



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**PRODUCCIÓN DE BIOCHAR A PARTIR DE BIOMASA RESIDUAL (SUROESTE
ANTIOQUEÑO) COMO BIOMEJORADOR DE SUELOS AGRÍCOLAS**

Juan Manuel Adaime Otalvaro

Trabajo de grado presentado para optar al título de Químico

Asesora

Laura Cristina Urán Castaño, Doctor (PhD) *en Ciencias Químicas*

Coasesora

Andrea Stefania García Torres, Magíster (MSc) en Ciencias - Biotecnología

Universidad de Antioquia

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Química

Medellín, Antioquia, Colombia

2026



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Cita	(Adaime Otalvaro 2026)
Referencia	[1] Adaime Otalvaro, Juan Manuel “Producción de biochar a partir de biomasa residual (Suroeste antioqueño) como biomejorador de suelos agrícolas”, Trabajo de grado profesional, Química, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2026.
Estilo IEEE (2020)	



Grupo de Investigación. Catalizadores y Adsorbentes

Centro de Investigación en Ciencias Exactas y Naturales (CIEN).

Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Agradecimientos

Al Comité para el Desarrollo de la Investigación (CODI) por la financiación del proyecto con código SIU 2023-64112, titulado “Obtención de biomejoradores de suelo a partir de biomasa residual proveniente de la subregión del Suroeste Antioqueño”.

Al grupo de investigación Catalizadores y Adsorbentes (CATALAD), por darme la oportunidad de aprender y desarrollar mi proyecto de investigación en sus instalaciones.

A Anton Paar por el préstamo de sus equipos y la prestación de sus servicios para la caracterización espectroscópica de los materiales mediante la técnica ATR-IR, lo cual fue fundamental para el desarrollo del presente estudio.

A mi mamá, papá, hermano y mis abuelos, por ser el pilar fundamental que ha sostenido mi camino académico y personal.

A mis tutoras, Laura Urán y Andrea García, por su guía y compromiso durante mi formación. Gracias por la paciencia y dedicación por formarme como profesional y como persona.

A Mariana, Juan David y Andrés, por acompañarme en los momentos de frustración, en las risas y sobre todo aprendiendo en el grupo de investigación.

A mis amigos, a los que están y a los que estuvieron, por hacer más llevadero toda esta experiencia.

A la Universidad de Antioquia, por ser mi hogar durante todos estos años.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
ABSTRACT	12
I. INTRODUCCIÓN	13
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
III. JUSTIFICACIÓN	15
IV. OBJETIVOS	16
V. HIPÓTESIS	17
VI. MARCO TEÓRICO	18
6.1. Prácticas agrícolas - siembra del café	18
6.1.1. Biomasa residual	19
6.2. Análisis de suelo y fertilidad	19
6.2.1. Macro y micronutrientes del suelo	19
6.2.1.1. Deficiencias nutricionales	20
6.2.2. Propiedades fisicoquímicas del suelo	20
6.2.2.1. Carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico, pH, conductividad eléctrica	20
6.2.3. Cultivos de ciclo corto (Fríjol Uribe Rosado)	21
6.2.3.1. Condiciones de desarrollo del cultivo	22
6.3. Biochar	23
6.3.1. Preparación y caracterización	23
6.3.2. Estructura y composición química del biochar	24
6.3.3. Propiedades fisicoquímicas del biochar de cáscara de café	26
6.3.4. Uso como biomejorador del suelo	26

6.3.5. Efecto del biochar en las propiedades fisicoquímicas del suelo.....	27
6.3.5.2. Comportamiento de las propiedades fisicoquímicas del suelo en mezclas suelo-biochar y agronómicas.	28
6.3.6. Tecnologías de producción de biochar.....	29
6.3.6.1. Gasificación (Tiro ascendente).....	29
VII. METODOLOGÍA	31
7.1. Revisión y búsqueda de literatura	31
7.2. Obtención de biochar mediante proceso de pirólisis.....	32
7.2.1. Caracterización de la biomasa de cáscara de café y su biochar	33
7.2.1.1. Análisis próximo.....	33
7.2.1.2. Difracción de rayos X (DRX)	33
7.2.1.3. Fluorescencia de rayos X (FRX)	33
7.2.1.4. Espectroscopía IR (ATR-IR)	34
7.2.1.6. Análisis Raman.....	34
7.2.1.7. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	35
7.3. Evaluación de los efectos del biochar en el suelo de estudio.....	35
7.3.1. Caracterización fisicoquímica del suelo de estudio de la subregión del suroeste antioqueño.....	35
7.3.2. Ensayos con cultivos indoor (Condiciones controladas).	35
7.3.3. Muestreo de datos y variables agronómicas.....	36
7.3.3.1. Tasas de crecimiento relativo (TCR).....	36
7.3.4. Comparación de las mezclas suelo – biochar en el tiempo	37
7.3.4.1. Análisis estadístico	37
VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
8.1. Pirólisis de cáscara de café	39

8.2. Caracterización termogravimétrica de la biomasa residual (Cáscara de café) y su material carbonoso	40
8.2.1. Análisis próximo de la biomasa residual (Cáscara de café) y su material carbonoso	40
8.3. Caracterización textural del material carbonoso	42
8.3.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	43
8.4. Caracterización estructural y espectroscópica del material carbonoso	46
8.4.1. Difracción de rayos X (DRX)	46
8.4.2. Espectroscopía infrarroja (ATR-IR)	47
8.4.3. Espectroscopía RAMAN.....	49
8.5. Fluorescencia de rayos (FRX)	50
8.6. Efecto biomejorador del biochar	51
8.6.1. Comportamientos variables fisicoquímicas	51
8.6.1.1. Carbono orgánico del suelo (COS)	51
8.6.1.2. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	54
8.6.1.3. pH.....	56
8.6.1.4. Conductividad eléctrica (CE)	58
8.7. Comportamientos variables agronómicas.....	59
8.7.1. Altura de la plántula	59
8.7.2. Diámetro del tallo	60
8.7.3. Desarrollo de la plántula y productividad	61
8.8. Análisis estadísticos	64
IX. CONCLUSIONES	68
X. RECOMENDACIONES	69
XI. PARTICIPACIÓN EN EVENTOS CIENTÍFICOS.....	70
REFERENCIAS	71

ANEXOS	79
---------------------	-----------

LISTA DE TABLAS

TABLA I NOMENCLATURA DE LAS MEZCLAS SUELO - BIOCHAR	36
TABLA II RENDIMIENTOS OBTENIDOS DE LA SÍNTESIS DEL BIOCAHR.....	39
TABLA III RENDIMIENTOS COMPARATIVOS DE BIOCHAR MEDIANTE PIRÓLISIS DE CÁSCARA DE CAFÉ	40
TABLA IV ANÁLISIS PROXIMO DE LA CÁSCARA DE CAFÉ Y EL BIOCHAR OBTENIDO	42
TABLA V ANÁLISIS FRX DEL BIOCHAR Y SU CENIZA.....	50
TABLA VI PORCENTAJES COMPARATIVOS DE AUMENTO RESPECTO AL CONTROL EN EL CARBÓN ORGANICO DEL SUELO SEGÚN TRATAMIENTO	53
TABLA VII PORCENTAJES COMPARATIVOS DE AUMENTO RESPECTO AL CONTROL EN LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC) DE SUELO SEGÚN TRATAMIENTO	56
TABLA VIII PORCENTAJES DE AUMENTO RESPECTO AL CONTROL PARA LOS SEGMENTOS DE LA PLÁNTULA POR TRATAMIENTO APLICADO	62
TABLA IX ANOVA PARA VARIABLES PARAMÉTRICAS SEGÚN FACTORES APLICADOS SEGÚN TUKEY.....	65
TABLA X VALORES PARA VARIABLES NO PARAMÉTRICAS SEGÚN FACTORES APLICADOS	65
TABLA XI VALORES Y CATEGORIZACIÓN POR LETRAS PARA VARIABLES PARAMÉTRICAS SEGÚN TUKEY	66
TABLA XII VALORES p COMPARATIVOS PARA VARIABLES NO PARAMÉTRICAS SEGÚN Pairwise Wilcoxon.....	66

LISTA DE FIGURAS

Fig 1. Resumen gráfico de la investigación	10
Fig 2. Imagen representativa del fríjol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) variedad Uribe Rosado	22
Fig 3. Esquema general composicional del biochar. Tomado de [17].	25
Fig 4. Esquema general del micro-gasificador TLUD. Tomado de [35].	30
Fig 5. Esquema secuencial de la metodología desarrollada	31
Fig 6. Síntesis de biochar - Montaje experimental de recolección de datos de temperatura	32
Fig 7. A) Cáscara de café, B) Biochar a partir de cáscara de café	39
Fig 8. Termo-gramas comparativos entre cáscara de café y su material carbonoso	41
Fig 9. Comparación de los resultados del análisis próximo de la cáscara de café y su biochar	42
Fig 10. Micrografías SEM - Cáscara de café	43
Fig 11. Micrografías SEM - Sistema poroso biochar cáscara de café A) Cavidades alargadas B) Cavidades densas	44
Fig 12. Distribución elemental obtenida por EDS para el biochar	45
Fig 13. Distribución del diámetro de poro en el biochar de cáscara de café	46
Fig 14. Patrones de difracción de rayos X de las muestras de biochar sintetizado	47
Fig 15. Espectro ATR-IR de la biomasa y el biochar obtenido	48
Fig 16. Espectro Raman del biochar producido a partir de cáscara de café	49
Fig 17. Comportamiento del carbono orgánico del suelo en el tiempo por tratamiento	52
Fig 18. Gráfico comparativo para la producción de CO ₂ frente al control vs tratamiento 5%. Tomado de [66]	54
Fig 19. Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en el tiempo por tratamiento	55
Fig 20. Comportamiento del pH en el tiempo por tratamiento	57
Fig 21. Comportamiento de la conductividad eléctrica en el tiempo por tratamiento	58
Fig 22. Tasas de crecimiento relativo (Altura de plántula) para experimentos de fríjol Uribe Rosado según tratamiento	60
Fig 23. Tasas de crecimiento del diámetro de tallo en las plántulas de fríjol Uribe Rosado según tratamiento	61
Fig 24. Desarrollo de la plántula y productividad del cultivo de fríjol Uribe Rosado por tratamiento	62

Fig 25. Segmentos de las plántulas comparativos entre tratamientos de biochar y el control.....	63
Fig 26. Diseño microgasificador tiro ascendente A) Software AutoCAD B) Diseño real utilizado	79
Fig 27. Diagramas de flujo según normativa NTC A) Capacidad de intercambio catiónico (CIC) B) Carbono orgánico del suelo (COS) C) Conductividad eléctrica y pH	80
Fig 28. Plántulas de fríjol Uribe rosado en cámara climático A) Semanas iniciales del ciclo de cultivo B) Semanas intermedias del ciclo de cultivo	81
Fig 29. Comparación visual y agronómica entre tratamientos de biochar y control	81

RESUMEN

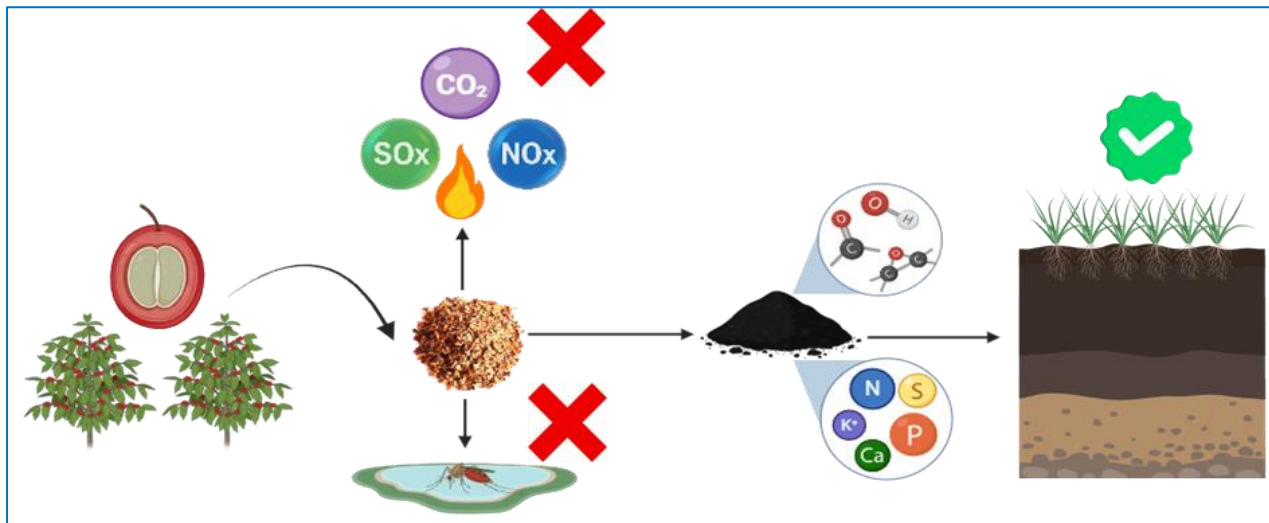


Fig 1. Resumen gráfico de la investigación

En la producción de café, aproximadamente el 5% del peso del fruto se utiliza en la preparación de la bebida, mientras que el 95% restante corresponde a residuos agroindustriales. Entre estos, la cáscara de café representa una fracción aproximada del 12% respecto al peso del fruto, siendo un subproducto abundante en la región del suroeste antioqueño. El presente trabajo tiene como objetivo la obtención de un biocarbón (biochar) a partir de cáscara de café y la evaluación de su potencial como biomejorador de suelos en cultivos de interés alimentario.

Para la producción del biochar se utilizó un microgasificador autotérmico tipo tiro ascendente, operando hasta una temperatura máxima de 550 °C. La cáscara de café y el biochar se caracterizaron fisicoquímicamente, mientras que el suelo objetivo fue evaluado en términos de capacidad de intercambio catiónico (CIC), carbono orgánico (CO), pH y conductividad eléctrica (CE). El efecto biomejorador del biochar se evaluó mediante un experimento en macetas utilizando fríjol (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad Uribe Rosado como cultivo modelo, empleando tres proporciones de biochar-suelo (1%, 3% y 5%) y un control, con cinco replicas por tratamiento.

La adición de biochar incrementó el contenido de carbono orgánico del suelo hasta un 22,6% y la CIC hasta un 27,4% respecto al control. Estas mejoras se reflejaron en aumentos de hasta 78,9% en el sistema radicular, 92,8% en el sistema aéreo y 127,9% en el peso de las vainas. El análisis estadístico mostró diferencias significativas ($p < 0,05$) para todas las variables evaluadas entre tratamientos y control, confirmando el efecto positivo del biochar sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo y la productividad del fríjol Uribe Rosado.

Palabras clave — Cáscara de café, biomasa residual, biochar, pirólisis, efecto biomejorador, productividad.

ABSTRACT

In coffee production, approximately 5% of the fruit's weight is used in brewing, while the remaining 95% corresponds to agro-industrial waste. Among this waste, coffee husks account for approximately 12% of the fruit's weight, making them a significant byproduct in the southwestern region of Antioquia. This study aims to obtain biochar from coffee husks and evaluate its potential as a soil amendment for food crops.

For biochar production, an updraft, autothermal microgasifier was used, operating at a maximum temperature of 550 °C. The coffee husks and the biochar were characterized physicochemically, while the target soil was evaluated in terms of cation exchange capacity (CEC), organic carbon (OC), pH, and electrical conductivity (EC). The soil-enhancing effect of biochar was evaluated in a pot experiment using pink Uribe bean as a model crop. Three biochar-to-soil ratios (1%, 3%, and 5%) and a control were used, with five replicates per treatment.

