis de biomasa vegetal, emerge como una alternativa renovadora. Su aplicación no solo mejora la fertilidad del suelo, sino que también contribuye al secuestro de carbono y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En particular, el biochar derivado de *Guadua angustifolia* Kunth ha mostrado ser efectivo en la mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo y en la disponibilidad de nutrientes esenciales (Orozco Gutierrez, Medina Telez, Elvira Espinoza, & Cervantes Preciado, 2021).

El cultivo de maíz es uno de los más relevantes en Colombia, representando una fuente crucial de ingresos para los productores rurales en el Huila, donde la dependencia de fertilizantes químicos es alta. En dicho contexto, se hace imperativo evaluar estrategias que permitan restaurar la calidad del suelo y optimizar el manejo nutricional del cultivo de maíz. La implementación del biochar, como acondicionador de suelo y fuente de nutrientes, podría ser clave para disminuir la dependencia de fertilizantes sintéticos y promover prácticas agrícolas más sostenibles.

Este estudio tiene como objetivo evaluar el aporte de nutrientes del biochar de *Guadua angustifolia* Kunth al suelo y su efecto en el desarrollo del cultivo de *Zea mays* L., en condiciones semicontroladas. A través de esta evaluación, se espera generar evidencia técnica sobre su viabilidad como enmienda orgánica, promoviendo así una agricultura que fortalezca la productividad sin comprometer la salud del suelo ni el equilibrio ecológico.

Planteamiento del Problema

El aprovechamiento inadecuado de los residuos forestales de *Guadua angustifolia* Kunth constituye un problema ambiental y económico en el departamento del Huila y en otras regiones de Colombia. Cada año, grandes cantidades de guadua provenientes de procesos de aprovechamiento forestal y construcción son desechadas sin un uso productivo, lo que genera acumulación de residuos, emisión de contaminantes y desaprovechamiento de un recurso con alto potencial de valor agregado (Orozco Gutiérrez, Biochar de *Guadua angustifolia* Kunth: Propiedades y potencial en la recuperación de suelos agrícolas., 2021). Estos residuos, al no ser transformados, representan no solo una pérdida económica para las comunidades rurales, sino también una oportunidad desperdiciada para el desarrollo de alternativas sostenibles en el sector agropecuario. En contraste, su transformación en biochar permitiría reincorporar este material a los sistemas agrícolas como enmienda del suelo, ofreciendo beneficios asociados a la captura de carbono, la mejora de la fertilidad y la reducción de emisiones contaminantes (Agricultura. F. O., 2024).

Por otro lado, el modelo agrícola predominante en la región se ha sustentado en la dependencia de fertilizantes inorgánicos de alto costo, cuyo uso intensivo ha generado impactos negativos sobre los suelos. La degradación de la materia orgánica, el deterioro del microbiota benéfico y la contaminación química son consecuencias directas de estas prácticas, las cuales no solo afectan la productividad agrícola, sino también la salud ambiental y la seguridad alimentaria (Naturaleza., 2023). En cultivos estratégicos como el maíz (*Zea mays L.*), de gran importancia económica y social en el Huila, esta situación limita la sostenibilidad de la producción y aumenta la vulnerabilidad de los agricultores frente al alza en los precios de insumos (Huila, 2022) De ahí surge la necesidad de explorar alternativas como el biochar de guadua, que no solo permite dar

un uso eficiente a los residuos forestales, sino que también puede contribuir a recuperar la vitalidad de los suelos, reducir la dependencia de agroquímicos y fortalecer un modelo agrícola más sostenible en la región.

Objetivos

General

Evaluar el aporte de nutrientes del biochar de *Guadua angustifolia* Kunth en el suelo y su efecto en el cultivo de *Zea mays* L, en condiciones semicontroladas en la vereda Honda Porvenir del municipio de Pitalito.

Específicos

Caracterizar el potencial del biochar de *G. angustifolia* como fuente de nutrientes para el suelo y el cultivo de maíz.

Evaluar los cambios en las características físicas y químicas del suelo en diferentes tratamientos de fertilización orgánica-mineral y química.

Determinar la influencia del biochar durante la etapa de desarrollo del cultivo de maíz, en diferentes tratamientos de fertilización orgánica-mineral y química.

Marco Referencial

Marco Teórico

El biochar ha sido objeto de numerosos estudios debido a sus propiedades fisicoquímicas y su potencial para mejorar la salud del suelo y la productividad agrícola. A continuación, se detallan los principales efectos del biochar en el suelo y la agricultura.

Figura 1

El Biochar y sus Aplicaciones Potenciales



Nota. Tomada de Análisis de biochar y metales, Ingeniería y competitividad.

Propiedades del Biochar

- Retención de nutrientes:** Una de las principales ventajas del biochar es su capacidad para retener nutrientes y agua. Gracias a su estructura porosa, actúa como una esponja que absorbe los nutrientes presentes en el suelo y los libera lentamente, lo que permite una mayor disponibilidad de estos para las plantas (Lehmann, y otros, 2003). Este fenómeno mejora la eficiencia de los fertilizantes y reduce la lixiviación de nutrientes, un proceso que contribuye a la contaminación de los cuerpos de agua cercanos.

- Mejora del pH del suelo: El biochar puede modificar el pH del suelo, especialmente en suelos ácidos. Actúa como un agente alcalinizante, lo que mejora el ambiente para el crecimiento de muchas especies vegetales, favoreciendo la asimilación de nutrientes que son esenciales para el desarrollo de los cultivos (Moreno Reséndez, Reyes Carrillo, Vásquez Arroyo, & Cano Ríos, 2018). Esta propiedad lo convierte en una solución viable para suelos con baja fertilidad, particularmente en regiones con suelos ácidos.

Efectos del Biochar en el Suelo

- Aumento de la Actividad Microbiana: La adición de biochar al suelo puede promover la actividad de microorganismos benéficos, como bacterias y hongos. Su estructura porosa y su alto contenido de carbono ofrecen un hábitat ideal para estos organismos, lo que contribuye a la mejora de la salud del ecosistema del suelo (Bargmann, Rillig, Kruse, Greef, & Kucke, 2013). Estos microorganismos juegan un papel crucial en la separación de materia orgánica, la fijación de nitrógeno y la separación de contaminantes.

- Interacción con Fertilizantes Químicos: Estudios han demostrado que el biochar puede interactuar con los fertilizantes químicos de manera beneficiosa. Su presencia en el suelo aumenta la eficacia de los fertilizantes al retener los nutrientes en la zona radicular, reduciendo la cantidad de fertilizantes necesarios y minimizando sus impactos negativos en el medio ambiente (USBI, 2025). Esto contribuye a una agricultura más eficiente y ecológicamente responsable.

Beneficios de la Sustitución de Fertilizantes Químicos

- Sostenibilidad: La reducción del uso de fertilizantes químicos mediante la integración del biochar en los sistemas agrícolas contribuye a la sostenibilidad. Al mejorar la salud del suelo y reducir la dependencia de insumos externos, se puede mitigar la contaminación y la erosión del suelo (Carbotecnia, 2025). Además, el biochar actúa como un sumidero de carbono, ayudando a

mitigar los efectos del cambio climático al almacenar carbono en el suelo durante largos periodos.

•Productividad Agrícola: El uso de biochar ha mostrado un aumento en la productividad de diversos cultivos. En ensayos realizados con maíz, por ejemplo, se ha demostrado que la adición de biochar mejora el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos, incluso en suelos con baja fertilidad (Katterer, y otros, 2019). La capacidad del biochar para mejorar la retención de nutrientes y agua favorece un crecimiento saludable de las plantas.

Contexto local

En el municipio de Pitalito, Huila, se enfrenta un grave problema de degradación del suelo debido a prácticas agrícolas intensivas que dependen de fertilizantes químicos y una gestión inadecuada de los recursos naturales. La implementación de biochar podría representar una solución viable para recuperar la fertilidad del suelo y reducir el uso de fertilizantes químicos. Con la integración de esta tecnología en los sistemas agroforestales, se podría mejorar la sostenibilidad y la productividad agrícola local, promoviendo la restauración ecológica y aumentando la seguridad alimentaria en la región.