The addition of biochar increased soil organic carbon content by up to 22,6% and cation exchange capacity (CEC) by up to 27,4% compared to the control. These improvements resulted in increases of up to 78,9% in root system, 92,8% in shoot system, and 127,9% in pod weight. Statistical analysis revealed significant differences ($p < 0,05$) for all variables evaluated between treatments and the control, confirming the positive impact of biochar on the soil's physicochemical properties and the productivity of pink Uribe beans.

Keywords — Coffee husks, residual biomass, biochar, pyrolysis, bio-enhancing effect, productivity.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda por sistemas agrícolas sostenibles ha impulsado la búsqueda de alternativas que mejoren la calidad del suelo, aumenten la productividad de los cultivos y reduzcan el impacto ambiental asociado a la agricultura convencional. Entre estas alternativas, el biochar se ha consolidado como un material carbonoso con alto potencial debido a su estabilidad química, su capacidad para mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo y su papel en el secuestro de carbono. Por otro lado, el biochar es un sólido carbonoso obtenido por la pirólisis controlada de biomasa lignocelulósica, proceso que le confiere al mismo propiedades que pueden transformar la dinámica del suelo.

La región del suroeste antioqueño representa aproximadamente el 60% de la producción de café en el departamento de Antioquia, por lo que residuos agroindustriales como la cáscara de café representan una problemática ambiental y social, debido a su abundancia y sumado a su poco y/o nulo aprovechamiento. Su transformación en biochar representa una oportunidad tanto ambiental como agronómica, al convertir un residuo en un producto de valor agregado para mejorar y optimizar cultivos de interés alimentario.

De este modo, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el efecto biomejorador del biochar producido a partir de cáscara de café en el desarrollo del cultivo de frijol Uribe Rosado, mediante la determinación de variables fisicoquímicas del suelo, como el carbono orgánico, la capacidad de intercambio catiónico, el pH y la conductividad eléctrica.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El café es una de las bebidas más consumidas a nivel mundial, lo que ha generado un aumento constante en su producción, estimada en 170 millones de sacos en 2022 con una proyección de crecimiento anual del 1 al 2% [1]. Este incremento implica una mayor demanda de recursos agrícolas como fertilizantes y agua, generando impactos negativos en el medio ambiente, como el cambio climático y la degradación del suelo. Además, fenómenos climáticos extremos como La Niña, han afectado significativamente la producción, como ocurrió en Colombia con una reducción del 12% entre 2021 y 2022 [2]. Frente a estos desafíos, se plantea la necesidad de implementar estrategias sostenibles como el uso de biochar, un material carbonoso obtenido por pirólisis de biomasa, que presenta propiedades fisicoquímicas que pueden mejorar la fertilidad del suelo, y así mismo, ser parte del desarrollo de la economía circular de la región [3]. En particular, se propone utilizar la cáscara de café, el cual es un residuo agrícola abundante de la siembra del café, que no presenta un uso aparente para el sector agrícola. Lo anterior lleva a circunstancias o efectos colaterales que afectan directamente a la población campesina perteneciente a las comunidades cafeteras del suroeste de Antioquia, desde pérdida de área útil, hasta la producción de gases de efecto invernadero por la quema del mismo. De este modo, una biomasa residual que representa una problemática para el campesinado y las comunidades aledañas puede ser utilizada para la producción de biochar, reduciendo su impacto ambiental y social, mejorando la productividad de los cultivos en regiones cafeteras como Antioquia.

III. JUSTIFICACIÓN

La obtención de materiales carbonosos a partir de residuos de café se fundamenta en su estrecha relación con múltiples nodos estratégicos y programas que abordan aspectos cruciales para el desarrollo sostenible y el bienestar en la región [4][5]. Esta investigación busca el aprovechamiento de la biomasa residual que resulta de la cosecha de un producto de alto valor comercial como lo es el café, para la producción de biochar mediante procesos sostenibles y que en algún momento puedan ser replicables en comunidades campesinas.

Así mismo, la investigación busca aportar al fortalecimiento de prácticas agrícolas sostenibles mediante la evaluación del uso de biochar proveniente de de café como biomejorador en suelos del Suroeste Antioqueño. En el contexto actual de preocupación por la degradación de los recursos naturales, la propuesta adquiere relevancia al explorar alternativas que permitan optimizar las propiedades fisicoquímicas del suelo y reducir la dependencia de fertilizantes convencionales, cuyos efectos negativos sobre el ambiente son ampliamente reconocidos. Así, el biochar obtenido a partir de biomasas residuales representa una opción ambientalmente amigable, que permite mejorar las propiedades del suelo al tiempo que se valorizan subproductos agrícolas, fomentando un enfoque integral y sustentable en el manejo de recursos.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Obtener biomejoradores de suelo a partir de biomasa residual proveniente de la subregión del Suroeste Antioqueño.

B. Objetivos específicos

- 1) Sintetizar biochar mediante un gasificador de tiro ascendente a partir de biomasa residual de cáscara de café
- 2) Evaluar el efecto biomejorador del biochar en suelo de estudio de la subregión del suroeste antioqueño.

V. HIPÓTESIS

La adición de biochar producido a partir de cáscara de café mejora las propiedades fisicoquímicas del suelo y favorece el desarrollo agronómico de un cultivo de ciclo corto como el fríjol Uribe Rosado.

VI. MARCO TEÓRICO

6.1. Prácticas agrícolas - siembra del café

El café es una de las bebidas de mayor consumo a nivel mundial. En consecuencia, para el año 2022 se produjeron alrededor de 180 millones de sacos de 60 kg [1], y se espera un incremento del consumo entre 1 y 2% al año, lo que implica un requerimiento cada vez mayor de la producción del grano. Lo anterior se traduce en la necesidad de usar mayor cantidad de recursos (fertilizantes, agroquímicos, energía, agua entre otros) con el fin de suplir dicha demanda. Se ha demostrado cómo el alto uso de fertilizantes (para el cultivo de café y otros cultivos) han generado impactos negativos en el medio ambiente y a la sociedad; como una alta contribución al cambio climático, degradación del suelo y uso final del recurso hídrico; cambios en la resistencia de plagas y enfermedades de los cultivos. Justamente el resultado del exceso de lluvias debido a un prolongado fenómeno de La Niña en los últimos dos años y medio, producto del cambio climático [2], redujo la producción de café colombiano (arábigo suave) en 12%; pasando de 12,6 millones de sacos en 2021 a 11,1 millones de sacos en 2022.

Particularmente, de los cultivos de café solamente se aprovecha el 5% del peso del fruto fresco en la preparación de la bebida [6], el 95% restante está representado por residuos. Igualmente, la pulpa del café representa alrededor del 44% del peso fresco del fruto, siendo el principal subproducto del beneficio. Esta pulpa está compuesta por proteína (7,5–15,0%), grasa (2,0–7,0%) y carbohidratos (21–32%), y estos pueden usarse como materia prima para nuevos procesos [6]. En consecuencia, la pulpa de café resulta atractiva por su disponibilidad y su cadena de valor, para la producción de biochar. Por otra parte, la región del Suroeste Antioqueño, lugar donde se desarrollará el proyecto, tiene una importante vocación agrícola y cafetera. Antioquia produce cerca de 1,9 millones de sacos (cifra del 2022) [7] y la región del suroeste produce cerca del 60% de dicha producción [8]. Así las cosas, podría afirmarse que hay una alta disponibilidad de pulpa de café en la región del suroeste. Esto podría convertirse en una oportunidad para la generación de productos de mayor valor agregado y además mejorar la cadena de valor del café.

6.1.1. Biomasa residual

La biomasa residual es según la APPA (Asociación de empresas de Energía Renovable) materia orgánica que puede ser utilizada como fuente de energía, que abarca un amplio conjunto de materias orgánicas que se caracterizan por su heterogeneidad, su origen y su naturaleza. Estos recursos biomásicos pueden agruparse de forma general en agrícolas y forestales. También se considera biomasa la materia orgánica de las aguas residuales y los lodos de depuradora, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), y otros residuos derivados de las industrias. La valoración de la biomasa puede hacerse a través de cuatro procesos básicos como combustión, digestión anaerobia, gasificación y pirólisis, métodos mediante los cuales se puede transformar la biomasa en productos de alto valor agregado tales como el bioaceite, syngas y biochar [9].

6.2. Análisis de suelo y fertilidad

6.2.1. Macro y micronutrientes del suelo

El crecimiento, desarrollo y productividad optima de una plántula está sujeto a diferentes factores que pueden tener una mayor o menor implicación en el mismo, por lo que es de importancia entender que las variaciones o deficiencias en diferentes propiedades fisicoquímicas, agronómicas y ambientales pueden estar directamente relacionadas con un efecto negativo o positivo en las plántulas. De esta manera, uno de los principales aspectos a tener en cuenta es el aporte de los macro y micronutrientes en las etapas de desarrollo de la plántula [10], [11].

Los macronutrientes pueden definirse como aquellos elementos nutricionales que presentan una mayor demanda por la planta (mayores cantidades para su desarrollo) en comparación con los que presentan una menor demanda, los cuales se denominan micronutrientes. Dentro de la denominación de macronutrientes se encuentran elementos como lo son el potasio, nitrógeno, fosforo, etc., mientras que en la denominación de micronutrientes se encuentran elementos como el hierro, zinc, cobre, manganeso, etc. Por lo anterior, es de importancia señalar que el desarrollo de una plántula está altamente influenciado por la disponibilidad nutricional, es de esta manera que macronutrientes como el Nitrógeno (N), fosforo (P) y el potasio (K), también llamado contenido

NPK, representan una fuente nutricional y vital para un óptimo crecimiento, desarrollo y productividad de las especies [12] [13].

6.2.1.1. Deficiencias nutricionales

Todos los elementos esenciales de las plantas desempeñan específicamente su función nutricional en una proporción equilibrada, la cual es necesaria para el correcto crecimiento y desarrollo de diversas especies [11]. Por consiguiente, un efecto esperado en la carencia o déficit de macro y micronutrientes puede estar representado negativamente en la salud del suelo, afectando directamente la producción agrícola de un cultivo determinado, y por consiguiente la salud humana. Además de la deficiencia de macronutrientes como el contenido NPK, la deficiencia en micronutrientes (Zn, B, Fe, Cu, etc.) puede estar relacionada a factores como el aumento en el uso de fertilizantes y a una mayor intensidad o tasa de cultivo [14].

En diversos estudios se ha encontrado un efecto negativo en la productividad de distintas plántulas dado a la deficiencia de macronutrientes como el N y P. Esto se evidencia en una reducción en el crecimiento del sistema radicular (raíces) y el sistema aéreo (parte que se encuentra por encima del suelo) de algunas plántulas. Para el estudio mencionado anteriormente [15], se resalta la disminución de aproximadamente el 34% de la biomasa de los brotes cuando hay deficiencia de N o P. Así mismo, una disminución en la longitud de la raíz debido a la misma deficiencia. El estudio realizado muestra una disminución en la longitud de la raíz de aproximadamente el 20% para la deficiencia de N y del 15% para la deficiencia de P [15]. El caso anterior representa un caso aislado para un cultivo en específico, pero proporciona una perspectiva frente a la influencia del contenido nutricional (macro y micronutrientes) en las diferentes etapas de crecimiento de una determinada plántula.

6.2.2. Propiedades fisicoquímicas del suelo

6.2.2.1. Carbono orgánico, capacidad de intercambio catiónico, pH, conductividad eléctrica

Las propiedades fisicoquímicas engloban parámetros que están relacionados con la fertilidad del suelo, por lo que el análisis individual de cada una de ellas representa un campo de

estudio respecto al desarrollo de una especie determinada. Dentro de las propiedades más representativas o de mayor importancia en el estudio de la sustentabilidad de un suelo, o del crecimiento de una plántula se encuentran las siguientes propiedades: Capacidad de intercambio catiónico (CIC), Carbono orgánico (CO), pH y conductividad eléctrica [16].

El carbono orgánico del suelo está asociado al contenido de materia orgánica del suelo (MOS) que pueda tener un sustrato o un suelo determinado, siendo este el principal componente de la materia orgánica. Es de esta manera que está relacionado con la sustentabilidad agrícola, siendo determinante en la disponibilidad y la cantidad de nutrientes que pueda tener una plántula para su crecimiento. Así mismo, esta incluye una fracción viva, o biota, que participa en la descomposición y transformación de los residuos orgánicos [17].

La materia orgánica por otro lado puede definirse dentro de un amplio espectro, puede denominarse como residuos orgánicos ya sea de un origen animal o vegetal que se encuentren en diferentes etapas de descomposición, como también puede relacionarse a toda estructura que posea en su composición elementos como C, H, N, O, y S [17] en una matriz compleja como lo es un suelo.

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) está relacionada directamente con la fertilidad del suelo. Esta puede entenderse como la capacidad que tiene el suelo o sustrato para intercambiar, retener y absorber cationes como NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} [18]. De este mismo modo, los suelos que presenten una mayor CIC, presentaran una mayor capacidad para intercambiar y adsorber cationes o bases intercambiables, lo cual está directamente relacionado con una menor pérdida de nutrientes para el desarrollo de la plántula y una mayor disponibilidad de intercambio entre la plántula y el suelo [19].

6.2.3. Cultivos de ciclo corto (Fríjol Uribe Rosado)

El fríjol (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad Uribe Rosado es un fríjol arbustivo el cual se asocia dentro de la familia de leguminosas, siendo plantas de las que se cosechan legumbres o frutos formados por una vaina que en su interior presenta una semilla comestible. De este modo, el fríjol Uribe Rosado se denomina una leguminosa con un ciclo de crecimiento corto, entre 85 a 90 días, con una tendencia de crecimiento arbustivo y su semilla presenta una coloración rosada tenue, siendo característica su siembra en climas desde cálidos a templados [20].



Fig 2. Imagen representativa del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) variedad Uribe Rosado. Tomado de [21]

6.2.3.1. Condiciones de desarrollo del cultivo

Para el crecimiento óptimo de las plántulas, es necesario conocer los requerimientos ambientales de la especie a sembrar, en este caso del frijol Uribe Rosado. Dado que la variedad de especies de frijol es muy amplia, se expresan de una manera general las necesidades para un cultivo de frijol. Existen cámaras climáticas donde pueden modificarse y mantenerse constante variables como lo son la temperatura, humedad y el ciclo de luz – oscuridad que necesita la especie que se desee cultivar, por lo que factores ambientales como el cambio de estaciones o la presencia de fenómenos ambientales pueden evitarse al realizar seguimiento al desarrollo de las plántulas.

Principalmente, la temperatura promedio a la cual este tipo de cultivos se desarrolla se encuentra entre 15 – 27 °C, siendo característico de localidades con una tendencia a un clima templado [22]. Teniendo en cuenta que la siembra y cosecha de este tipo de cultivos se debe realizar en temperaturas moderadamente frías, la humedad relativa juega un papel crucial en el desarrollo de la planta, y en implicaciones como la aparición de enfermedades u hongos como la antracnosis debido a un alto porcentaje de esta [22]. Dado lo anterior, este tipo de condiciones climáticas correspondientes a un clima templado, ofrecen una humedad relativa entre un 50 – 80% [23]. Debido a las condiciones anteriores, valores entre el 60% se consideran aceptables considerando el rango establecido de la humedad relativa según cambia la temperatura del aire. Así mismo,

investigaciones como [24] encuentran que la fluctuación de humedad relativa a lo largo del ciclo del cultivo de frijol convencional oscila entre 47–56% en el día y 78–90% en la noche, con periodos puntuales superiores al 90%, por lo que los valores alcanzados en esta investigación respaldan la elección de una humedad relativa controlada de 60% [24].