Marco Conceptual

Biochar: El biochar es un material carbonoso obtenido mediante el proceso de pirolisis de biomasa bajo condiciones limitadas de oxígeno. Se caracteriza por su alta estabilidad química, estructura porosa y gran superficie específica, lo que le permite mejorar la retención de agua, la capacidad de intercambio catiónico y la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Lehmann J. &, 2015). Además, cumple una función importante en la mitigación del cambio climático, ya que actúa como sumidero de carbono a largo plazo, contribuyendo a reducir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Schmidt, 2021).

Fertilidad del suelo: Se entiende como la capacidad del suelo para proporcionar a las plantas los nutrientes esenciales en cantidad y disponibilidad adecuada para su crecimiento. No depende únicamente de la presencia de nutrientes, sino también de factores como el pH, la textura, la materia orgánica y la actividad (Agricultura. O. d., 2015) biológica, la fertilidad es el resultado de la interacción entre procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales determinan la productividad agrícola y la sostenibilidad a largo plazo.

Rendimiento agrícola: Es la producción obtenida por unidad de superficie cultivada, comúnmente expresada en toneladas por hectárea. Está influenciado por factores como la genética de las variedades, el manejo agronómico, las condiciones climáticas y la calidad del suelo. En cultivos como el maíz (*Zea mays L.*), el rendimiento es un indicador clave de la eficiencia del sistema de producción y de la seguridad alimentaria en regiones rurales (Cardona Restrepo, 2021).

Contaminación del suelo: Se refiere a la acumulación de sustancias tóxicas o nocivas que deterioran la calidad del suelo, reducen su capacidad productiva y generan riesgos para la salud humana y ambiental. Entre los contaminantes más comunes se encuentran los fertilizantes sintéticos, pesticidas, hidrocarburos y metales pesados (Kogut, 2023) destaca que el uso indiscriminado de agroquímicos altera la microbiota benéfica, reduce la colonización micorrízica y afecta procesos fisiológicos en los cultivos.

Sostenibilidad agrícola: Hace referencia al conjunto de prácticas que buscan mantener la productividad agrícola en el tiempo, preservando la calidad del suelo, el agua y la biodiversidad, un sistema agrícola sostenible debe ser económicamente viable, socialmente justo y ambientalmente responsable, promoviendo la reducción de insumos externos y el fortalecimiento de la resiliencia ecológica (Altieri, 2002).

Guadua angustifolia Kunth: Es una de las especies de bambú más importantes de América Latina, ampliamente distribuida en Colombia, especialmente en la región andina. Su aprovechamiento tradicional ha estado ligado a la construcción y la artesanía, pero investigaciones recientes evidencian su potencial para la producción de biochar por su composición lignocelulósica y alta disponibilidad de residuos (Orozco Gutiérrez, Biochar de *Guadua angustifolia* Kunth: Propiedades y potencial en la recuperación de suelos agrícolas, 2021).

Marco Contextual

Localización del sitio: El sitio en el que se llevó a cabo esta investigación se encuentra en la finca El Vergel, ubicada en la vereda Honda Porvenir del municipio de Pitalito, al sur del departamento del Huila; cuenta con una altitud de 1288 m.s.n.m., latitud de 1°49'11.67"N y una longitud de 76° 2'53.18"O, donde se tienen temperaturas promedio de 17 a 25°C, con un promedio de lluvias que varían todos los meses del año donde se observa que el mes con mayor incidencia de lluvias es noviembre y el mes con menos lluvias es agosto; en cuanto a nubosidad, se tiene que el cielo es más nublado de octubre a mayo, teniendo el mes de marzo como el mes más nublado de todos, mientras que el mes con más despejado es agosto; por su parte, la precipitación en Pitalito es muy variada, los meses más mojados son entre octubre y junio, dentro de los cuales noviembre es el mes más mojado a diferencia del mes de agosto que es considerado el mes más seco del municipio; el mes con mayor cantidad de lluvias es noviembre con un promedio de 138 mm de lluvia y el mes con menor cantidad de lluvias es agosto con un promedio de 41 milímetros de lluvia; en cuanto a las horas luz, se tiene que en todo el año no se tienen variaciones considerables y se cuentan con 12 horas de luz solar. Por su parte, la humedad

presente durante todo el año es extremadamente variada, teniendo en cuenta que el periodo más húmedo comprende desde septiembre hasta junio.

Figura 2

Geolocalización del Lote de Estudio



Nota. Tomada de imágenes de apoyo QGIS 2025

Marco Legal

El marco legal que regula el uso de bioinsumos como el biochar en Colombia se fundamenta en normas ambientales, agrarias y sanitarias que buscan garantizar la sostenibilidad de la producción agrícola, la protección del suelo y la seguridad alimentaria. Estas disposiciones legales respaldan el uso de enmiendas orgánicas, promueven prácticas agrícolas sostenibles y controlan el uso de productos químicos en la producción agropecuaria.

- Constitución Política de Colombia (1991): La Constitución establece en su Artículo 79 que "todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano", y en el Artículo 80 señala que el Estado debe planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para

garantizar su desarrollo sostenible, conservación y restauración. Esto implica la promoción de prácticas agrícolas responsables que contribuyan a la protección del suelo como recurso vital.

- Ley 99 de 1993: Esta ley crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). En su Artículo 1, establece como principio fundamental que “la protección del medio ambiente es asunto de interés público”. También promueve el uso racional de los recursos naturales renovables y establece que las actividades productivas deben estar orientadas hacia la sostenibilidad ambiental, lo que da soporte al uso de biochar como alternativa ecológica para la recuperación de suelos degradados.

- Decreto 1076 de 2015: Este decreto compila todas las disposiciones normativas en materia ambiental, y dentro de sus lineamientos establece que el manejo de residuos orgánicos debe orientarse hacia su valorización, incluyendo la producción de bioinsumos como el compost o el biochar. Además, reglamenta la gestión integral del recurso suelo, promoviendo su uso racional y sostenible.

- Resolución 3168 de 2015 (ICA): El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) expidió esta resolución para reglamentar el registro, producción, comercialización y uso de productos biológicos, bioinsumos, abonos orgánicos y enmiendas del suelo. En ella se establecen los requisitos técnicos para que estos productos sean considerados seguros, eficaces y ambientalmente viables. Aunque el biochar no se menciona explícitamente, puede clasificarse como enmienda orgánica si cumple con los criterios establecidos de composición, calidad y estabilidad.

- Ley 165 de 1994 – Convenio de Río: Mediante esta ley Colombia ratifica el Convenio sobre la Diversidad Biológica, comprometiéndose a conservar la biodiversidad, promover el uso sostenible de los recursos naturales y adoptar prácticas que reduzcan la degradación ambiental.

El uso de biochar en sistemas agroecológicos responde a estos compromisos, al mejorar la salud del suelo sin recurrir a agroquímicos contaminantes.

- Política Nacional para la Gestión Integral del Suelo (CONPES 3915 de 2018): Este documento establece lineamientos para conservar y recuperar la funcionalidad del suelo en los sistemas productivos. Reconoce que el suelo es un recurso no renovable a escala humana y que su degradación afecta la seguridad alimentaria, el cambio climático y el desarrollo rural. Dentro de sus líneas estratégicas se promueve la adopción de prácticas sostenibles como el uso de bioinsumos, agroforestería y restauración ecológica, en concordancia con la propuesta de este proyecto.

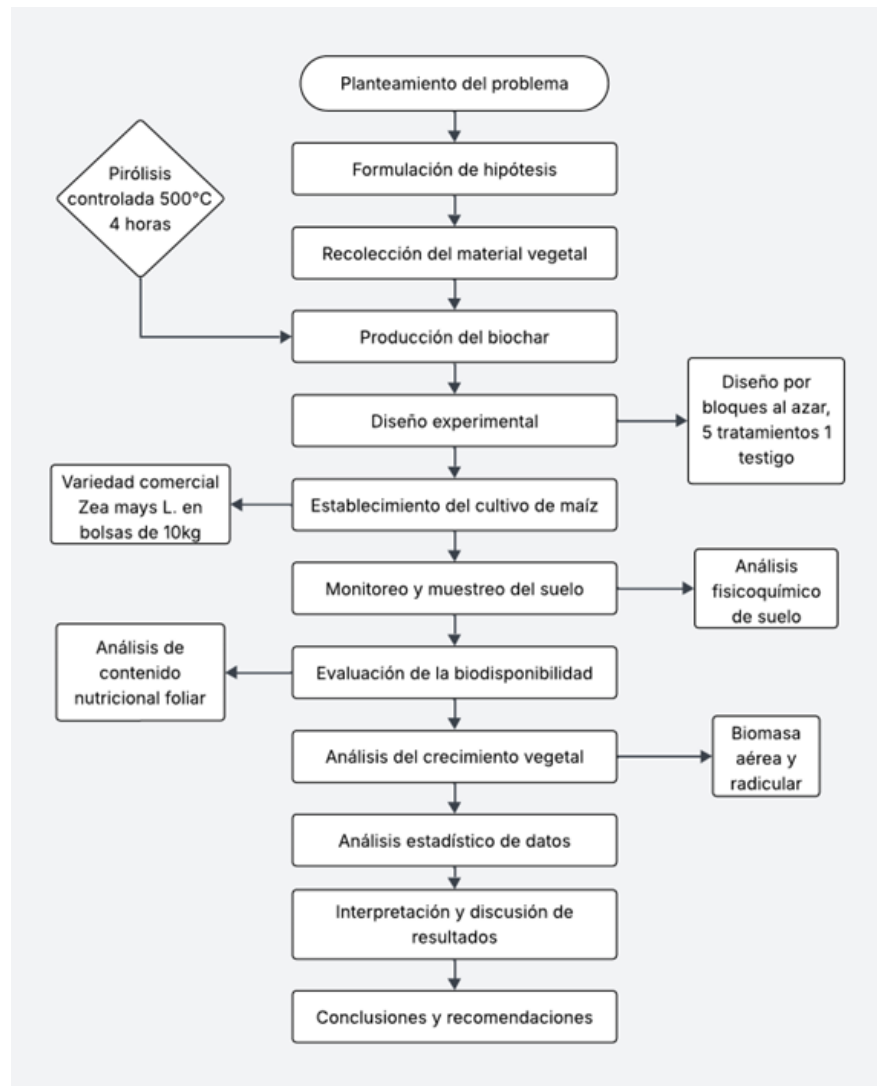
- Resolución 1256 de 2022 – Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: Esta resolución adopta la Estrategia Nacional de Bioeconomía, que fomenta el desarrollo de soluciones basadas en el uso de biomasa y residuos orgánicos con alto valor agregado. El biochar se enmarca como un subproducto de alto interés en la economía circular, promovido como alternativa sostenible para la agricultura, la captura de carbono y la generación de valor en cadenas productivas rurales.

Metodología

A continuación, se muestra un diagrama de flujo con los principales aspectos de la metodología conducida durante el estudio:

Figura 3

Diagrama de Flujo Metodología



Tipo de Investigación

El trabajo tuvo un enfoque cuantitativo con un diseño de bloques completamente al azar (DBA) con 5 tratamientos, 1 testigo y 5 repeticiones por cada uno, donde cada tratamiento contó con 116 individuos. El tratamiento de datos se realizó mediante normalización seguido de ANOVA con diferencia de medias $p < 0,05$ (Tukey) con el programa Infostat 2025.

Metodología objetivo específico 1: Caracterizar el potencial del biochar de *G. angustifolia* como fuente de nutrientes para el suelo y el cultivo de maíz.

Pirólisis de *G. angustifolia*: Se implementó el método planteado por (Zamora Bringas, 2020) quien propone lo siguiente:

Recolección de residuos (materia prima): Los residuos fueron obtenidos del taller de laminado del Círculo de Investigación: para el desarrollo de la cadena de valor del bambú para el desarrollo científico y tecnológico (CIB), ubicado en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

Acondicionamiento del material para combustión: Consistió básicamente en tomar el contenido de humedad y pesar los residuos de *Guadua angustifolia* Kunth, los cuales serán colocados en el tambor pequeño para ser quemados.

Llenado con material combustible: Consistió en colocar la leña en el espacio comprendido entre el tambor pequeño y el tambor grande para la combustión.

Encendido del horno: Se colocó la tapa del tambor pequeño con el fin de asegurar la entrada mínima de oxígeno, luego se procedió a quemar la leña.

Monitoreo continuo de la temperatura: Con ayuda de un termómetro infrarrojo tipo pistola, se fue tomando la temperatura que alcanza el sistema durante un periodo de 1.5 a 2.5 horas aproximadamente.

Enfriamiento del horno: Una vez que ha terminado el proceso de pirolisis, fue necesario esperar entre 7 u 8 horas para poder retirar el biochar producido.

Rendimiento de la producción de biochar: Finalmente, se procedió a pesar el biochar producido y así poder calcular el rendimiento del proceso con la siguiente fórmula:

Rendimiento (%)

$$= \text{Peso del biochar producido (g)} / \text{Peso de los residuos de bambú(g)} \\ * 100\%$$

Caracterización del Biochar

Teniendo el biochar producido, se tomó una muestra inicial de 1 kg del total del sustrato, donde se identificaron mediante análisis de laboratorio factores como:

Aluminio intercambiable mediante técnica volumétrica con método NTC 5263

Determinación de la acidez, aluminio e hidrógeno intercambiables.

Sodio (Na) por medio de la técnica Acetato de Amonio 1M, PH 7,0-

Espectrofotometría AA con método NTC 5349 Determinación de bases cambiables.

Hierro (Fe) mediante la técnica DTPA-Espectrofotometría de AA, con método NTC 5526

Determinación de micronutrientes disponibles.

Boro (B) con la técnica Cuantificación colorimétrica con azometina-H-

Espectrofotometría, mediante el método IGAC Boro disponible en suelos.

Cobre (Cu) mediante la técnica DTPA-Espectrofotometría de AA con método de NTC 5526 Determinación de micronutrientes disponibles.

Manganeso (Mn) con la técnica de DTPA-Espectrofotometría de AA con método NTC 5526 Determinación de micronutrientes disponibles.

Zinc (Zn) mediante la técnica DTPA-Espectrofotometría de AA con el método NTC 5526
Determinación de micronutrientes disponibles.

Azufre (S) con la técnica Espectrofotométrica mediante el método de Turbidimétrico.

Relaciones entre cationes entre Ca/Mg, Ca/K, Mg/K y (Ca+Mg) /K.

Porcentajes de saturación de bases en Na, K, Ca, Mg, Al y bases.

Metodología Objetivo específico 2: Evaluar los cambios en las características físicas y químicas del suelo en diferentes tratamientos de fertilización orgánica-mineral y química.

Selección y Preparación de la tierra y el lote a trabajar.

Se realizó encerramiento de un lote de 200 m² en la finca el Vergel, además de limpieza con guadaña y aplicación inicial de herbicida sistémico CUSPIDE con dosificación de 200 cc * por bomba de 20 Lt y una segunda aplicación a los 20 días. Se seleccionó y compró 6 toneladas de tierra franco-arenosa. perteneciente a una finca de la zona, con un bajo porcentaje de materia orgánica, un pH de 4.03 y una humedad del 12%, evidenciándose un porcentaje bajo de residuos como raíces y piedras que fueron eliminadas con un motocultor.

Definición de Tratamientos a Implementar

Tabla 1

Descripción de Tratamientos

Test	Tierra
T1	Tierra + fert (5 g al 5 día de germinación y 10 g a los 15 días después de la primera aplicación)
T2	Tierra + fert 5 g al 5 día de germinación y 10 g a los 15 días después de la primera aplicación) + Biochar (80 g / 10 kg sustrato)

Test	Tierra
T3	Tierra + fert 5 g al 5 día de germinación y 10 g a los 15 días después de la primera aplicación) + Biochar (160 g / 10 kg sustrato)
T4	Tierra + Biochar (80 g / 10 kg sustrato)
T5	Tierra + Biochar (160 g / 10 kg sustrato)

Diseño Experimental: Diseño de bloques completamente al azar.