Adicionalmente, el desarrollo de las plantas es dependiente del fotoperíodo, el cual está asociado a los cambios de iluminación solar que reciben las mismas, afectando así las etapas de crecimiento de las plántulas. Por lo anterior, una alternativa para garantizar ciclos de luz-oscuridad sin variaciones ambientales es el uso de cámaras climáticas.

6.3. Biochar

6.3.1. Preparación y caracterización

El biochar es un material carbonoso que puede ser producido mediante procesos de transformación térmica como la pirólisis, implementando materiales con alto contenido de carbono como biomasas residuales, madera, hojas u otros residuos agrícolas [18]. Este material contribuye significativamente a la mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, particularmente al aumentar el contenido de carbono, además de actuar como herramienta de mitigación del cambio climático al reducir las emisiones de gases nocivos desde los ecosistemas [25].

El biochar puede ser producido a partir de una amplia gama de biomasas, incluyendo residuos orgánicos, residuos forestales, restos de cocina y lodos residuales. La carbonización de la biomasa a través de pirólisis implica el calentamiento a temperaturas que varían entre 350 y 700 °C, bajo condiciones de oxígeno limitado o ausente, lo que induce una descomposición térmica de la biomasa lignocelulósica. Este proceso da lugar a la generación de tres fracciones principales: syngas (gas de síntesis), bioaceite y biochar [25]. La calidad y las propiedades del biochar dependen fundamentalmente de los materiales empleados como materia prima y de las condiciones de procesamiento. Las características morfológicas y fisicoquímicas del biochar están influenciadas por factores como la temperatura de pirólisis, el tiempo de residencia y la velocidad de calentamiento. La unidad estructural básica del biochar está compuesta por carbono amorfo y carbono con estructura tipo grafeno, siendo así que a medida que aumenta la temperatura de

pirólisis, el esqueleto de carbono evoluciona desde una estructura amorfa hacia una estructura más aromática, permitiendo la fusión de diferentes láminas de grafeno [25].

6.3.2. Estructura y composición química del biochar

El biochar de origen vegetal contiene una diversidad de elementos esenciales como carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, etc. Cuando el biochar conserva estos elementos tras el proceso de pirólisis, puede aportar nutrientes útiles al suelo, en especial nitrógeno, fosforo y potasio, favoreciendo el crecimiento vegetal. A medida que la temperatura de pirólisis aumenta, el contenido de carbono del biochar también se incrementa, mientras que disminuyen los contenidos de hidrógeno y oxígeno [19].

La celulosa presente en la biomasa original se convierte durante la pirólisis, en carbono labil y aromático, lo cual da estructura al biochar. En su superficie, el biochar presenta grupos funcionales como hidroxilos, carboxilos, carbonilos y ésteres. Estos grupos son responsables de muchas de sus propiedades químicas, incluyendo la alcalinidad, la capacidad de intercambio catiónico, las propiedades eléctricas superficiales y el comportamiento frente a la acidez o alcalinidad del medio [26]. Estos grupos funcionales también influyen en la afinidad del biochar por el agua y su interacción con nutrientes y contaminantes [19].

La cantidad y tipo de grupos funcionales cambia con la temperatura de pirólisis. A temperaturas bajas (menores a 150 °C), los procesos de deshidratación tienen poco efecto en los grupos funcionales. A temperaturas intermedias (250–350 °C), se reduce significativamente el contenido de carboxilos debido a la esterificación y descarboxilación, aunque los hidroxilos aumentan por reacciones de polimerización. A temperaturas elevadas (500–700 °C), se incrementa la estructura aromática, y los grupos alcohólicos se transforman en hidroxilos fenólicos, lo que eleva el contenido total de grupos funcionales superficiales [27] [19].

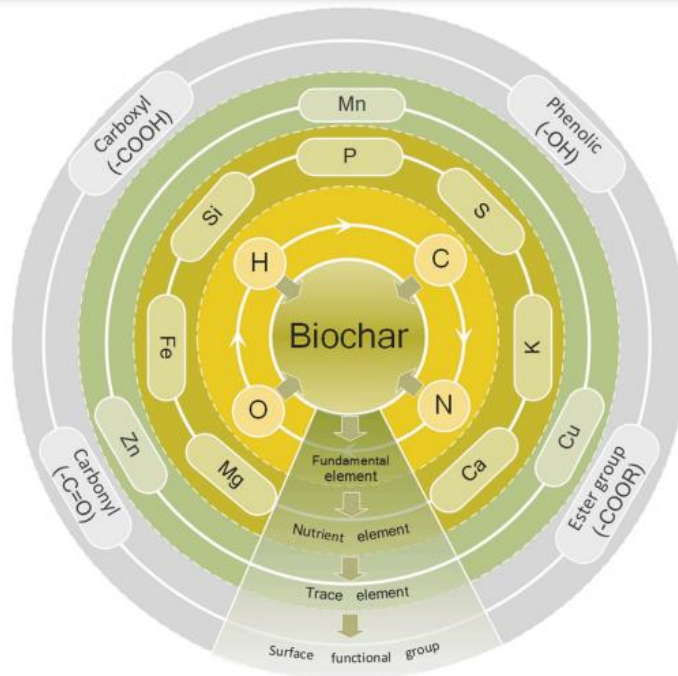


Fig 3. Esquema general composicional del biochar. Tomado de [19].

La estructura superficial del biochar es responsable de su alta porosidad. Durante la pirólisis, se desarrollan sistemas porosos con gran área superficial, que permiten la retención de agua y nutrientes en el suelo. Su estructura grafitica también ofrece una superficie eficaz para la adsorción de contaminantes, disminuyendo su disponibilidad para otros componentes ambientales [28]. En cuanto a los mecanismos de adsorción, se ha establecido que la retención de contaminantes ocurre mediante adsorción superficial, es decir, la adhesión de contaminantes a la superficie del biochar, especialmente en estructuras altamente carbonizadas obtenidas a altas temperaturas. Por otro lado, a temperaturas más bajas, donde las estructuras son menos carbonizadas, los contaminantes pueden ser retenidos por partición dentro de los microporos del biochar [25].

El pH del biochar varía entre neutro y alcalino cuando se produce a temperaturas superiores a 500 °C. A medida que la temperatura de pirólisis se incrementa en el rango de 400 a 600 °C, se observa una disminución en los compuestos volátiles y en el contenido de nitrógeno, mientras que aumentan las fracciones de cenizas y de carbono fijo. Las relaciones elementales H/C y O/C se utilizan comúnmente para evaluar el grado de aromaticidad del carbono presente en el biochar, lo cual se asocia directamente con su estabilidad química y funcionalidad en el suelo [25].

6.3.3. Propiedades fisicoquímicas del biochar de cáscara de café.

El biochar, es un material rico en carbono, muy heterogéneo y sus propiedades varían según la naturaleza de la materia prima y las condiciones de producción [29]. Su interés se centra inicialmente en el secuestro de carbono en el suelo, pero actualmente los estudios se están enfocando en su potencial para la remediación agrícola y ambiental. Además de mejorar el secuestro de carbono orgánico del suelo y mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el biochar mejora la productividad e inmoviliza la contaminación del suelo, favorece la fertilidad del suelo de múltiples maneras ya que contiene una cantidad considerable de micro y macronutrientes (como K, Ca, P, Mg, $\text{NH}_4\text{-N/NO}_3\text{-N}$, Zn y Fe), que son esenciales para el crecimiento de las plantas. Debido a su estructura porosa y área de superficial relativamente alta, la adición de biochar al suelo estimula la actividad microbiana [30].

Adicionalmente, se ha comprobado que los efectos en las propiedades físicas del suelo están relacionados con la estructura morfológica del biochar, ya que, debido al tamaño de sus partículas, la distribución del tamaño de los poros de la matriz del suelo puede ser modificada y mejorar la calidad del suelo. En este sentido, los macroporos del biochar desempeñan un papel importante en el suelo, debido a que son relevantes para funciones como la aireación y el movimiento de las raíces, así como para ofrecer la posibilidad de retención de nutrientes, lo que favorece una mejora de la productividad [31].

A su vez, el pH del suelo puede aumentar debido al pH del propio biochar y al mejorar la retención de cationes dentro del suelo; esto último correlacionado con el aumento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) [31] [18]. Otra propiedad química es la presencia de cadenas aromáticas condensadas en el biochar, que mejoran la captura y el almacenamiento de carbono, gracias a que estas ralentizan la velocidad de degradación de los compuestos orgánicos, retrasan el retorno del dióxido de carbono a la atmósfera y aumentan la concentración de carbono en el suelo [31].

6.3.4. Uso como biomejorador del suelo.

El biochar se consolida como una enmienda multifuncional para el suelo con alto potencial como biomejorador, esto debido a su capacidad para mejorar la salud biológica del suelo mediante

múltiples mecanismos. Dentro de sus características se encuentra su estructura porosa, la cual proporciona hábitats adecuados para comunidades microbianas, y además actúa como fuente de carbono y nutrientes esenciales para la actividad biológica [32]. Además, el biochar modifica propiedades físicas y químicas del suelo como el pH, la porosidad, la retención de humedad y muchas más, creando un microambiente favorable para el desarrollo y la diversidad de microorganismos beneficiosos [28]. Este efecto se traduce en una mayor capacidad del suelo para reciclar nutrientes, suprimir patógenos, promover asociaciones simbióticas con las raíces y, en consecuencia, mejorar la productividad vegetal. También tiene un rol importante en la inmovilización de contaminantes orgánicos e inorgánicos, reduciendo su biodisponibilidad y toxicidad para los organismos del suelo [33]. No obstante, se reconoce que ciertos tipos de biochar, dependiendo del material de partida y de las condiciones de pirólisis, pueden contener compuestos tóxicos como hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) o elementos traza que podrían afectar negativamente la actividad microbiana [34] [32]. A pesar de ello, la evidencia acumulada indica que, cuando es correctamente formulado y aplicado, el biochar representa una estrategia prometedora para restaurar suelos degradados, mejorar el ciclo biogeoquímico de los nutrientes y potenciar la funcionalidad ecológica del suelo a largo plazo [32].

6.3.5. Efecto del biochar en las propiedades fisicoquímicas del suelo.

6.3.5.1. Proporciones de enmiendas suelo – biochar y tiempos de muestreo

La elección de la proporción ideal es criterio del investigador, pero se encuentra una tendencia en estudios recientes entre rangos del 1 – 5 (%P/P), y otros entre 4 – 12% (P/P) [35], por lo que el estudio e implicación de las proporciones también estará relacionado al tipo de biomasa de la cual procede el biochar y las condiciones de pirólisis en las cuales fue producido. Así mismo, se debe tener en cuenta los tiempos de muestreo los cuales serán fundamentales para evidenciar el comportamiento o influencia del biochar en las propiedades fisicoquímicas y agronómicas del suelo y del desarrollo de la plántula [14]. Estos dependerán del ciclo de cultivo de la especie de interés. En el caso del fríjol Uribe Rosado, clasificado como un cultivo de ciclo corto, el período hasta la cosecha es de aproximadamente entre 50 y 65 días, lo que equivale a cerca de dos meses [22]. En función con esta duración, es metodológicamente adecuado establecer un esquema de muestreo

quincenal, permitiendo así obtener un total de cuatro mediciones representativas para evaluar el efecto del biochar sobre el suelo a lo largo del ciclo del cultivo

6.3.5.2. Comportamiento de las propiedades fisicoquímicas del suelo en mezclas suelo-biochar y agronómicas.

Como se expresó en el apartado anterior, los tiempos de muestreo son importantes para determinar las tasas de cambios, tendencias y análisis estadísticos frente al comportamiento de las variables fisicoquímicas y agronómicas en presencia del biochar aplicado. Por consiguiente, es de importancia entender cuál es el efecto esperado en las variables indicadas en apartados anteriores.

La adición de biochar al suelo puede modificar significativamente diversas propiedades químicas, como el pH, el carbono orgánico total (COT), la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la eficiencia en el uso de fertilizantes. Estos efectos varían según el tipo de suelo y el biochar aplicado. Por ejemplo, en suelos ácidos como los ferralíticos, el biochar con pH elevado puede aumentar el pH del suelo, incrementar los niveles de calcio intercambiable y disminuir la toxicidad por aluminio. También se ha reportado una mejora en la retención de nutrientes y la capacidad de agregación del suelo, atribuida a la carga superficial negativa del biochar y a los grupos funcionales presentes (siloxano, hidroxilos, carboxilos, entre otros). Sin embargo, algunos estudios han evidenciado que el efecto sobre la CIC puede ser limitado o nulo, dependiendo del tipo de biomasa, las condiciones de pirólisis y la textura del suelo. Además, características como la capacidad de sorción, la capacidad de retención de agua y la influencia sobre la biota microbiana están relacionadas con el área superficial específica del biochar, lo cual refuerza la importancia del tipo de materia prima utilizada y las condiciones de producción [25].

El biochar posee dentro de su composición heterogénea, diversidad de minerales necesarios para el suelo (N, P, K, Ca, Mg, S), los cuales al adicionarse pueden mejorar el carbono orgánico del suelo, influyendo directamente en la carga o materia orgánica disponible del suelo. Por consiguiente, lo anterior debería reflejar un aumento en la productividad de la biomasa de la especie que se esté cultivando.

6.3.6. Tecnologías de producción de biochar

6.3.6.1. Gasificación (Tiro ascendente)

La gasificación de tiro ascendente, conocida como *top-lit up-draft* (TLUD), es un proceso de conversión de biomasa sólida en gas de síntesis (H_2 y CO) mediante una transformación termoquímica del material. No obstante, cuando este tipo de sistema no alcanza condiciones de temperatura requeridas para llegar a un proceso de gasificación (temperaturas mayores a $700\text{ }^{\circ}C$), como sucede para el caso del microgasificador utilizado en este trabajo, el proceso termoquímico se orienta o favorece la formación de biochar mediante un proceso autotérmico de pirólisis del material biomásico.

De este modo, el principio de este tipo de procesos de transformación está basado en la formación de un frente de llama o frente pirolítico, el cual desciende por medio del consumo del lecho de la biomasa. Durante su avance se liberan gases volátiles y el material sólido restante experimenta una descomposición térmica de su estructura lignocelulósica, dando lugar a la formación de una fracción carbonosa o biochar a partir del mismo. A medida que este frente de llama desciende progresivamente en el microgasificador, la zona en la que se encuentra el lecho de biomasa queda sometida a altas temperaturas y a una disponibilidad limitada de oxígeno, lo que, en este caso debido a las condiciones mencionadas, conlleva a la formación del producto carbonoso mediante un proceso de pirólisis. Así mismo, la velocidad de avance del frente pirolítico dependerá de factores como la densidad del material de ignición, el suministro de aire y el diseño del dispositivo, pudiendo avanzar entre 1 a 20 mm por minuto [36]. Un microgasificador TLUD está diseñado para ser lo suficientemente compacto como para utilizarse en actividades de uso diario como cocinar alimentos básicos. Sus componentes principales incluyen un recipiente para el combustible, entradas de aire primario y secundario, una cámara de combustión y, en algunos casos, una chimenea para mejorar el tiro natural. El diseño puede realizarse con materiales de bajo costo e inclusive reciclables, como latas de aluminio de alimentos enlatado, lo cual permite su fácil elaboración y reproducibilidad. El aire primario fluye desde la base, atravesando la cama fija o lecho de biomasa, mientras que el aire secundario se introduce justo encima del frente de pirólisis para lograr una oxidación completa de los gases formados. El encendido desde arriba facilita mantener el calor cerca de la zona de cocción, en el caso de que se use en la preparación de

alimentos. Algunos modelos incorporan ventiladores para forzar el aire y aumentar la eficiencia, y otros tienen sistemas aislantes para conservar el calor. La altura del recipiente determina la duración del proceso, mientras que su diámetro influye en la potencia térmica disponible para cocinar [36]. La Fig. 3 presenta un esquema explicativo de las partes y procesos que se llevan a cabo durante la operación de este equipo.