Tabla 2

Distribución de Bloques en Campo

Test R1	T1 R1	T2 R1	T3 R1	T4 R1	T5 R1
T5 R2	TEST R2	T1 R2	T2 R2	T3 R2	T4 R2
T4 R3	T5 R3	TEST R3	T1 R3	T2 R3	T3 R3
T3 R4	T4 R4	T5 R4	TEST R4	T1 R4	T2 R4
T2 R5	T3 R5	T4 R5	T5 R5	TEST R5	T1 R5

Figura 4

Distribución de Bolsas por Bloque en Campo



Para este estudio, se hizo uso de 700 bolsas de polietileno de 20cm de ancho * 50 cm de alto con 12 perforaciones cada una, que permitieron un buen desarrollo radicular, además de un drenaje y aireación óptimos para el cultivo.

Variables medidas en el suelo: Se tomó una muestra inicial de 1 kg de tierra, además de una muestra de 1 kg por tratamiento al día 45 de germinación de las plántulas, que fueron enviadas al laboratorio para su respectivo análisis donde se midieron variables:

Físicas:

Textura (% de arena, arcilla, limo y clasificación textural), mediante análisis de laboratorio realizado al inicio del proyecto.

Químicas:

pH (Unidades).

Conductividad (dS/cm).

C.I.C (meq/100g).

Materia orgánica (%).

Nitrógeno orgánico (%).

Fósforo disponible (ppm).

Potasio (meq/100g K).

Calcio (meq/100g Ca).

Magnesio (meq/100g Mg).

Aluminio intercambiable (meq/100g Al)

Micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu, B).

Metodología objetivo específico 3: Determinar la influencia del biochar durante la etapa de desarrollo del cultivo de maíz, en diferentes tratamientos de fertilización orgánica-mineral y química.

Selección de la semilla: Se compró 1 kg de semilla de maíz certificada ICA V – 305 Variedad amarillo, que cuenta con certificación de calidad en genética y sanidad.

Medición de variables del cultivo: Ejercicio realizado cada 3 días, con el fin de obtener la mayor precisión en la obtención de resultados promedio.

Crecimiento de la planta: Parámetro medido mediante el uso de una regla fija, donde se podía evidenciar de manera precisa la altura en centímetros de la planta al día de la medición.

Biomasa:

Peso de raíz: Proceso realizado el día de toma de muestras finales, a los 45 días de germinadas las plántulas; donde se sacaron las raíces de estos individuos, para posteriormente ser lavadas y secadas al aire libre y pesadas con una gramera convencional.

Tallo: Dato medido con un pie de rey, el cual proporcionó datos precisos en milímetros del diámetro del tallo de las plantas a una altura de 2 centímetros de la tierra.

Número de hojas: Proceso realizado de manera cuantitativa, donde se tuvieron en cuenta las hojas ya desplegadas en cada plántula.

Resultados y Discusión

Objetivo Específico 1

Caracterizar el potencial del biochar de *G. angustifolia* como fuente de nutrientes para el suelo y el cultivo de maíz.

Para efectos de la investigación, se realizó un ajuste de la propuesta realizada por (Zamora Bringas, 2020), quedando así:

Corte de los trozos de guadua: Se cortaron 25 kg de guadua seca quedando a una medida de 1 metro de largo para que quedaran acordes a las medidas de las canecas del horno.

Figura 5

Corte de la Guadua con Medidas de un Metro



Figura 6

Llenado de las Canecas



Pirolisis: Para efectos de la investigación, se hizo uso de un horno tipo retorta artesanal, con compartimiento de 3 canecas metálicas de capacidad de 65 kg aproximadamente cada una, que se llenaron con los trozos de guadua. Posteriormente, se encendió del horno de manera artesanal de tal manera que llegara a una temperatura de 500°C medido con un termómetro manual, logrando llevar a cabo de manera correcta la pirolisis de las guaduas. Terminado este proceso, se dejaron enfriar estas guaduas a temperatura ambiente por un aproximado de 5 a 6 horas.

Figura 7

Guadua Pirolisada y Enfriamiento



Molienda del carbón: Se realizó la molienda del producto obtenido del proceso anterior dejándolo pulverizado.

Figura 8

Molienda y Carbón de Guadua Molid



Elaboración del biochar: Se realizó una mezcla del carbón molido con pollinaza en cantidades iguales de 25kg*25kg. Posteriormente, se realizaron hidrataciones diarias y mezcla continua, añadiendo melaza diluida a este compuesto por un lapso de 8 días, con el fin de mantener temperaturas promedio de 65°C hasta obtener el producto final que fue evidenciado mediante la prueba de puño, identificando así que la humedad del biochar fue la indicada y está lista para su aplicación al cultivo.

Figura 9

Mezcla del Biochar, Prueba de Puño y Toma de Muestra



Toma de muestra del biochar inicial: Se tomaron muestras de diferentes zonas del biochar ya finalizado obteniendo 1kg del mismo, para ser enviado a laboratorio para su respectivo análisis (Figura C).

Aplicación en el cultivo: Teniendo ya terminada la preparación del producto final, se realizó aplicación del biochar en los tratamientos que corresponden con la frecuencia establecida (Ver tabla 1).

Los análisis fisicoquímicos realizados al biochar obtenido de *G.angustifolia* evidencian su potencial como enmienda orgánica de alto valor agronómico. El material evaluado presentó concentraciones relevantes de macronutrientes esenciales, entre ellos fósforo (P), potasio (K) y calcio (Ca), elementos indispensables para el desarrollo inicial y el metabolismo general del maíz (*Zea mays*). Asimismo, se observó una reacción alcalina moderada, con valores de pH superiores a los del suelo sin enmendar, lo que sugiere una capacidad efectiva para la neutralización de suelos ácidos, condición frecuente en las áreas agrícolas del sur del Huila.

La estructura porosa y estable del biochar, resultado del proceso de pirólisis a temperaturas controladas, favorece la retención de agua y nutrientes, incrementando su disponibilidad durante etapas críticas del ciclo fenológico del cultivo (Joseph, 2021). Este aspecto adquiere especial relevancia en entornos agroclimáticos como los de la vereda Honda Porvenir, donde la baja fertilidad del suelo y las variaciones en la disponibilidad hídrica representan limitaciones significativas para el rendimiento del maíz.

Estos hallazgos son consistentes con lo reportado por (Lehmann J. y., 2015) quienes señalan que los biochar elaborados a partir de materiales lignocelulósicos, como la guadua, presentan elevada capacidad de intercambio catiónico (CIC), alta estabilidad estructural y un contenido sustancial de carbono recalcitrante. Dichas características permiten una liberación lenta y sostenida de nutrientes, al mismo tiempo que contribuyen al secuestro de carbono a largo plazo. Esta doble función, ambiental y agronómica, posiciona al biochar como una herramienta clave para la agricultura sostenible.

En este sentido, el biochar de *Guadua angustifolia* Kunth no solo aporta nutrientes de manera directa, sino que también mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, optimizando la eficiencia de fertilizantes orgánicos y químicos aplicados de manera conjunta. Esta sinergia se evidenció experimentalmente en los tratamientos T1, T2 y T3, en los cuales la combinación de biochar con fertilizantes convencionales generó mejoras significativas en variables de crecimiento como altura de planta, diámetro del tallo y número de hojas.

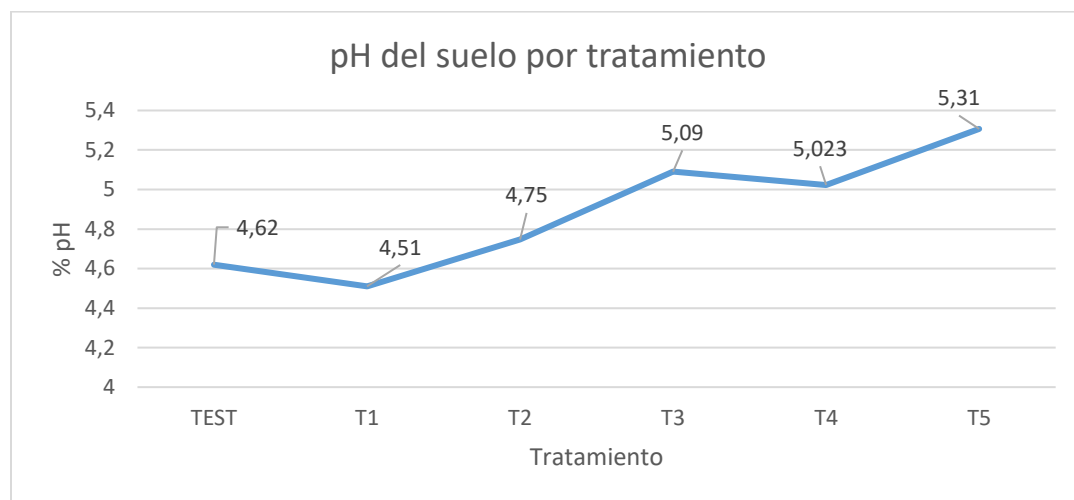
Objetivo Específico 2

Evaluar los cambios en las características físicas y químicas del suelo en diferentes tratamientos de fertilización orgánica-mineral y química.