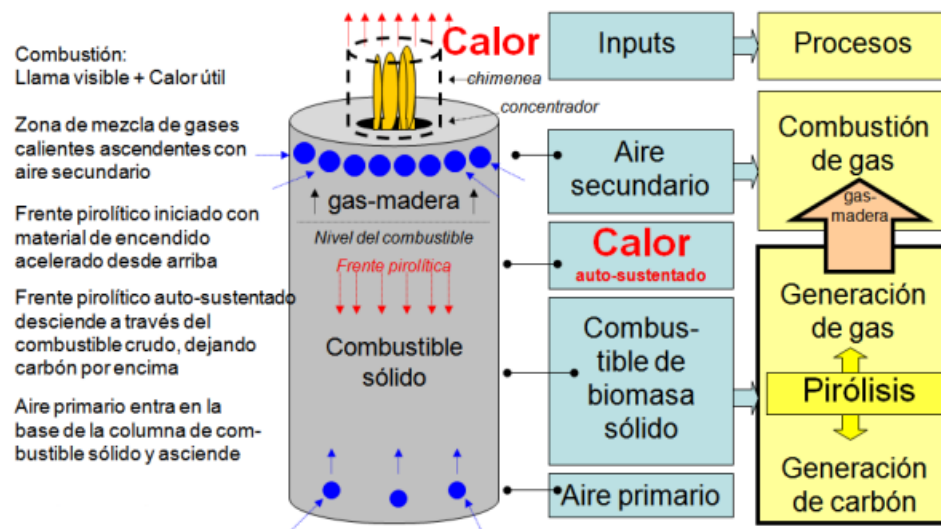


Fig 4. Esquema general del micro-gasificador TLUD. Tomado de [36].

VII. METODOLOGÍA

Con el fin de introducir y facilitar la comprensión del esquema metodológico aplicado, se presenta la Fig. 4, en la cual se describe mediante una línea secuencial los pasos metodológicos llevados a cabo en el marco de esta investigación. Por consiguiente, el esquema se desarrolla inicialmente desde la preparación, síntesis y caracterización del biochar a partir de cáscara de café y culmina con la evaluación del efecto biomejorador del mismo, siendo validado estadísticamente bajo análisis estadísticos.

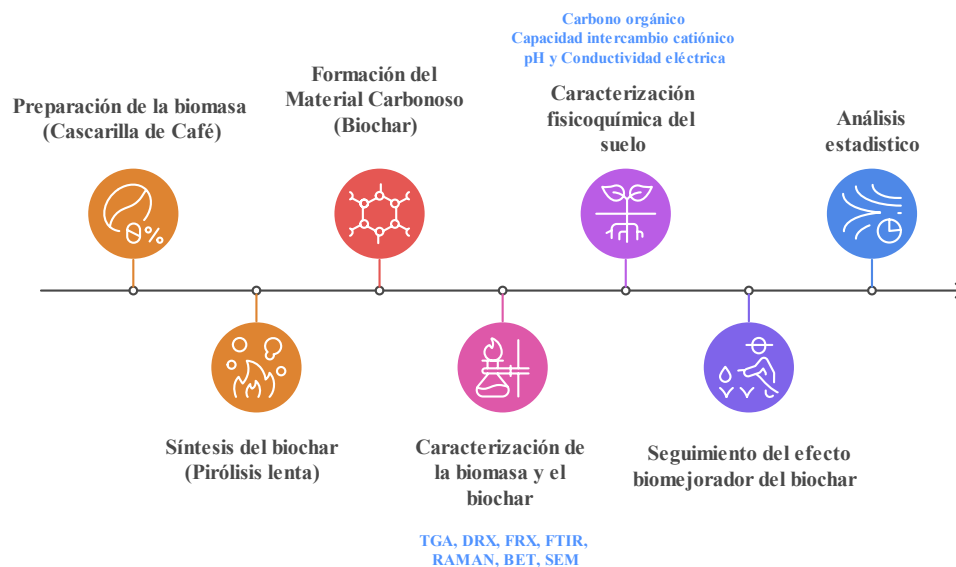


Fig 5. Esquema secuencial de la metodología desarrollada

7.1. Revisión y búsqueda de literatura

Se realizó una búsqueda constante de literatura a lo largo del proyecto, la cual estuvo enfocada en la producción, caracterización y utilidad del biochar, esencialmente a partir de cáscara de café y haciendo énfasis en la aplicabilidad como biomejorador de suelo. De este modo, se revisaron tesis, artículos y documentos técnicos relacionados con el uso del biochar en la agricultura, asociado a la influencia o efecto sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como en las proporciones óptimas de aplicación en cultivos. Por consiguiente, la información recolectada fue de utilidad para establecer la metodología idónea frente a los porcentajes de tratamiento (%P/P) del biochar y el suelo, para evaluar así el efecto de este en un periodo de tiempo de 60 días.

7.2. Obtención de biochar mediante proceso de pirólisis

La obtención del biochar (material carbonoso) a partir de cáscara de café se llevó a cabo utilizando un microgasificador autotérmico de tiro ascendente, con una capacidad aproximada de 200 gramos de biomasa por carga. La biomasa residual se pretrató por medio de secado por varios días a una temperatura entre los 35 °C y 40 °C. Una vez lista la biomasa residual, ésta se carga al reactor hasta completar la capacidad del recipiente que contiene este material, posteriormente se carga algo de ramas secas o tallos para facilitar el proceso de ignición. Cuando se ha dado inicio al proceso de ignición, se forma el frente pirolítico que avanza carbonizando la cáscara de café a una temperatura máxima 550 °C, y una rampa de calentamiento de 1°C/min. El proceso se lleva a cabo hasta transformar todo el lecho de la biomasa cargado, este proceso es de aproximadamente 8 horas. Una vez finalizada la prueba, se seleccionan, separan y se pesan las fracciones obtenidas (biochar, ceniza y biomasa no quemada) para establecer el rendimiento de la reacción.

El reactor utilizado en este experimento, consistió en un microgasificador de tiro ascendente construido con material reciclable. La Fig. 5, presenta una foto del montaje experimental, y el Anexo A, entrega detalles de las dimensiones y partes de este reactor.



Fig 6. Síntesis de biochar - Montaje experimental de recolección de datos de temperatura

7.2.1. Caracterización de la biomasa de cáscara de café y su biochar

7.2.1.1. Análisis próximo

Se determinó el contenido de humedad, elementos volátiles y ceniza mediante un análisis termogravimétrico (TGA) para la cáscara de café y el biochar obtenido a partir de esta. El análisis se llevó a cabo en un equipo Discovery TGA 5500 (TA Instruments). Se emplearon aproximadamente 20 mg de muestra, con una velocidad de calentamiento de 5 °C/min, desde una temperatura ambiente hasta 900 °C bajo un flujo constante de N₂ de 20 mL/min. En 900 °C se realiza un cambio de atmosfera hacia una mezcla de aire con el fin de oxidar el material y determinar la fracción de ceniza, la rampa de calentamiento para esta etapa fue la misma que la anterior.

7.2.1.2. Difracción de rayos X (DRX)

Mediante difracción de rayos X se determinó la estructura cristalina del material carbonoso (biochar). Los ensayos se realizaron en Difractómetro de Rayos X (DRX) Malvern-PANalytical Modelo Empyrean 2012, con detector Pixel 3D y fuente de Cu ($\lambda = 1,541 \text{ \AA}$) a 45kV y 40mA; Goniómetro: Omega/2 theta y configuración de la plataforma: Spinner con rotación de 4s. Para las medidas estándar el paso fue de 0,05° y un tiempo por paso de 50s.

7.2.1.3. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Los ensayos para determinar la composición elemental (Fracción inorgánica) del material carbonoso se realizaron mediante el análisis de fluorescencia de rayos X (FRX). Los análisis se realizaron en un espectrómetro de Fluorescencia de rayos X (FRX) marca Malvern-PANalytical Modelo Zetium mineral edition de 4kW. Las muestras se prepararon por perlado y se analizaron en la aplicación cuantitativa WROXI. La muestra analizada fue previamente perlada y el resultado reportado esta expresado en base calcinada.

7.2.1.4. Espectroscopía IR (ATR-IR)

Para identificar las bandas características de vibración asociadas a grupos funcionales en la estructura de la cáscara de café y del biochar a partir de esta, se realizó el análisis espectroscópico ATR-IR. El análisis espectroscópico se realizó mediante un equipo ATR-IR Lyza 7000, utilizando un módulo multipropósito con celda IRIS de diamante. Las mediciones se ejecutaron empleando un espectro de absorbancia con una resolución espectral de 4 cm^{-1} y un rango de análisis entre 350 y 6000 cm^{-1} . Para cada muestra se efectuaron 48 escaneos y se aplicó una función de apodización Blackman–Harris, garantizando la calidad del espectro. Previo a cada medición se registró un espectro de fondo válido, utilizado para la corrección de la señal.

7.2.1.5. Propiedades texturales – Fisisorción de N_2

Para la determinación y el análisis del área superficial de los materiales carbonosos, se realizaron análisis de adsorción mediante isothermas de adsorción-desorción de N_2 en un sortómetro ASAP 2020 plus de Micromeritics. Aproximadamente 200 mg de muestra fueron desgasificados a bajo condiciones de vacío por 12 horas a $120\text{ }^\circ\text{C}$.

7.2.1.6. Análisis Raman

La espectroscopía Raman se utilizó para caracterizar la estructura carbonosa del biochar, identificando defectos, su aromaticidad y el grado de ordenamiento gráfico del mismo.

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un equipo LabRam Horiba Jobin Yvon mediante un láser de 632.81 nm . Para la adquisición del espectro se implementó un lente objetivo de 50X permitiendo la focalización del haz y se empleó un filtro D 0,6. Cada espectro se registró con un tiempo de exposición de 10 s, mientras que el registro espectral se efectuó en un rango de 200 a 2000 cm^{-1} , donde se encuentran las bandas características de los materiales carbonosos.

7.2.1.7. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido se implementó para determinar la morfología estructural del material carbonoso (biochar), permitiendo evaluar la textura superficial y el desarrollo del sistema poroso generado durante la pirólisis. El análisis fue realizado mediante un microscopio electrónico JEOL JSM 6490 LV. Las muestras fueron recubiertas con oro mediante deposición durante aproximadamente 600 segundos, obteniendo una capa cercana a los 20 nm de espesor.

Para la determinación del diámetro de poro del biochar, las micrografías obtenidas por SEM fueron analizadas mediante el software ImageJ. Previamente, cada imagen fue calibrada utilizando la escala de la micrografía, lo que permitió convertir las mediciones en unidades reales (μm). Tras la calibración, se determinó manualmente el diámetro de cada poro según la imagen, y se empleó el histograma de distribución para determinar el diámetro promedio de los poros visibles en la superficie del material carbonoso.

7.3. Evaluación de los efectos del biochar en el suelo de estudio

7.3.1. Caracterización fisicoquímica del suelo de estudio de la subregión del suroeste antioqueño.

Se seleccionó un suelo agrícola representativo de la subregión del suroeste antioqueño, para el cual se tomaron muestras compuestas para su análisis. De este modo, se determinaron propiedades fisicoquímicas como pH y conductividad eléctrica basadas en las normativas NTC 5264 y 5596 respectivamente, materia y carbono orgánicos mediante el método Walkley- Black, contenido de macro - micronutrientes utilizando Fluorescencia de rayos X y capacidad de intercambio catiónico (CIC) mediante el método de Acetato de amonio.

Nota: El procedimiento realizado basado en cada normativa se presenta en el anexo B.

7.3.2. Ensayos con cultivos indoor (Condiciones controladas).

Se estableció un diseño experimental completamente al azar con 3 tratamientos de dosis de biochar (1%, 3% y 5% respecto al peso del suelo) y un control (0% biochar), aplicados al suelo previamente

caracterizado. El suelo objetivo utilizado para cada tratamiento tuvo un proceso de autoclavado o esterilización para garantizar la eliminación de patógenos en su matriz. Cada tratamiento contó con 5 réplicas y el cultivo elegido será frijol Uribe Rosado, sembrado en macetas de igual capacidad de carga (200 gramos). La etapa de la germinación de las semillas fue correspondiente a 7 días, una vez cumplido el tiempo se trasplantaron las plántulas a las macetas. El seguimiento del cultivo se llevó a cabo mediante una cámara climática de 720 L, bajo condiciones controladas de luz (16 horas luz – 8 oscuridad), riego (30 mL/cada 2 días), temperatura (26 °C) y humedad relativa (70%) durante 2 meses.

Nota: Los ensayos con plántulas en la cámara climática se muestran en los Anexos C y D

Las mezclas suelo-biochar empleadas se nombraron con la nomenclatura que describe la tabla 1:

TABLA I
NOMENCLATURA DE LAS MEZCLAS SUELO - BIOCHAR

Muestra	Nomenclatura
Mezcla suelo – biochar 1%	Tratamiento 1%
Muestra suelo – biochar 3%	Tratamiento 3%
Muestra suelo – biochar 5%	Tratamiento 5%

7.3.3. Muestreo de datos y variables agronómicas

Se realizó un muestro de suelo de aproximadamente 20 gramos para cada experimento quincenalmente hasta cumplir los 2 meses del ciclo del cultivo para el análisis posterior de la influencia del biochar en las propiedades fisicoquímicas. Paralelamente, se llevó a cabo el registro semanal de las propiedades agronómicas de la plántula, tales como: Diámetro de tallo de la plántula, altura de la plántula, numero de hojas y cantidad de flores y vainas, hasta cumplir los 2 meses del ciclo de cultivo.

7.3.3.1. Tasas de crecimiento relativo (TCR)

El seguimiento de las variables agronómicas se realizó haciendo uso de las tasas de crecimiento relativo (TCR), las cuales determinan el crecimiento de una variable por unidad de tiempo [37] [38] . Por consiguiente, se sigue la siguiente ecuación para su cálculo:

Ecuación 1:

$$TCR = \frac{\ln(X_f) - \ln(X_i)}{t}$$

Donde:

- X_f = Valor final de la variable medida (Altura de plántula, Diámetro de tallo, Numero de horas) en el tiempo t
- X_i = Valor inicial de la variable medida (Altura de plántula, Diámetro de tallo, Numero de horas) en el tiempo t
- t = Tiempo transcurrido entre las 2 mediciones (Días o semanas)

7.3.4. Comparación de las mezclas suelo – biochar en el tiempo

Se compararon los cambios en las propiedades del suelo en función del tiempo y del tratamiento aplicado. Para esto, se hizo uso de gráficos de barras, líneas de tendencia y se realizó un análisis estadístico para comparar y establecer el efecto estadístico significativo del biochar en el suelo.

7.3.4.1. Análisis estadístico

Para evaluar el efecto de los tratamientos con biochar sobre las variables fisicoquímicas y agronómicas en el cultivo de frijol Uribe Rosado, se aplicaron análisis estadísticos conforme al cumplimiento de los supuestos de independencia, normalidad y homogeneidad de varianzas. Las variables de respuesta fisicoquímicas (conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico (CO), capacidad de intercambio (CI) y pH) y agronómicas (altura de plántula (AP), numero de hojas (NH) y diámetro de tallo (DT)) fueron evaluadas mediante análisis de varianza ANOVA. En el caso de las variables CO y CE, fue necesario aplicar una transformación de logaritmo natural (Ln) para aproximar la distribución de los datos a la normalidad y cumplir con los supuestos del análisis paramétrico. Las variables agronómicas NH y DT no cumplieron normalidad (según la prueba de Lilliefors (Kolmogórov-Smirnov modificada), por lo que fueron analizadas por medio de la prueba no paramétrica de Krukal-Wallis.