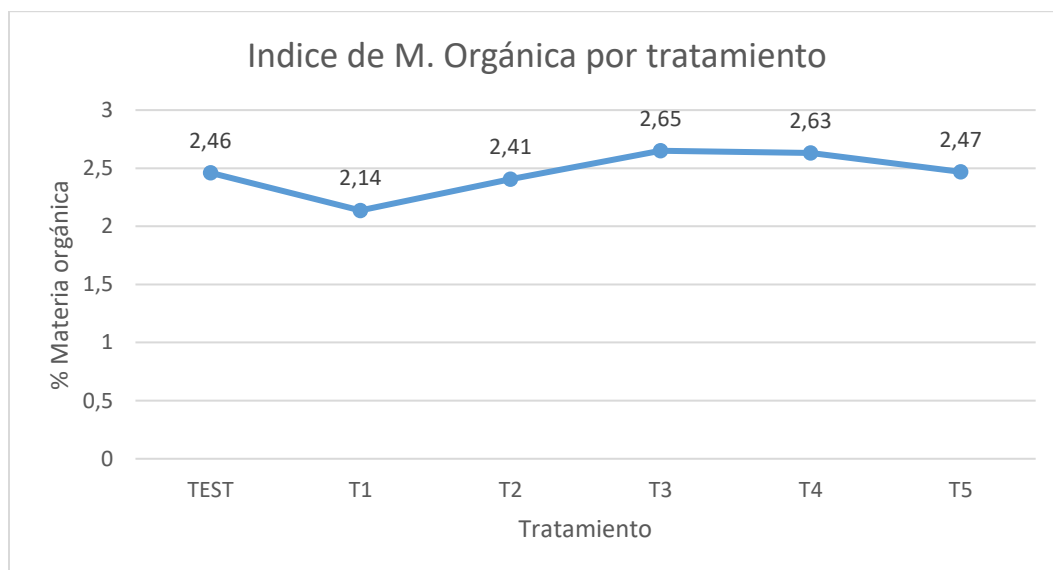
Fertilización química: Promedio pH del suelo: Los valores de pH en todos los tratamientos oscilaron entre 4,51 y 4,75, clasificándose dentro del rango ácido ($\text{pH} < 5,5$). Aunque no se alcanzaron valores óptimos para producción de maíz, se evidenció una ligera tendencia a la alcalinización en los tratamientos con mayor dosis de biochar.

Figura 10

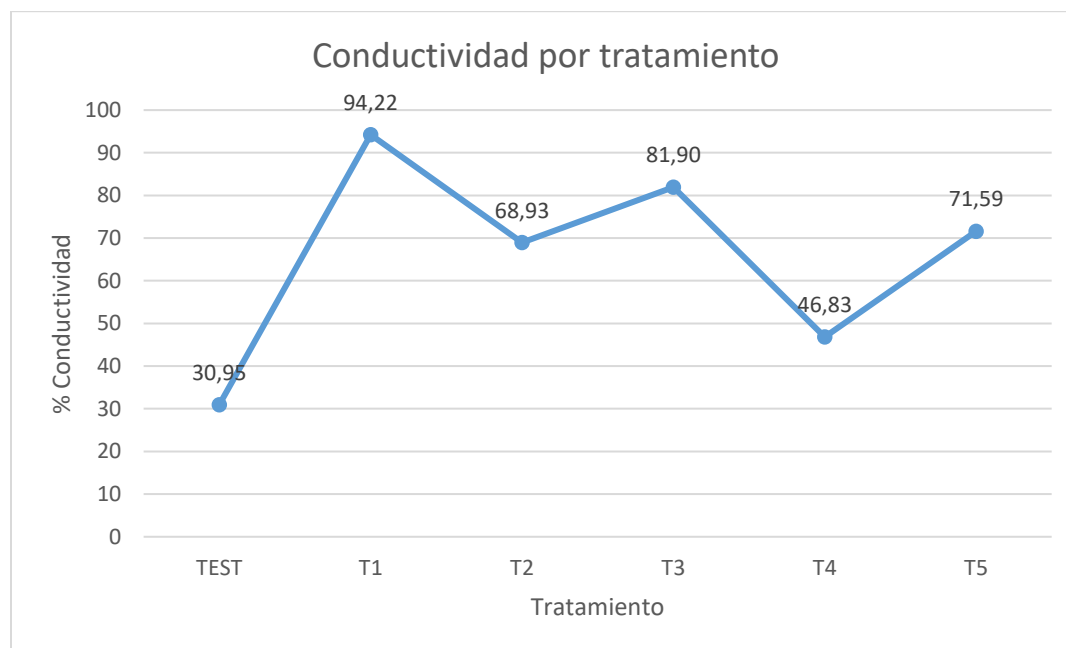
pH del Suelo por Tratamiento



Índice de materia orgánica: La materia orgánica (MO) fue baja en todos los tratamientos ($\leq 2,4\%$), destacando que el testigo presentó el valor más alto (2,46%), mientras que en tratamientos con biochar disminuyó ligeramente (ej. 2,12% en T1-2 y 2,14% en T1-3). Este resultado podría deberse a que el biochar, aunque mejora la capacidad de retención de nutrientes, no aporta directamente materia orgánica fresca sino carbono recalcitrante. Por su parte, el contenido de nitrógeno orgánico fue bajo en todos los casos ($< 0,08\%$), indicando la necesidad de acompañar el biochar con fuentes nitrogenadas como abonos orgánicos.

Figura 11*Índice de Materia Orgánica por Tratamiento*

Conductividad: La conductividad eléctrica (CE) en los tratamientos con biochar (ej. T1-1, T1-2, T1-3) fue superior a la del testigo (94,22 $\mu\text{S}/\text{cm}$ frente a 30,95 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indicando un mayor contenido de sales solubles, posiblemente derivadas del material carbonizado. Este incremento puede favorecer la disponibilidad de nutrientes, siempre que los niveles se mantengan dentro de los rangos adecuados. La textura del suelo se mantuvo constante en todos los tratamientos, siendo franco limoso, característica favorable para la retención de humedad y nutrientes.

Figura 12*Conductividad por Tratamiento*

Fósforo disponible: El fósforo disponible aumentó significativamente con la aplicación de biochar. Mientras el tratamiento testigo registró 62,17 ppm, los tratamientos con biochar alcanzaron hasta 99,22 ppm (T1-2) y 98,82 ppm (T1-3), niveles muy por encima del rango alto (>25 ppm), lo cual es favorable para el desarrollo radicular y la producción de biomasa en *Zea mays* (Rodríguez et al., 2020).

Cationes cambiabiles (K, Ca, Mg): En cuanto a los cationes intercambiabiles, se observó una mejora general en los niveles de potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) en los suelos tratados con biochar. El tratamiento T1-2 presentó niveles de K de 2,68 meq/100g (alto), mientras que el testigo reportó solo 0,07 meq/100g (bajo). Este patrón se repitió para el calcio, pasando de 5,96 meq/100g en el testigo a 6,17 meq/100g en el tratamiento T1-2. El magnesio

también se mantuvo en rangos medios (6,17-7,19 meq/100g), sugiriendo una mejora en la fertilidad básica del suelo.

Micronutrientes: Los niveles de micronutrientes como hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y cobre (Cu) fueron más elevados en los tratamientos con biochar. Por ejemplo, el hierro alcanzó hasta 32,20 ppm en el testigo, mientras que en T1-2 fue de 29,22 ppm; sin embargo, el manganeso y el zinc mostraron aumentos notables en los tratamientos con biochar, lo que puede estar relacionado con la liberación progresiva de estos elementos desde la matriz carbonosa del biochar.