En los casos con diferencias significativas ($p < 0,05$), se realizaron análisis post hoc: la prueba de Tukey para comparaciones múltiples en ANOVA, y comparaciones por pares mediante Wilcoxon ajustado (pairwise Wilcoxon) para datos no paramétricos. Los análisis se realizaron con un nivel de significancia de α de 0,05. Se empleó el software RStudio versión 2025.09. Todos los experimentos se realizaron con cinco réplicas.

VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1. Pirólisis de cáscara de café

La tabla 2 presenta la composición en %P/P obtenidos para los productos del proceso de pirólisis de la biomasa residual de café, dentro de los que se encuentra el producto de interés que es el biochar. Los datos expresados corresponden al promedio obtenido de los rendimientos para 5 pruebas o síntesis de biochar, para una carga del reactor con aproximadamente 150 gramos de cáscara de café.



Fig 7. A) Cáscara de café, B) Biochar a partir de cáscara de café

TABLA II
RENDIMIENTOS OBTENIDOS DE LA SÍNTESIS DEL BIOCAHR

Fracción obtenida	Contenido (%)
Fracción carbonosa (Biochar)	$31,9 \pm 1,4$
Material no pirolizado	$10,5 \pm 2,3$
Ceniza	$3,0 \pm 0,1$
Materia volátil*	54,4

*Nota: El porcentaje de materia volátil se calcula realizando una diferencia respecto a 100%.

El rendimiento obtenido para la fracción carbonosa (biochar) corresponde a un 32% aproximadamente, el cual representa un valor comparable en el rango de rendimientos para la

cáscara de café encontrados para valores similares de temperatura de pirólisis intermedias, tal como se reporta en la tabla 3.

TABLA III
RENDIMIENTOS COMPARATIVOS DE BIOCHAR MEDIANTE PIRÓLISIS DE CÁSCARA DE CAFÉ

Referencia	Temperatura (°C)	Rendimiento de biochar (%)
<i>Este trabajo</i>	550*	31,9
[39]	450	34,7
[40]	600	33,0
[41]	500	35,0
[42]	500	31,5

*Nota: El valor presentado corresponde a un rango de temperatura hasta ese valor como máximo

8.2. Caracterización termogravimétrica de la biomasa residual (Cáscara de café) y su material carbonoso

8.2.1. Análisis próximo de la biomasa residual (Cáscara de café) y su material carbonoso

Los resultados del análisis termogravimétrico de la cáscara de café y de su biochar se presentan en la Fig. 7, en ésta se observa el cambio en el peso de las muestras respecto a la temperatura, cuando esta varía desde 20 °C hasta 1000 °C. Estos cambios sugieren los cambios en la composición de la muestra debido al proceso térmico al cual se someten. De este modo, se identifican 3 zonas características asociadas a picos de descomposición térmica de los materiales. Una primera etapa correspondiente a la pérdida de humedad, estimada entre el rango de la temperatura inicial hasta 110 °C (región azul en Fig. 7), una segunda etapa que corresponde a la volatilización o perdida del material volátil presente en las estructuras, asociada al rango de 110 °C – 650 °C (región roja en Fig. 7) y la última etapa corresponde al cambio de atmosfera de N₂ a aire, cambio que se da a 650 °C en la región verde del termograma que culmina en 1000 °C, lo cual da paso a la formación de ceniza, y por consecuencia al carbono fijo alrededor de los 900 °C (región gris) [43].

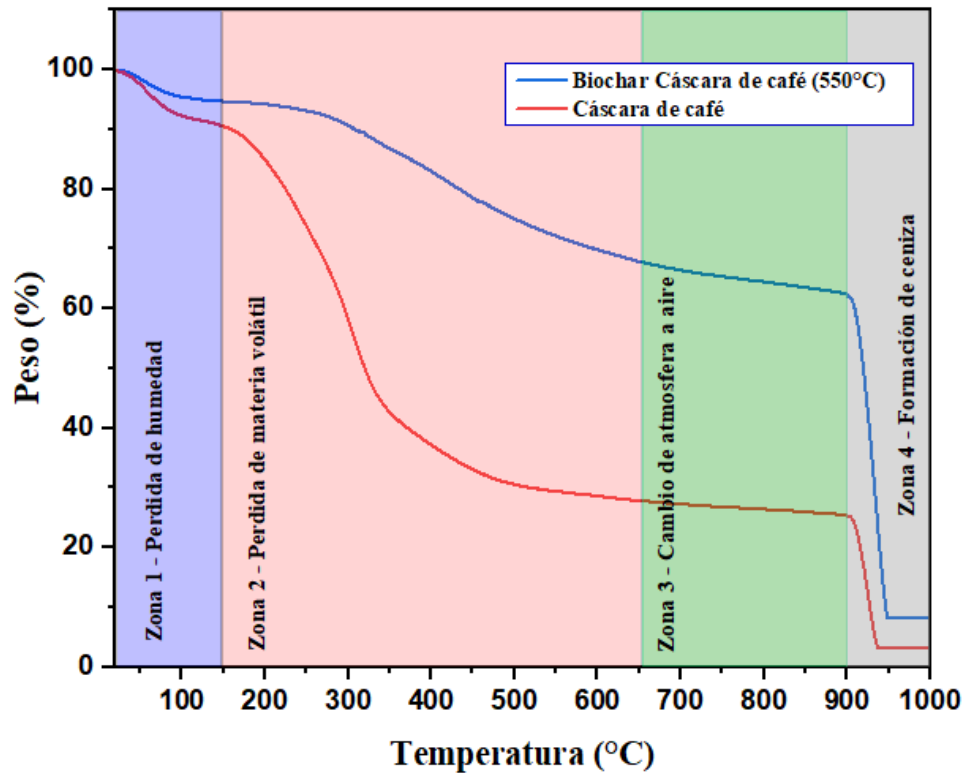


Fig 8. Termogramas comparativos entre cáscara de café y su material carbonoso

La pérdida o disminución en el peso de la cáscara de café y de su biochar desde la temperatura inicial hasta 110 °C, se asocia a la pérdida de humedad del material, siendo correspondientes a 7,9% y 4,6% respectivamente. La segunda etapa comprendida entre 110 °C – 650 °C (Etapa de volatilización) implica la descomposición de la celulosa, hemicelulosa y lignina presente en el material, las cuales son liberadas como materia o hidrocarburos volátiles [44]. Para esta etapa, se obtienen valores de pérdidas de peso de 64% y 27,3% para la cáscara de café y el biochar respectivamente. Los cambios en los eventos de descomposición pueden dar un indicio de la estabilidad térmica del biochar si se compara frente a su biomasa, lo cual se refleja en una menor pérdida de composición en la etapa asociada a la volatilización, relacionados con el componente volátil del mismo, lo cual es producto del proceso de pirólisis por el que fue sintetizado [45].

Los resultados del análisis termogravimétrico de la biomasa lignocelulósica y su biochar se presentan en la tabla 4 y Fig. 8. Teniendo en cuenta los rangos establecidos para los eventos de descomposición térmica, se observa que la biomasa presenta un mayor contenido de material volátil si se compara con el material carbonoso, siendo una correlación esperada teniendo en cuenta el termograma de ambos materiales. Así mismo, el contenido de carbono fijo aumenta

considerablemente en el material carbonoso frente a la biomasa inicial, lo cual comprueba la formación de una estructura más carbonosa y aromática con una menor presencia de materia volátil.

TABLA IV
ANÁLISIS PROXIMO DE LA CÁSCARA DE CAFÉ Y EL BIOCHAR OBTENIDO

Material	Humedad (% P/P)	Material volátil (% P/P)	Ceniza (% P/P)	Carbón fijo (% P/P)
Cáscara de café	7,9	64,0	3,7	24,3
Biochar a partir de cáscara de café	4,6	27,3	8,4	59,6

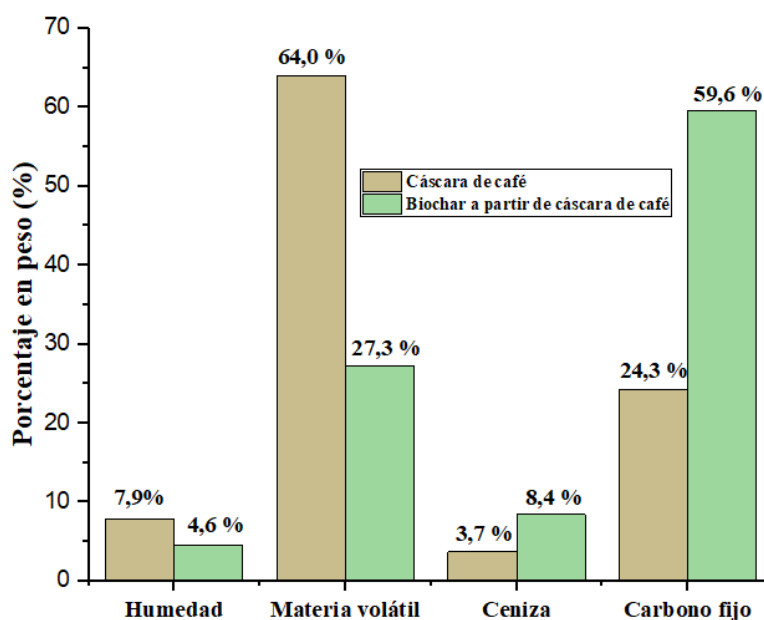


Fig 9. Comparación de los resultados del análisis próximo de la cáscara de cafe y su biochar

8.3. Caracterización textural del material carbonoso

8.3.1. Fisisorción de N₂ (Método BET)

Generalmente al realizarse un proceso pirólisis y dependiendo de la temperatura del proceso, se esperan valores de área superficial relativamente altos, entre rangos estimados de 160 – 370 m²/g como los encontrados para diversas biomásas provenientes de maderas. A su vez, es posible encontrar valores más bajos, entre aproximadamente 5 – 150 m²/g para pajas o cáscaras de algunas

frutas, siendo relativamente más bajas en comparación con biomasa leñosas [46]. Para este caso en específico, el biochar producido a partir de la cáscara de café se encuentra dentro de la denominación de cáscaras, los cuales reportan valores de área superficial por debajo de la media comparadas con otro tipo de biomasa [46]. Lo cual concuerda con el valor de área superficial de $0,711 \text{ m}^2/\text{g}$ encontrado para el biochar obtenido en este trabajo, así como con los valores de área superficial para biochar a partir de cáscara de café reportado por investigadores como Limbergen T, Roegiers IH, et al y Muñoz S, Hernandez L, et al. [47] [3], $2,11 \text{ m}^2/\text{g}$ y $0,88 \text{ m}^2/\text{g}$ respectivamente.

El comportamiento de este tipo de materiales en términos del área superficial puede sugerir la formación de una estructura carbonosa amorfa, sin la presencia de una distribución de tamaño de poro ordenada, tal como lo reporta [48], en el cual se obtiene un biochar a 350°C con un área superficial de $0,43 \text{ m}^2/\text{g}$. Lo anterior puede sugerir que, en este tipo de materiales carbonosos sintetizados a bajas temperaturas de pirólisis, se favorezcan propiedades como la densidad de grupos funcionales o el contenido elemental del mismo, en vez de la formación de área superficial.

8.3.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

En la Fig. 9 se presentan las micrografías correspondientes a la cáscara de café, en estas se pueden evidenciar que la cáscara de café está conformada por partículas alargadas con una superficie rugosa y estriada, y en algunos casos conformada por secciones planas.

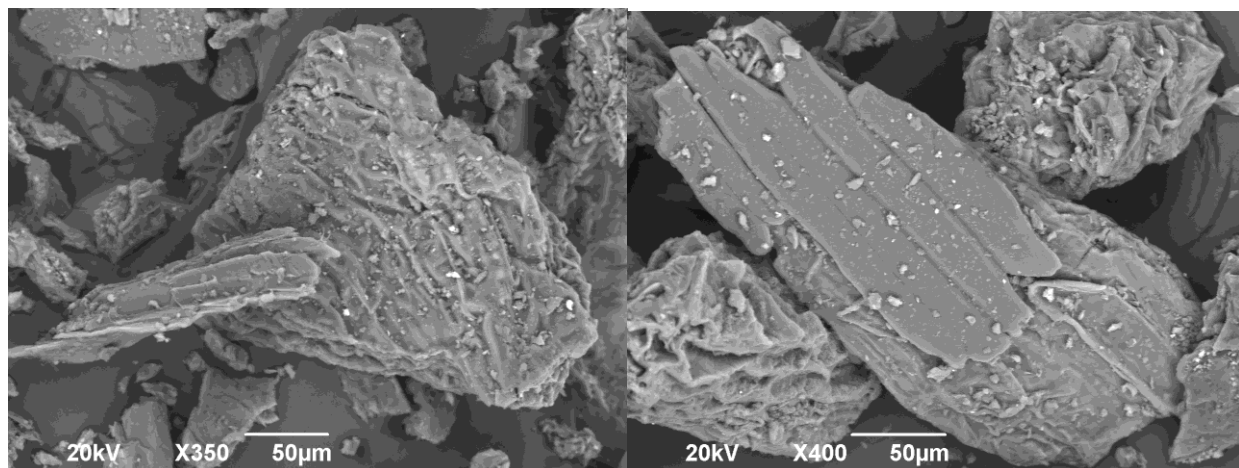


Fig 10. Micrografías SEM - Cáscara de café

En la Fig. 10 se presentan las micrografías para el biochar obtenido. En estas se evidencia el cambio en la estructura morfológica del biochar con respecto a la biomasa original, caracterizada por una estructura porosa y celular debido a la formación de cavidades, posiblemente como consecuencia a la pérdida de material volátil durante el proceso de descomposición térmica al que fue sometida la biomasa de cáscara de café [49]. Estas cavidades si bien pueden ser grandes y alargadas como las de la Fig. 10 A, también pueden ser más finas y densas como los de la Fig. 10 B, siendo esto un indicativo de la heterogeneidad en la distribución de tamaños de poros para el biochar. Adicionalmente, se observan pequeñas partículas brillantes dispersas en la superficie del material, que se debe a los metales que componen la fracción inorgánica del biochar. Como complemento a este análisis, se presenta también las micrografías con mapeo EDS en la Fig. 11, las cuales indican la presencia de elementos como calcio, magnesio, azufre, potasio y calcio.