Objetivo Específico 3

Determinar la influencia del biochar durante la etapa de desarrollo del cultivo de maíz, en diferentes tratamientos de fertilización orgánica-mineral y química.

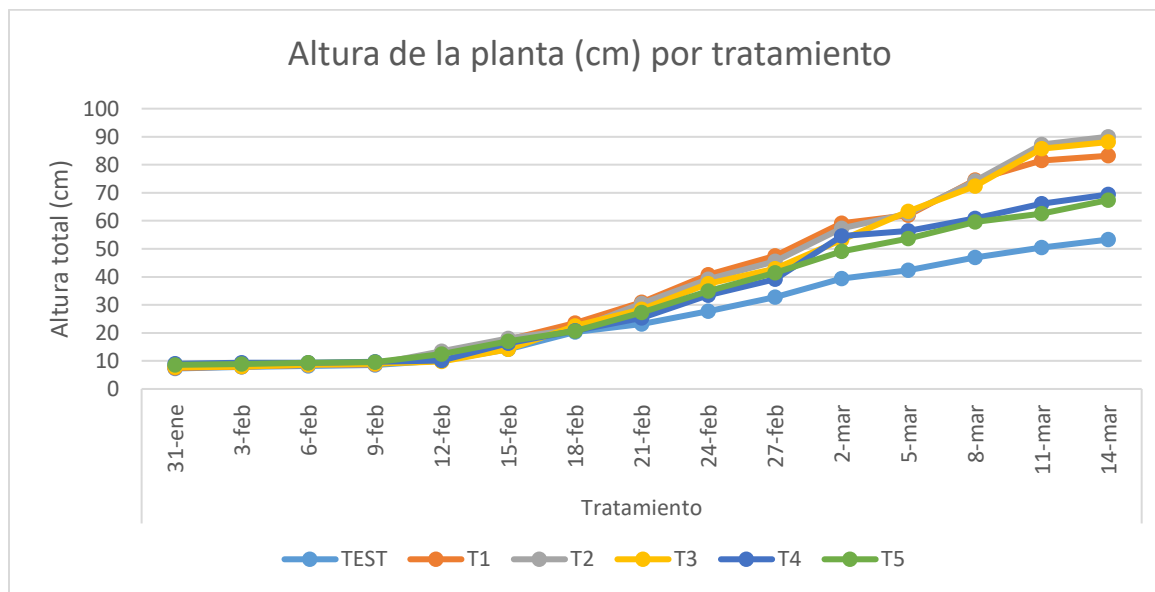
Identificación de Variación por Tratamiento

Todos los anudas muestran valores $p < 0,05$, Demostrando que existen diferencias estadísticamente significativas entre al menos algunos de los tratamientos que se trabajaron, Dejando claro que las mezclas Implementadas sí afectaron significativamente el desarrollo del cultivo de Z.mayz.

Altura por Tratamiento

Figura 13

Altura de la Planta (cm) por Tratamiento



Análisis Estadístico Mediante ANOVA

P Valor: 0,0101.

Tabla 3

Test de Tukey ($p < 0,05$)

Tratamiento		
TEST	A	
T1	A	B
T2	A	B
T3		B
T4		B

T5

B

ANOVA ($p=0,0101$): Avala que existen diferencias significativas en altura de las plantas entre los tratamientos.

Test de Tukey:

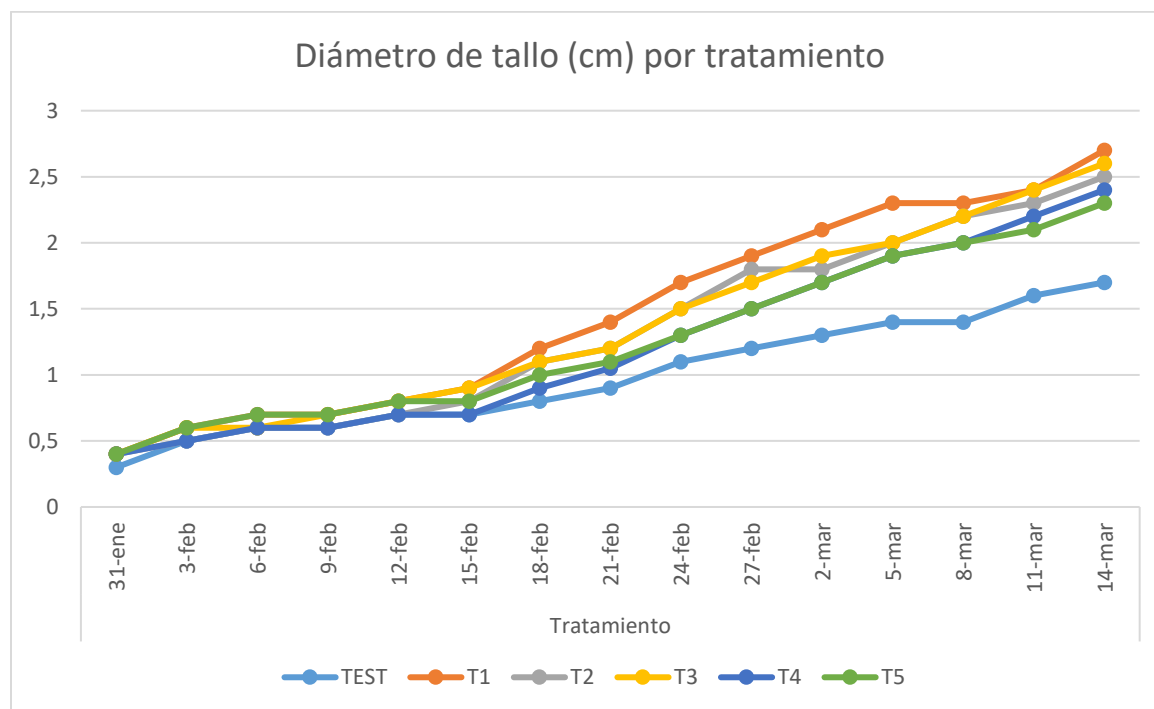
Grupo A: El TESTIGO y el T1 no son diferentes entre sí, el testigo y el biochar solo produjeron plantas de altura similar.

Grupo B: T2, T3, T4 y T5 conforman otro grupo homogéneo, ya que estos tratamientos fueron superiores al testigo y al T1.

Diámetro por tratamiento

Figura 14

Diámetro de Tallo (cm) por Tratamiento



Análisis estadístico mediante ANOVA:

P. Valor: 0,0025.

Tabla 4

Test de Tukey ($p < 0,05$)

Tratamiento		
TEST	A	
T1	A	B
T2	A	B
T3		B
T4		B
T5		B

ANOVA ($p=0,0025$): Se encontraron diferencias significativas, ya que los tratamientos afectaron el grosor del tallo.

Test de Tukey: El patrón es igual al de altura.

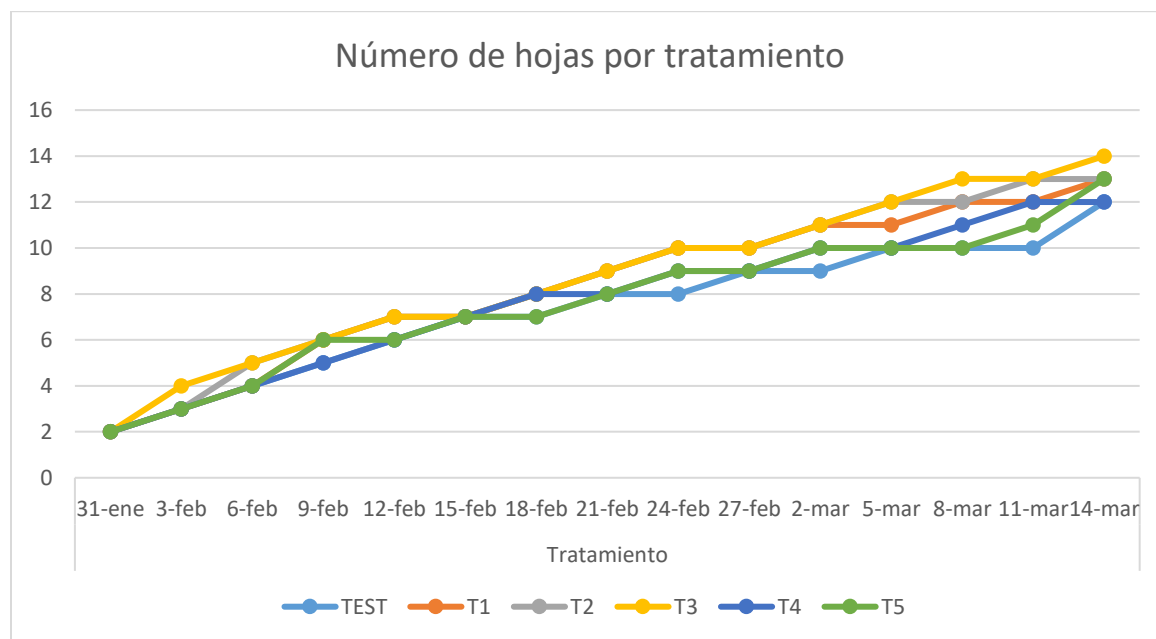
Grupo A: TEST y T1 son iguales.