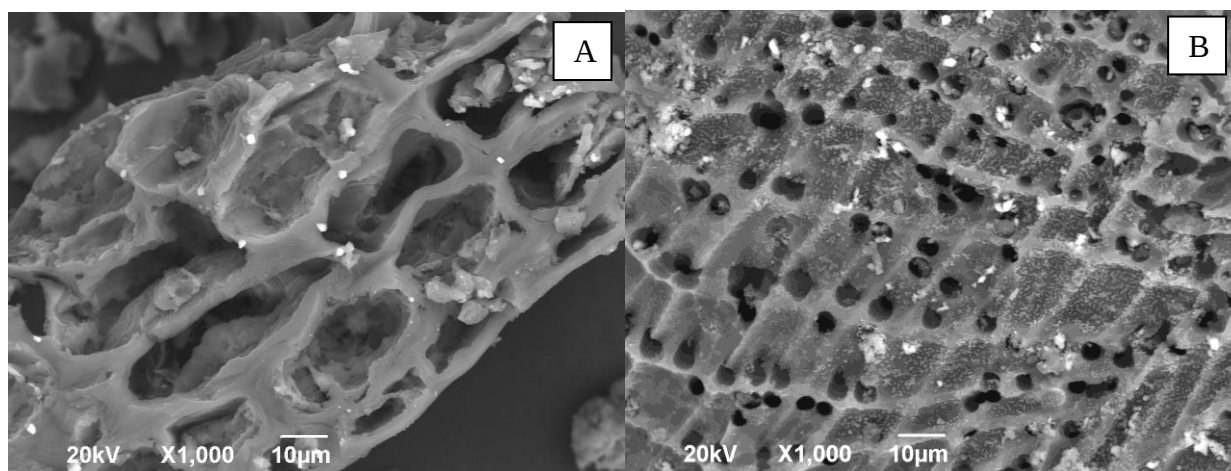


Fig 11. Micrografías SEM - Sistema poroso de biochar a partir de cáscara de café A) Cavidades alargadas B) Cavidades densas

El análisis EDS presentado en la Fig. 11 evidencia la composición superficial de la micrografía presentada en la Fig. 10 (B), donde se resalta la presencia de carbono y oxígeno, lo cual es típico y esperado en materiales carbonosos producidos a temperaturas intermedias de pirólisis. Así mismo, elementos como magnesio (color amarillo verdoso), azufre (color verde), potasio (color rosado) y calcio (color morado) se presentan en la micrografía como puntos brillantes, indicando proporciones significativas de estos elementos. Los resultados anteriores pueden correlacionarse con el análisis de la fracción inorgánica del biochar en el apartado de fluorescencia de rayos X (FRX).

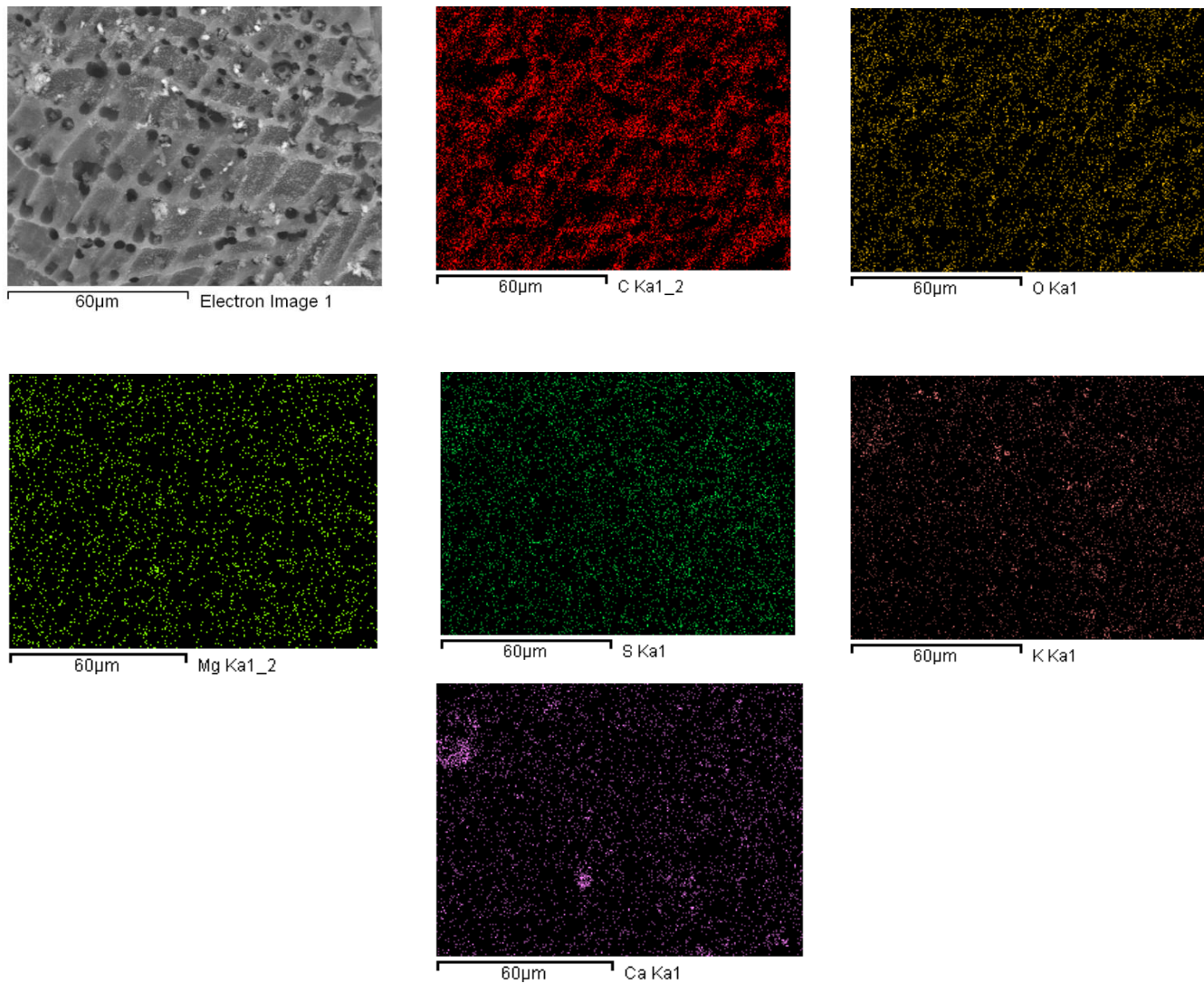


Fig 12. Distribución elemental obtenida por EDS para el biochar

La fig. 12, presenta la distribución de tamaño de poro para el biochar obtenido, a partir de la determinación del diámetro de éstos. El histograma presenta una distribución bimodal en $2,6 \pm 0,93 \mu\text{m}$ y $4,2 \pm 0,93 \mu\text{m}$, así mismo presenta una desviación estándar correspondiente a $0,83 \mu\text{m}$, siendo un indicativo de la heterogeneidad en el tamaño poro, como previamente se había evidenciado en las micrografías del biochar.

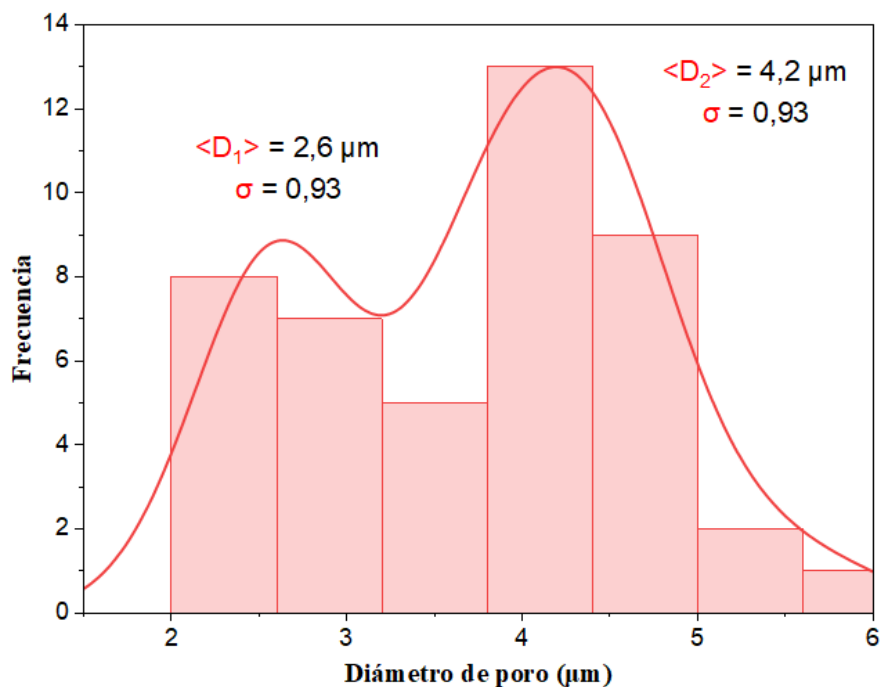


Fig 13. Distribución del diámetro de poro en el biochar de cáscara de café

8.4. Caracterización estructural y espectroscópica del material carbonoso

8.4.1. Difracción de rayos X (DRX)

Los patrones de difracción para 2 muestras de biochar se presentan en la Fig. 13. En esta se evidencia la nomenclatura para ambas muestras, BC-NWTC-01 hace referencia al biochar producido mediante pirolisis sin implementar un lavado con agua desionizada tras finalizar el proceso térmico, mientras que BC-WTC-02 representa el mismo proceso pirolítico, pero con la adición de un lavado con agua desionizada.

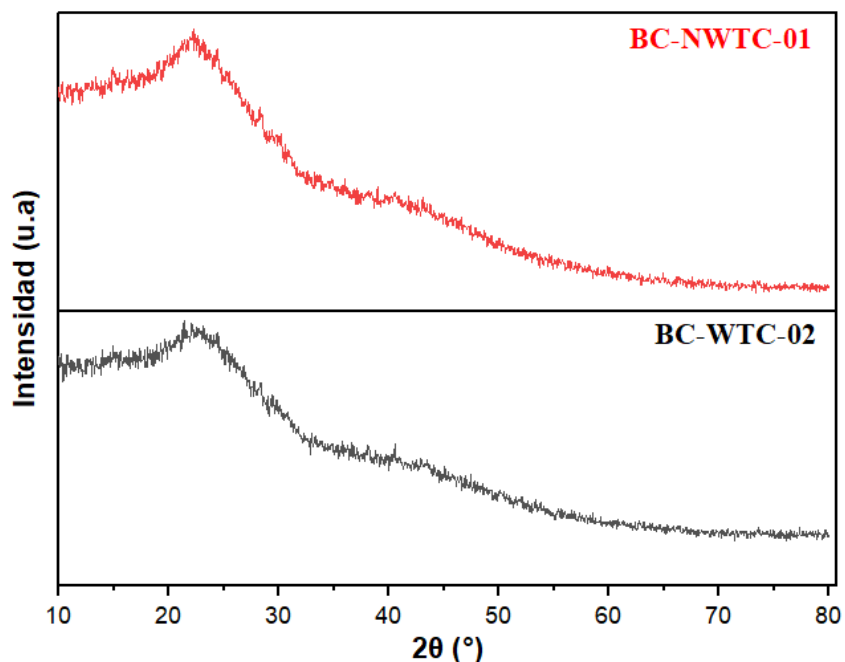


Fig 14. Patrones de difracción de rayos X de las muestras de biochar sintetizado

Los difractogramas presentados, muestran un comportamiento característico para estructuras amorfas, por lo que no se observan picos característicos dentro de todo el rango de 2θ . Así mismo, se observa dentro de la región correspondiente a 10-30 2θ , un pico o valle que está asociado a estructuras amorfas de biochar [50] [51].

8.4.2. Espectroscopía infrarroja (ATR-IR)

El espectro infrarrojo comparativo entre la biomasa residual y su biochar se presenta en la Fig. 14. El pico correspondiente a 3238 cm^{-1} encontrado en la región o banda entre $3600 - 3000\text{ cm}^{-1}$, puede asociarse a la presencia de grupos hidroxilo (O-H) tanto en la estructura del material lignocelulósico como del material carbonoso a partir de esta [44]. El pico encontrado en 1572 cm^{-1} se asocia a las vibraciones de estiramiento características de la estructura conjugada (C=C) presente en el biochar [50], así mismo, estas pueden atribuirse a la presencia de grupos carbonilo (C=O) en la superficie tanto de la biomasa como del material carbonoso, lo cual se complementa con el pico encontrado en 1373 cm^{-1} , asociado a la deformación o flexión de especies O-H siendo pertenecientes de una sección carboxílica (COOH) [52]. Los espectros obtenidos presentan picos en la región de $3000-2900\text{ cm}^{-1}$, siendo los picos aproximadamente en 2924 cm^{-1} y 2917 cm^{-1}

correspondiente a extensiones C-H para la cáscara de café y el material carbonoso respectivamente. La región entre 1250 a 1000 cm^{-1} se asocian a la presencia de estiramientos simétricos y antisimétricos del tipo C-O-C, los cuales son característicos de polisacáridos como la celulosa y hemicelulosa presente en la biomasa [44], [50], [53], [54].

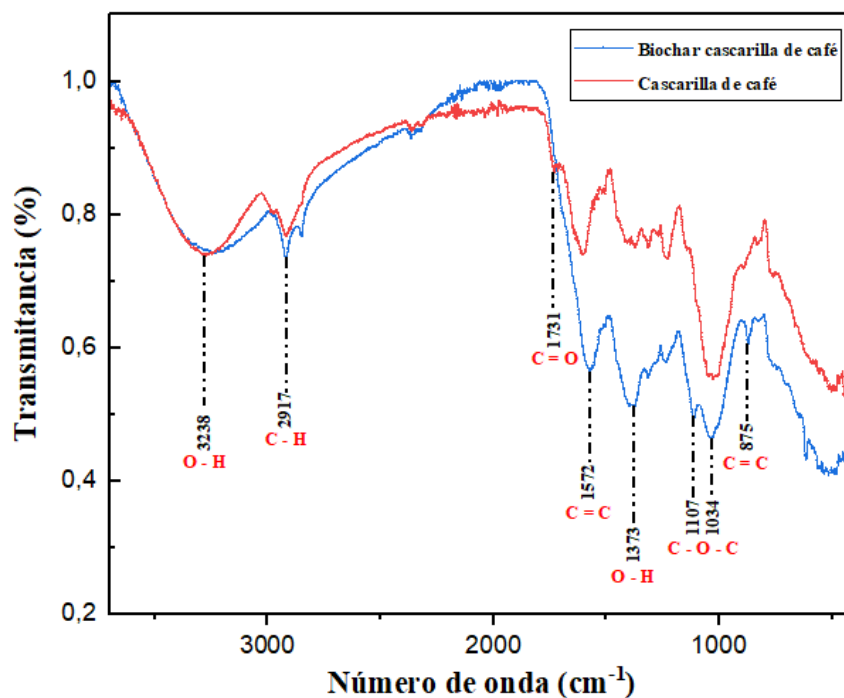


Fig 15. Espectro ATR-IR de la biomasa y el biochar obtenido

La señal encontrada para la biomasa en 1734 cm^{-1} corresponde a la extensión C=O, la cual si se compara respecto al biochar desaparece o presenta una menor intensidad, indicando la posible pérdida de grupos oxigenados por la temperatura de pirólisis, favoreciendo en el biochar una estructura más aromática y carbonosa [55]. El argumento anterior se respalda teniendo en cuenta que el pico en 1572 asociado a la extensión C=C se encuentra más intenso y definido para el biochar, así mismo, el pico encontrado en 871 cm^{-1} se asocia a estiramientos C=C tipo alquenos o estructuras aromáticas [56], el cual se intensifica en la muestra de biochar si se compara con la biomasa.

Por consiguiente, los resultados anteriores estiman que el biochar presenta en su composición una estructura más aromática y/o condensada respecto a su estructura inicial, esto como consecuencia de la descomposición o transformación térmica de la biomasa tras el proceso de pirólisis,

justificándose en la disminución de bandas asociadas a estiramientos de C=O y C-O-C, indicando así la posible formación de estructuras aromáticas carbonosas. No obstante, el biochar mantiene la presencia de grupos funcionales oxigenados (OH, COOH, COC) en su estructura, lo que confiere una densidad de carga superficial al material que puede favorecer otro tipo de interacciones.

8.4.3. Espectroscopía RAMAN

La espectroscopía Raman se empleó para evaluar el grado de orden estructural (Grado de grafitización) del material carbonoso o biochar obtenido a partir de cáscara de café. La Fig. 15 presenta el espectro Raman para el biochar, en el cual se logran identificar 2 señales características de materiales carbonosos, la primera correspondiente a la banda D en 1353 cm^{-1} y la siguiente asociada a la banda G en 1573 cm^{-1} . La banda D se asocia a defectos en la estructura carbonosa del biochar, usualmente atribuido a la vibración del carbono con hibridación sp^3 , siendo entendido a su vez como una medida del “desorden” del material, mientras que la banda G está asociada a la vibración de enlaces C=C con hibridación sp^2 o al componente grafitico del material carbonoso [41], [42], [49].

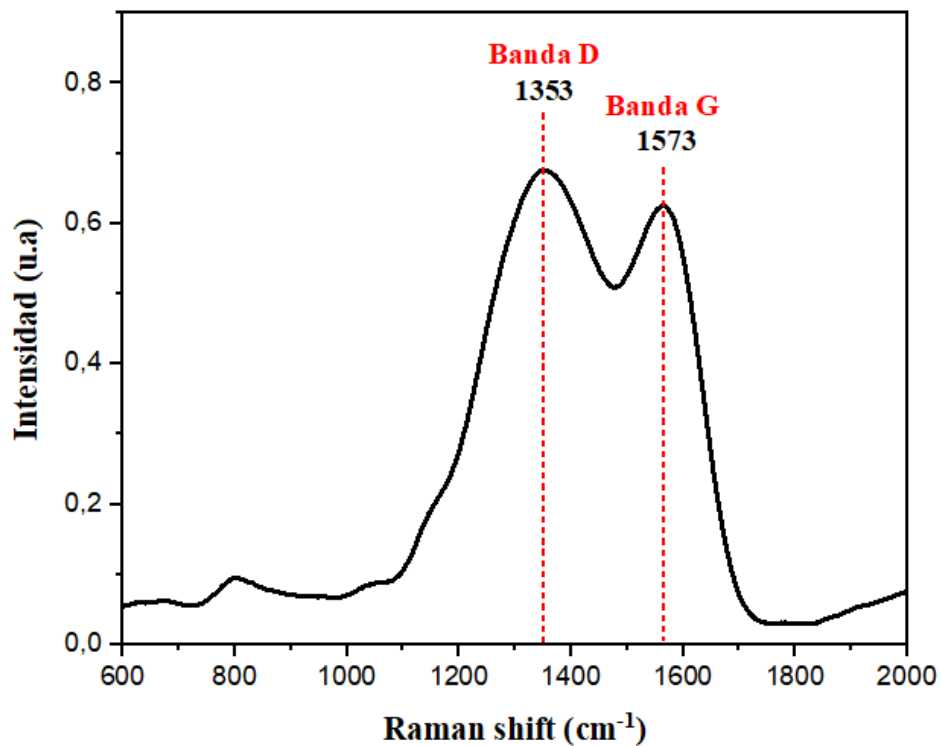


Fig 16. Espectro Raman del biochar producido a partir de cáscara de café

Con base a lo anterior, para estimar el grado de grafitización del biochar se emplea la relación I_D/I_G , la cual da un indicio de la estructura del material carbonoso en términos de lo mencionado anteriormente. En este caso el valor para I_D/I_G corresponde a 1,26, lo cual concuerda con lo presentado en la Fig. 15, siendo el pico de la banda D el que presenta una mayor intensidad frente al de la banda G, indicando mayor proporción de estructuras carbonosas con defectos estructurales o de carbono con hibridación sp^3 , asociado a una estructura principalmente amorfa. Así mismo, la predominancia de este tipo de estructuras sugiere la presencia de materia volátil en la composición del biochar [57], lo cual puede asociarse a una temperatura de pirólisis baja o intermedia como lo es el caso de este material carbonoso (550 °C).

8.5. Fluorescencia de rayos (FRX)

En la tabla 6, se presenta la composición de la fracción inorgánica del material carbonoso, siendo ésta presentada en sus formas de óxidos. Se resaltan los contenidos elevados de K, Ca, P, S y Mg, siendo macronutrientes K, Ca y P, quienes constituyen el 80% de la composición de esta fracción inorgánica. Los contenidos de macro y micronutrientes encontrados en el biochar, sugieren la posible utilización de este como enmienda o biomejorador del suelo.

TABLA V
ANÁLISIS FRX DEL BIOCHAR Y SU CENIZA

Elemento	Compuesto	Ceniza	Biochar
		Parámetro	Composición (%) W/W
Potasio	K ₂ O	56,1	57,1
Calcio	CaO	17,2	15,0
Fósforo	P ₂ O ₅	7,3	8,4
Azufre	SO ₃	6,7	6,7
Magnesio	MgO	4,5	6,0
Sodio	Na ₂ O	0,43	1,9
Zinc	ZnO	0,08	0,1
Hierro	Fe ₂ O ₃	0,45	1,0
Manganeso	Mn ₃ O ₄	0,11	0,2

La composición elemental del biochar y la ceniza obtenida tras el proceso de pirólisis de biomasa, evidencia una considerable proporción de macro y micronutrientes, lo cual lo consolida potencialmente como una fuente de nutrientes para un cultivo determinado. Así mismo, la presencia de elementos como P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn sugieren que el biochar puede aumentar y mejorar el ciclo de nutrientes entre el suelo y el cultivo dada su capacidad para liberar fertilizantes vitales en el tiempo [58].

8.6. Efecto biomejorador del biochar

En esta sección del análisis se encontrará el registro temporal para cada variable fisicoquímica: Carbono orgánico del suelo (COS), capacidad de intercambio catiónico (CIC), pH y conductividad eléctrica (CE). Así mismo, se reporta el seguimiento temporal a las variables agronómicas: Altura de plántula, diámetro de tallo, número de hojas, y productividad de plántula. El análisis comprende los tratamientos de 1%, 3%, y 5%, evaluados durante los 2 meses del ciclo de cultivo del frijol Uribe Rosado. De este modo, esta estructura permite determinar la influencia de cada tratamiento sobre el comportamiento de las plántulas, para así establecer el efecto biomejorador del biochar sobre el sistema del cultivo.

8.6.1. Comportamientos variables fisicoquímicas

8.6.1.1. Carbono orgánico del suelo (COS)

El carbono orgánico del suelo (COS) representa una medida de la materia orgánica aprovechable que hay en el mismo, de este modo, los materiales carbonosos como el biochar, funcionan como un suministro de carbono, el cual cuando se adiciona a un suelo representa un aporte de carbono recalcitrante y lábil [59]. La Fig. 16 muestra el cambio en el contenido, en porcentaje, de carbono orgánico en el tiempo, para las diferentes proporciones de suelo-biochar establecidas. Se observa inicialmente (Día 0) un aumento en el COS para los tratamientos de 3% y 5%, lo cual se fundamenta teniendo en cuenta el aporte inicial del contenido de carbono por el biochar, y el contenido de carbono fijo en el mismo de la tabla 4. La temperatura de pirólisis a la cual se someta la biomasa influye directamente sobre el grado de aromaticidad del material carbonoso obtenido y la densidad

de grupos funcionales en la estructura de este, influyendo directamente en el contenido de carbono fijo del biochar y en la estabilidad del mismo. De este modo, materiales carbonosos obtenidos tras un proceso de pirólisis donde se alcanzan temperaturas intermedias (550 °C), como es el caso de este estudio, presentan dentro de su composición una fracción estructural aromática, además de grupos funcionales en su superficie [60]. En este sentido, el contenido de carbono fijo en el biochar es clave para evaluar la estabilidad de este y su efecto a largo plazo en un suelo, lo cual podría definirse como el carbono recalcitrante, y este será aprovechado o degradado en un mayor lapso comparado con el carbono inicial lábil [61].

Así mismo, se puede evidenciar la tendencia a que los tratamientos de 1, 3 y 5% relación suelo-biochar presenten un mayor contenido de carbono orgánico frente al control en cada uno de los tiempos de muestreo del cultivo, lo cual concuerda con los argumentos planteados en este párrafo.

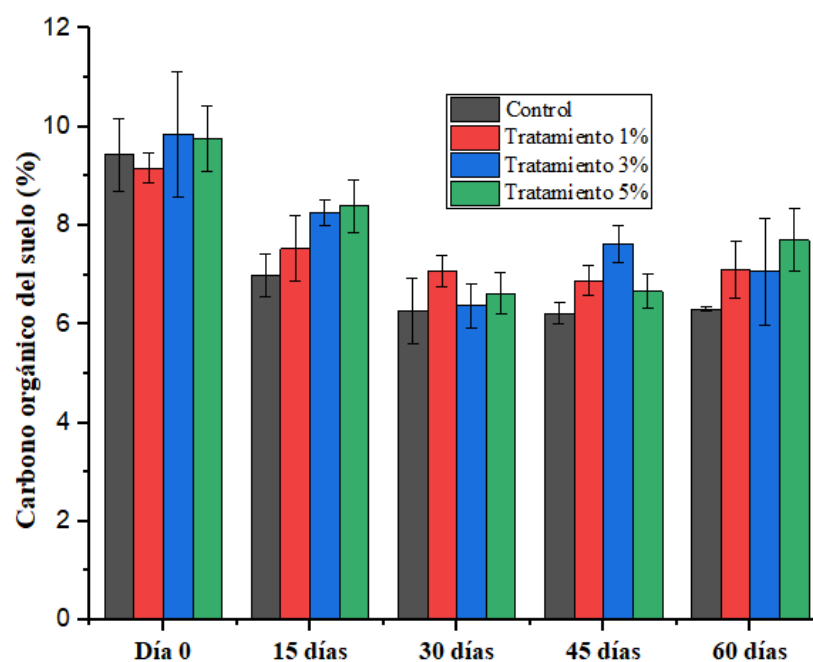


Fig 17. Comportamiento del carbono orgánico del suelo en el tiempo por tratamiento

La tabla 7, presenta los valores comparativos para el contenido de carbono orgánico del suelo para cada tratamiento en los días 15 y 60 del muestreo, elegidos en particular para evidenciar un cambio al inicio del cultivo y terminando el ciclo de este. Para el día 15, se observa una relación proporcional entre el porcentaje o concentración del tratamiento de biochar y la respuesta de la variable. Los tratamientos de biochar presenta valores superiores a los obtenidos con el control, lo

cual se corrobora con porcentajes de aumento de hasta un 20,1% para el día 15 de muestreo y un 22,2% para el día 60 de muestreo.

TABLA VI
PORCENTAJES COMPARATIVOS DE AUMENTO RESPECTO AL CONTROL EN EL CARBÓN ORGÁNICO DEL SUELO SEGÚN TRATAMIENTO

Tratamiento	Día 15		Día 60	
	Promedio (%)	Aumento (%)	Promedio (%)	Aumento (%)
1%	7,5 ± 0,7	7,7	7,1 ± 0,6	12,5
3%	8,2 ± 0,2	18,2	7,0 ± 1,1	11,9
5%	8,4 ± 0,5	20,1	7,7 ± 0,6	22,2

En el lapso del ciclo del cultivo correspondiente desde el día 0 hasta el primer día de muestreo (15avo día) se observa una disminución considerable del carbono orgánico, asociada a procesos de mineralización o también llamado priming [62], siendo este un proceso de degradación biológica por el cual los microorganismos del suelo degradan el carbono lábil hacia CO₂ [63]. Puede evidenciarse la misma tendencia hasta el 2do tiempo de muestro (30avo día). A partir del día 30, se observa como los valores de COS empiezan a estabilizarse si se compara con la disminución observada en los primeros 15 días. Dicha estabilización puede denominarse un efecto “negative priming” [62], correspondiendo al secuestro de carbono aportado por la fracción estable o recalcitrante del carbono del biochar, observándose a su vez como una disminución en la velocidad de mineralización o descomposición [44] [63]. Así mismo, la disminución general del carbono orgánico observada entre el día 0 y el día 15 indica una mineralización activa en todos los tratamientos; sin embargo, las mezclas suelo–biochar mantuvieron valores de COS superiores al control. Esto sugiere que el biochar representa un aporte de carbono orgánico estable tanto lábil como recalcitrante, posiblemente a través de mecanismos de adsorción de la materia orgánica del suelo o por formación de complejos entre la materia orgánica nativa con grupos funcionales en la estructura del biochar, llevando a asociaciones o aglomerados órgano-minerales [60], [63], [64]. Cabe resaltar, que es reportado ampliamente el incremento en la tasa de mineralización al adicionar biochar en un suelo, esto debido a su capacidad para promover un ambiente rico en nutrientes y apto para la proliferación de microorganismos, siendo estos principalmente responsables de la degradación biológica de las formas de carbono, por lo que no se puede descartar el posible aporte

inicial a la mineralización de las fuentes de carbono lábil que proporciona el biochar tras adicionarse en la matriz [60], [62], [63], [64], [65].

Para comprobar el efecto de mineralización adicional que proporciona el biochar tras agregarse en una matriz como el suelo, se toman como registro los resultados obtenidos por el J.I Juan David Henao Rico, estudiante de microbiología, en la realización de pruebas microbiológicas en el marco de este proyecto [66]. En la Fig. 17 se presentan las pruebas de respirometría del suelo (Producción de CO₂) realizadas para el control y el tratamiento de 5% suelo-biochar. Según los resultados, se evidencia un aumento en la mineralización a partir del día 0 en el tratamiento, lo cual es consecuente con lo expresado en la literatura al adicionar una fuente de carbono como lo es el biochar. Los datos recolectados anteriormente son utilizados únicamente como evidencia comparativa entre tratamientos en la respirometría del suelo, lo cual complementa los resultados expresados en la Fig. 16 y da validez al supuesto de que el biochar acelera el proceso de mineralización o de positive priming.

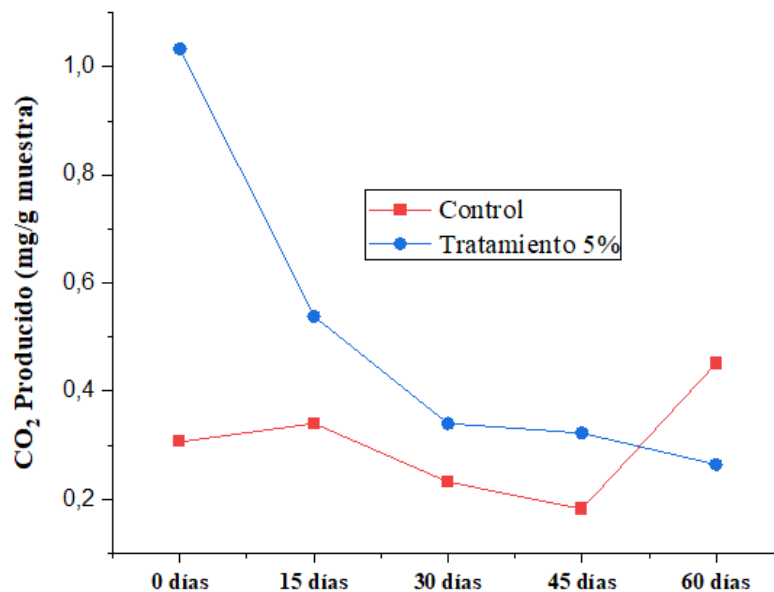


Fig 18. Gráfico comparativo para la producción de CO₂ frente al control vs tratamiento 5%. Tomado de [66]

8.6.1.2. Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La Fig. 18 representa el cambio en el comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo según el tratamiento y el tiempo de muestreo en que se llevó a cabo el experimento. De ese modo, se evidencia un aumento significativo de la CIC si se compara el control frente a los

tratamientos de 1, 3 y 5%, tendencia que se mantiene desde el día de inicio del experimento hasta finalizar los 60 días del ciclo del cultivo.