Grupo B: T2, T3, T4 y T5 son superiores y forman un grupo homogéneo.

T1 muestra un comportamiento intermedio.

Los tratamientos que promovieron mayor altura también desarrollaron tallos más gruesos y probablemente más robustos, existe una fuerte correlación positiva entre el crecimiento en altura y el diámetro del tallo.

Número de hojas por tratamiento

Figura 15*Número de Hojas por Tratamiento*

Análisis estadístico mediante ANOVA:

P. Valor: 0,0006.

Tabla 5*Test de Tukey ($p < 0,05$)*

Tratamiento					
TEST	A				
T1	A	B			
T2	A	B	C		
T3		B	C		
T4			C		
T5			C		

ANOVA ($p= 0,0006$): La diferencia más significativa de todos los tratamientos tuvieron un impacto muy fuerte en la generación de área foliar.

Test de Tukey:

Grupo A: Solo el TESTIGO fue el tratamiento con menor número de hojas.

Grupo B: T1 y T2 fueron superiores al TESTIGO.

Grupo C: T4 y T5 Forman el grupo de mayor número de hojas superando incluso al grupo B.

T3 En los grupos BYC situándolo como un tratamiento de alto desempeño sin diferencias significativas con los mejores.

Discusión Resultados Obtenido por InfoStat

El análisis estadístico ANOVA reveló que la aplicación de biochar de *G. angustifolia* solo o en combinación con fertilizantes, ejerció un efecto significativo sobre el desarrollo vegetativo del cultivo de maíz. Por su parte, la prueba de Tukey permitió identificar que los tratamientos T2, T3, T4 y T5, promovieron un mayor crecimiento en altura y diámetro de tallo en comparación con el testigo. En el número de hojas, los tratamientos T4 y T5 fueron los que registraron los valores más altos seguidos por el T3 y T2, el tratamiento con 100% de biochar mostró un desempeño intermedio mejorando significativamente el número de hojas, pero no mostrando ventajas en altura y diámetro frente al TESTIGO. Estos resultados demuestran el potencial del biochar como enmienda orgánica, especialmente cuando se combina con fuentes nutricionales para mejorar el desarrollo del cultivo de maíz.

Discusión Resultados Obtenidos en Laboratorio

En cuanto al crecimiento y desarrollo del cultivo de *Z. mays*, se observaron diferencias notorias entre los tratamientos. Los parámetros evaluados incluyeron altura de planta, diámetro

de tallo, número de hojas, y rendimiento estimado en biomasa. Los tratamientos que incluyeron biochar más fertilizante mostraron los índices más altos en términos de vigor y uniformidad de las plantas.

Las plantas de maíz en suelos tratados con biochar + fertilizante alcanzaron una mayor altura promedio y mayor número de hojas funcionales, lo que sugiere una mejor disponibilidad de nutrientes y condiciones más favorables para el desarrollo radicular.

Por otra parte, aunque no se evaluó la producción final de mazorcas, las variables morfológicas sugieren una correlación positiva entre el tratamiento biochar + fertilizante y un mayor potencial productivo. Esto se explica por una mayor disponibilidad de nutrientes esenciales como fósforo y potasio, claves para el desarrollo inicial del maíz.

Comparación con fertilización química: Los tratamientos con biochar más fertilización química mostraron mejoras significativas respecto al testigo, y en cuanto a los tratamientos implementados con biochar + gallinaza se evidenció una diferencia mínima, lo cual respalda el uso de prácticas agroecológicas como alternativa sostenible de fertilización.

Uno de los principales efectos observados fue el aumento del fósforo disponible y del potasio intercambiable en los tratamientos con biochar, lo cual puede explicarse por la liberación gradual de estos elementos desde la matriz carbonosa y su interacción con la materia orgánica del suelo. Según (Lehmann J. y., 2015) esta liberación progresiva no solo mejora la fertilidad, sino que también reduce el riesgo de lixiviación, lo que permite una mayor eficiencia en el uso de nutrientes. De manera similar, estudios nacionales como el de (Londoño, 2020) demostraron que la aplicación de biochar de guadua en suelos del Huila incrementa significativamente la disponibilidad de fósforo y potasio, generando un efecto positivo en la nutrición de cultivos básicos.

Asimismo, el incremento moderado del pH en los suelos tratados con biochar sugiere un efecto neutralizante sobre la acidez, lo que favorece la disponibilidad de nutrientes y la actividad microbiana. Esto resulta particularmente relevante en suelos andisoles o de origen volcánico, caracterizados por una acidez natural que limita el crecimiento de los cultivos en el sur del Huila. En este contexto, investigaciones locales como la de (Rodríguez-Vargas, 2017) han documentado la eficacia del biochar de guadua para contrarrestar la acidez en suelos cafeteros, mejorando la actividad biológica y la estructura edáfica.

En términos de respuesta del cultivo de maíz, se evidenció una mejora en variables como altura de planta, número de hojas y vigor general, especialmente en los tratamientos con biochar y gallinaza. Esta sinergia podría atribuirse a la combinación de nutrientes de liberación rápida (provenientes del abono orgánico) con nutrientes de liberación lenta y una mayor retención de humedad aportada por el biochar, por ende, el biochar puede actuar como un “portador” de nutrientes cuando se combina con fertilizantes orgánicos, aumentando su eficiencia y favoreciendo un mayor crecimiento vegetal.

No obstante, deben considerarse ciertas limitaciones del estudio, como el corto tiempo de evaluación y el enfoque en condiciones semi controladas. Por ello, se recomienda realizar investigaciones a largo plazo y en campo abierto para validar los efectos del biochar sobre el rendimiento final del maíz y su influencia en otros parámetros edáficos, incluyendo la actividad microbiológica y la estructura del suelo.

Conclusiones

De manera general, los resultados permiten concluir que la aplicación del biochar derivado de *G. angustifolia* tiene un efecto positivo en el crecimiento de *Z. mays*, especialmente cuando se encuentra en sinergia con fertilizantes químicos. Esta combinación logra mejorar significativamente variables como la altura, el diámetro del tallo, número de hojas y vigor de la planta al activar mecanismos fisiológicos que favorecen el desarrollo del cultivo. Por otro lado, la aplicación exclusiva de biochar, aunque no maximiza el desarrollo del maíz, sí evidencia un aporte relevante al permitir un crecimiento básico adecuado, posiblemente por su aporte lento y gradual de nutrientes esenciales y su efecto sobre la estructura del suelo.

El biochar de *G. angustifolia* representa una alternativa viable y sostenible para la mejora de la fertilidad del suelo, gracias a su capacidad para aportar nutrientes como fósforo, potasio, calcio y magnesio. Su estructura física porosa y su alta estabilidad química permiten la retención de nutrientes y agua, lo que lo convierte en un acondicionador del suelo eficaz en condiciones de baja fertilidad.

Estos resultados permiten concluir que el biochar de *G. angustifolia*, cuando se emplea en combinación con abonos orgánicos, y el acompañamiento de fertilizantes químicos constituye una herramienta efectiva para mejorar la fertilidad del suelo y el desarrollo del cultivo de maíz en condiciones agroecológicas semicontroladas.

En conjunto, los resultados sugieren que la aplicación de biochar de *G. angustifolia* tiene un efecto positivo sobre algunos parámetros de fertilidad del suelo, especialmente en el incremento del fósforo disponible y los cationes intercambiables. No obstante, variables como el pH y la materia orgánica mostraron una respuesta más conservadora, indicando la necesidad de complementar su aplicación con otras prácticas agroecológicas.

Desde una perspectiva ambiental y socioeconómica, el aprovechamiento del biochar de guadua representa una oportunidad estratégica para pequeños y medianos agricultores del sur del Huila, al ofrecer una alternativa de bajo costo, local y ecológicamente responsable que mejora la productividad sin comprometer los recursos naturales.

En síntesis, los resultados respaldan el potencial agroecológico del biochar de guadua como enmienda orgánica y promotor del rendimiento agrícola, aportando una alternativa sólida para avanzar hacia sistemas productivos más sostenibles en el departamento del Huila y otras regiones con características agroecológicas similares.

Finalmente, este estudio valida la necesidad de seguir promoviendo investigaciones agroecológicas que integren materiales como el biochar en la agricultura rural colombiana, no solo como una técnica de fertilización, sino como un componente clave en la conservación del suelo, la mitigación del cambio climático y el fortalecimiento de la soberanía alimentaria.

Recomendaciones

Implementar ensayos a mayor escala y en condiciones de campo abiertas, con el fin de validar la eficacia del biochar bajo diferentes tipos de suelo, climas y sistemas de manejo, y así fortalecer su aplicabilidad práctica en contextos reales de producción.

Incentivar políticas públicas que promuevan el aprovechamiento sostenible de la guadua como recurso estratégico para la producción de biochar, articulando esfuerzos entre instituciones ambientales, centros de investigación y organizaciones campesinas.

Promover investigaciones multidisciplinarias que evalúen no solo los efectos del biochar en el suelo y en el cultivo, sino también en aspectos económicos, sociales y ecológicos, incluyendo su impacto en la salud del suelo a largo plazo, la captura de carbono y la biodiversidad microbiana.

Explorar el potencial del biochar como parte de estrategias de manejo integrado de suelos degradados, especialmente en zonas donde se hayan aplicado históricamente herbicidas como el glifosato, buscando alternativas de recuperación ambiental y productiva.

Referencias Bibliográficas

- Agricultura., F. O. (2024). *La contaminación de los suelos: Una amenaza oculta para la producción agrícola y la salud humana*. Obtenido de <https://www.fao.org/soils-portal>
- Agricultura., O. d. (2015). *Estado mundial de los recursos del suelo 2015: Resumen técnico*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/i5199s/i5199s.pdf>
- Altieri, M. A. (2002). *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable*. *Agroecología*. Obtenido de https://www.biodiversidadla.org/Documentos/AGROECOLOGIA_Bases_cientificas_para_una_agricultura_sustentable
- Bargmann, I., Rillig, M., Kruse, A., Grief, J.-M., & Kucke, M. (2013). Hydrochar and Biochar Effects on Germination of Spring Barley. *Journal of Agronomy and Crop Science*.
- Carbotecnia. (2025). *Carbotecnia*. Obtenido de Biocarbón para mejorar suelos agrícolas: <https://www.carbotecnia.info/producto/biochar/#:~:text=El%20BioChar%20puede%20mejorar%20la,estr%C3%A9s%20como%20sequ%C3%ADas%20o%20inundaciones>.
- Cardona Restrepo, M. A. (2021). *Manejo del cultivo de maíz en Colombia: Retos y oportunidades para su sostenibilidad*. Obtenido de <https://doi.org/10.17584/rcch>
- Colombia, U. E. (2021). *Universidad Externado de Colombia*. Obtenido de Glifosato. Erradicador de ambiente, salud y cultivos ilícitos: <https://medioambiente.uexternado.edu.co/glifosato-erradicador-de-ambiente-salud-y-cultivos-ilicitos/>
- FAO. (2024). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de La contaminación de los suelos está contaminando nuestro futuro: <https://www.fao.org/newsroom/story/Polluting-our-soils-is-polluting-our-future/es>

- García Montero, R. (2021). *tecnicaindustrial.es*. Obtenido de Biochar y sus aplicaciones potenciales en el suelo: <https://www.tecnicaindustrial.es/biochar-y-sus-aplicaciones-potenciales-en-el-suelo/>
- García Ruiz, L. A., Mazo Zuluaga, I. T., & Ramírez Arango, A. M. (2015). *FAO*. Obtenido de Propuesta para la sustitución de cultivos ilícitos mediante modelos agroforestales: <https://www.fao.org/4/xii/0587-b5.htm>
- Huila, G. d. (2022). *Plan de desarrollo agrícola del departamento del Huila 2020–2023*. Obtenido de <https://www.huila.gov.co>
- Katterer, T., Roobroeck, D., Andren, O., Kimutai, G., Karlton, E., Kirchmann, H., . . . Roing de Nowina, K. (2019). Biochar addition persistently increased soil fertility and yields in maize-soybean rotations over 10 years in sub-humid regions of Kenya. *ScienceDirect*.
- Kogut, P. (2023). *EOS Data Analytics*. Obtenido de Degradación del suelo: Técnicas para evitar sus efectos: <https://eos.com/es/blog/degradacion-del-suelo/#:~:text=Tipos%20De%20Degradaci%C3%B3n%20Del%20Suelo&text=La%20degradaci%C3%B3n%20del%20suelo%20qu%C3%ADmica,cambia%20el%20pH%20del%20suelo.>
- Lehmann, J. &. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation*. Obtenido de <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.4324/9780203762264/biochar-environmental-management-johannes-lehmann-stephen-joseph>
- Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & Glaser, B. (2003). Disponibilidad y lixiviación de nutrientes en un antrosol arqueológico y un ferransol de la

- cuenca central de la Amazonía: Fertilizantes, estiércol y enmiendas de carbón vegetal. *Plant and soil*. Obtenido de <https://doi.org/10.1023/A:1022833116184>
- Londoño, J. R. (2020). *Efecto del biochar de guadua sobre la fertilidad de suelos del Huila*. Obtenido de <https://doi.org/10.31910/rudca.2020.23.2>
- Moreno Reséndez, A. G., Reyes Carrillo, J. L., Vásquez Arroyo, J., & Cano Ríos, P. (2018). Rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal: una alternativa de biofertilización para la agricultura sostenible. *Revista colombiana de biotecnología*.
- Naturaleza., F. M. (2023). *Impacto del uso de agroquímicos en los suelos agrícolas de Colombia*. Obtenido de <https://www.wwf.org.co>
- Orozco Gutierrez, G., Medina Telez, L., Elvira Espinoza, A., & Cervantes Preciado, J. F. (2021). Biocarbón de bambú como mejorador de la fertilidad del suelo en caña de azúcar. *SCielo Revista mexicana de ciencias forestales*.
- Orozco Gutiérrez, J. R. (2021). *Biochar de Guadua angustifolia Kunth: Propiedades y potencial en la recuperación de suelos agrícolas*. Obtenido de <https://doi.org/10.14483/2422278X>
- Orozco Gutiérrez, J. R. (2021). *Biochar de Guadua angustifolia Kunth: Propiedades y potencial en la recuperación de suelos agrícolas*. Obtenido de <https://doi.org/10.14483/2422278X>
- Rodríguez-Vargas, M. G. (2017). *Evaluación de biochar de guadua en la corrección de acidez y mejora de la actividad biológica en suelos cafeteros*. Obtenido de *Cenicafé*, 68(1), 45–56.
- Schmidt, H. P. (2021). *Biochar-based carbon sinks to mitigate climate change*. *Nature Communications*. Obtenido de <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22029-z>
- USBI. (2025). El biocarbón mejora el rendimiento de los cultivos, enriquece el suelo y protege el agua. *USBI*.

Vargas, D. (2019). Alternativas sostenibles al uso de glifosato. *PESQUISA Javeriana*. Obtenido de Alternativas sostenibles al uso del glifosato:

<https://www.javeriana.edu.co/pesquisa/alternativas-sostenibles-al-uso-de-glifosato/>

Zamora Bringas, G. P. (2020). *Repositorio Institucional Universidad Agraria La Molina*.

Obtenido de El biochar de *Guadua angustifolia* Kunth procedente de los residuos del aprovechamiento de plantaciones forestales como enmienda orgánica para el suelo:

<https://hdl.handle.net/20.500.12996/4483>