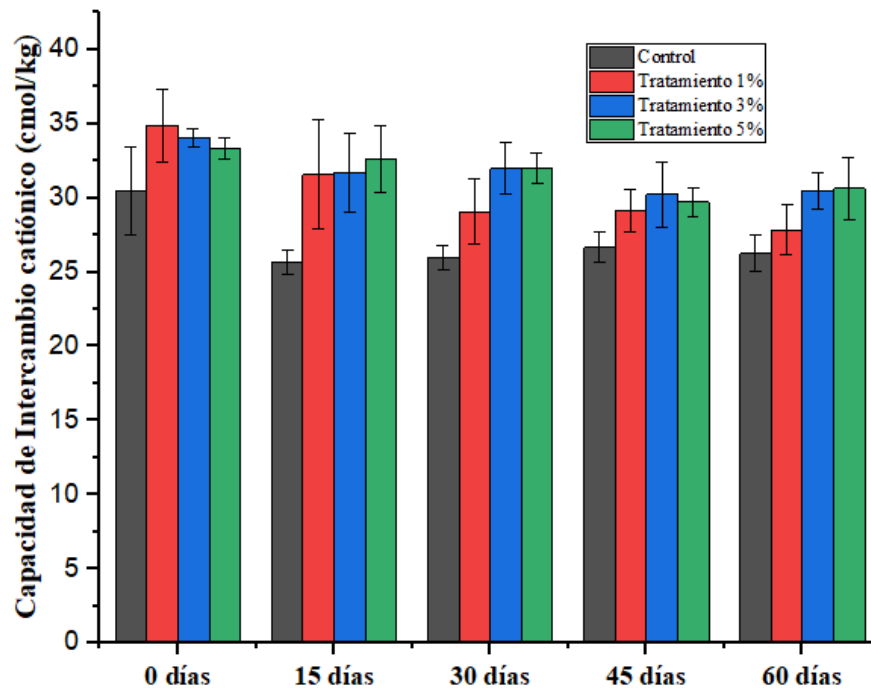


Fig 19. Comportamiento de la capacidad de intercambio catiónico en el tiempo por tratamiento

Teniendo en cuenta el efecto positivo que se observa tras la adición de biochar en la CIC del suelo, este efecto se puede relacionar a la densidad de grupos funcionales existentes tanto en la superficie del biochar como de su estructura dado el proceso de pirólisis en donde por reacciones de despolimerización de la lignina y celulosa, se le confiere al material carbonoso grupos funcionales polares como ácidos carboxílicos, cetonas y aldehídos [67]. Dicha densidad de carga superficial favorece interacciones entre el suelo y los diferentes complejos existentes en el mismo, lo cual aumenta directamente la capacidad de intercambio. [68]. Teniendo en cuenta el análisis ATR - IR en la Fig. 14, puede encontrarse una correlación que puede indicar la posible presencia de este tipo de grupos funcionales según las bandas encontradas en el espectro de transmitancia, lo cual favorecería el aumento de la CIC del suelo directamente.

La tabla 8, presenta los valores comparativos para la capacidad de intercambio catiónico (CIC) para cada tratamiento en los días 15 y 60 del muestreo, elegidos bajo el mismo criterio establecido para el contenido de carbono orgánico del suelo.

TABLA VII
PORCENTAJES COMPARATIVOS DE AUMENTO RESPECTO AL CONTROL EN LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIÓNICO (CIC) DE SUELO SEGÚN TRATAMIENTO

Tratamiento	Día 15		Día 60	
	Promedio (%)	Aumento (%)	Promedio (%)	Aumento (%)
1%	33,8 ± 3,9	22,3	30,1 ± 2,0	7,1
3%	34,2 ± 2,8	23,9	33,1 ± 1,4	17,6
5%	35,2 ± 2,4	27,4	33,4 ± 1,0	18,7

La pirólisis llevada a cabo alcanzó una temperatura máxima de 550 °C aproximadamente bajo condiciones autotérmicas. Por consiguiente, esta temperatura favorece la obtención de un material carbonoso con una la presencia de grupos funcionales oxigenados debido a que la temperatura alcanzada no es lo suficientemente alta para inducir la eliminación completa de estos por reacciones de deshidratación y desoxigenación [52]. Estos grupos son responsables de las propiedades ácido–base y de la afinidad superficial hacia el agua, por lo que su eliminación reduce la capacidad del material para intercambiar cationes o minerales [52]. En general, el incremento de la temperatura de pirólisis favorece la aromatización de la estructura del biochar y disminuye la densidad de grupos oxigenados superficiales, lo que se traduce en una menor capacidad de intercambio catiónico [7]. En este caso en particular, una temperatura máxima de 550 °C otorga una estructura parcialmente aromática sin perder completamente la presencia de grupos funcionales oxigenados, lo cual favorece esta propiedad fisicoquímica y se evidencia en los porcentajes de aumento expresados en la tabla 8.

8.6.1.3. pH

La evolución temporal del pH según tratamiento de biochar aplicado se presenta en la Fig. 19. En general, se puede observar que entre tratamientos se obtuvieron valores de pH neutro o ligeramente básicos, así mismo, existe una tendencia a la alcalinidad del medio tras la dosis o concentración de biochar en el suelo, siendo así los tratamientos de 3% y 5% los que presentan valores más alcalinos comparados con el tratamiento de 1% y el control. Aunque esta tendencia se muestre, se debe tener en cuenta que las diferencias entre los valores de pH entre los mismos no son significativas aparentemente, por lo que será necesario correlacionar con un análisis de varianza (ANOVA).

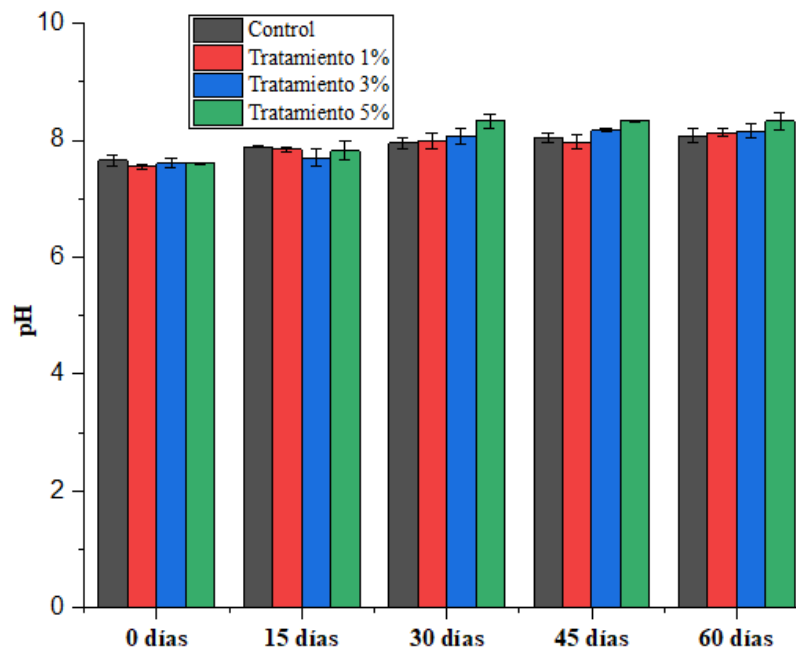


Fig 20. Comportamiento del pH en el tiempo por tratamiento

La tendencia en el tiempo para el pH del suelo no se ve afectada de una manera significativa, si bien el tratamiento de 5% presenta una ligera alcalinidad comparado con los demás tratamientos y el control, no se observa una diferencia considerable que pueda establecer una correlación entre la concentración de biochar y el pH del medio. Este comportamiento coincide con lo reportado en estudios previos, donde la incorporación del biochar al suelo no genera un impacto significativo sobre la misma propiedad [69]. Así mismo, teniendo en cuenta que tanto el pH del suelo como del biochar a partir de cáscara de café se encuentran en un rango neutro, puede asumirse que el cambio en los mismos no será drástico tras su incorporación. El aumento observado a partir de los 15 días en la ligera basicidad de los tratamientos puede asociarse a la composición inorgánica del biochar y de la ceniza producida, la cual mediante el análisis FRX en la tabla 6, evidencia la presencia de óxidos de calcio (CaO) y de magnesio (MgO) dentro de su composición, los cuales pueden favorecer un efecto “liming” o de encalado en el suelo, el cual permite evitar la acidificación natural del mismo [12].

Es importante considerar la escala temporal del experimento dado que fue realizado en 2 meses del ciclo de cultivo, siendo posiblemente insuficiente para alcanzar el tiempo necesario para que ocurran procesos de solubilización de compuestos minerales, liberación progresiva de bases y

estabilización del biochar en el suelo. Por tanto, los 60 días considerados en este estudio pueden resultar insuficientes para observar ajustes significativos respecto a esta propiedad fisicoquímica, lo que explicaría la estabilidad general de los valores obtenidos.

8.6.1.4. Conductividad eléctrica (CE)

El comportamiento de la CE del suelo mostró diferencias significativas tras la incorporación de los tratamientos en el mismo. En la Fig. 20, se presentan los valores de la conductividad eléctrica en unidades de $\mu\text{S}/\text{cm}$ para cada tratamiento y el control en los días de muestreo según el ciclo de cultivo del frijol Uribe Rosado. Desde el día 0 del experimento, la adición de biochar presenta un efecto positivo frente a la concentración de iones solubles en el suelo respecto al control, efecto que se intensifica conforme aumenta la dosis de biochar. El tratamiento de 5 % suelo-biochar presenta los valores de mayor conductividad eléctrica durante todo el experimento.

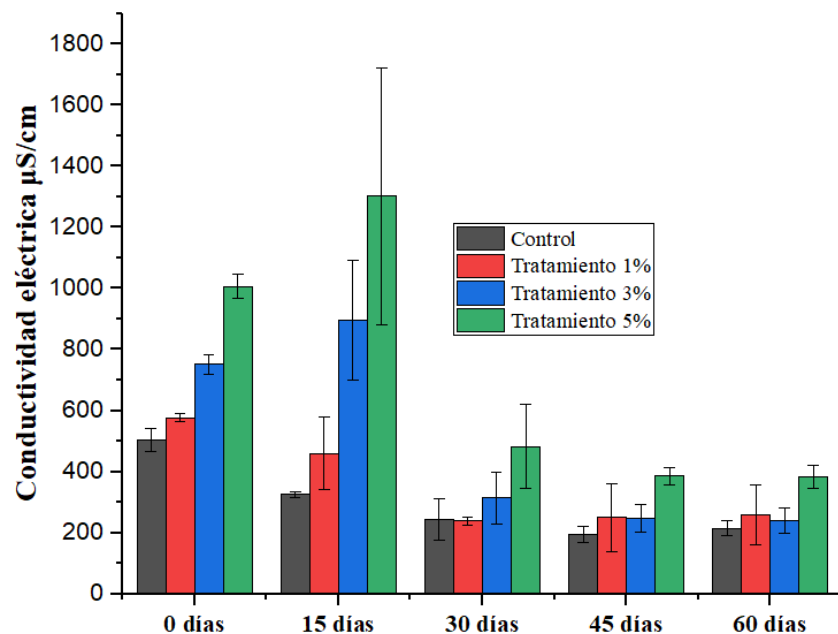


Fig 21. Comportamiento de la conductividad eléctrica en el tiempo por tratamiento

Entre el día 0 y el día 15 de muestreo se observa el incremento más pronunciado con base a la conductividad eléctrica, fenómeno que puede estar asociado a la liberación progresiva y solubilización de los minerales presentes en el biochar. De este modo, el día 15 representa el día en que la cantidad de iones solubles fue superior para los tratamientos 3 y 5%. Consecuentemente,

a partir del día 30, los valores de conductividad disminuyen para cada tratamiento incluyendo el control, lo cual puede atribuirse a varios sucesos simultáneos. En primera instancia se puede estimar la asimilación activa de los iones disponibles en la matriz del suelo por parte de la plántula de fríjol u a la lixiviación de dichos iones tras los riegos realizados en cada plántula, resultando en que la cantidad de iones solubles se depositaran en la parte inferior de las macetas, lugar donde el muestreo no fue ejecutado. Aun así, la disminución es proporcional a cada tratamiento y el control, por lo que la tendencia del aumento en la conductividad se mantiene, siendo en este caso el tratamiento de 5% el que presentó mayor cantidad de especies solubles en cada tiempo de muestreo durante los 60 días de ciclo de cultivo.

8.7. Comportamientos variables agronómicas

8.7.1. Altura de la plántula

Para determinar si la adición de biochar proporcionó una mejora o incremento en la dinámica de crecimiento del cultivo de fríjol Uribe Rosado, se expresa la tasa de crecimiento relativo (TCR) para cada tratamiento con base a cada semana de experimento en la Fig. 21.

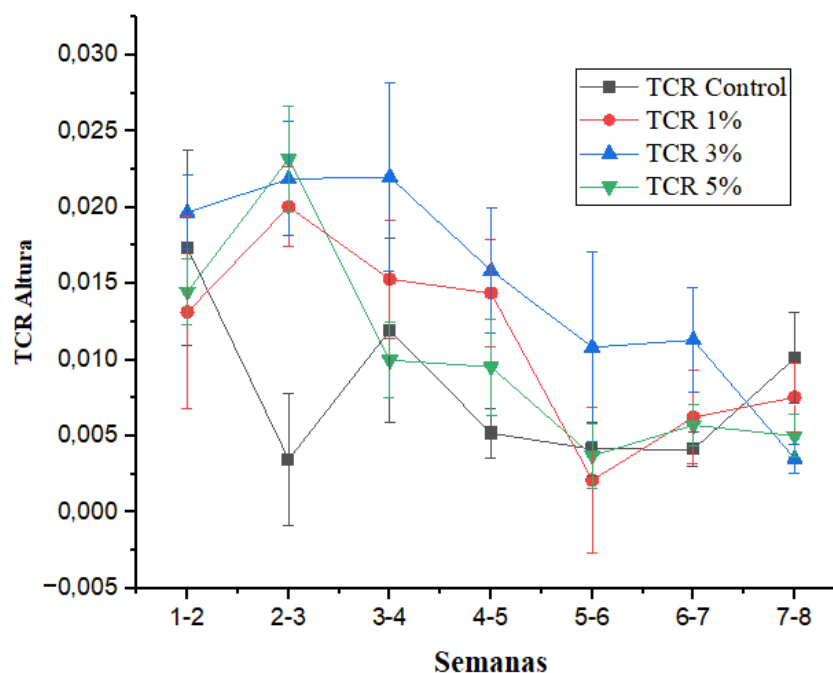


Fig 22. Tasas de crecimiento relativo (Altura de plántula) para experimentos de fríjol Uribe Rosado según tratamiento

En primera instancia, puede observarse como el tratamiento de 3% suelo-biochar presenta una TCR mayor que el control y los tratamientos de 1 y 5% a lo largo de casi todo el ciclo de cultivo, resultando así en una velocidad de crecimiento mayor en comparación con los demás. Adicionalmente, en las etapas correspondientes a la semana 7 y 8, la TCR para este tratamiento se reduce drásticamente, indicando la posible estabilización de la altura de la plántula para la formación de las vainas de biomasa o fríjol Uribe Rosado. El tratamiento de 1% presenta un comportamiento similar al de 3%, alcanzando valores de TCR mayores al control en las semanas intermedias del desarrollo de la plántula (Semana 2 - Semana 5). Posteriormente se estabiliza como sucedió con el tratamiento de 3%. El tratamiento de 5% presenta valores fluctuantes a lo largo del tiempo, siendo así que en semanas tempranas presenta valores inferiores a los obtenidos por el control.

Por lo anterior, el tratamiento de 3% suelo-biochar presenta el mayor efecto sobre la tasa de crecimiento de las plántulas de fríjol Uribe Rosado en términos de estabilidad y superioridad frente al control.

8.7.2. *Diámetro del tallo*

El seguimiento al diámetro del tallo se presenta en la Fig. 22, presentando el cambio en la variable para los 2 meses del ciclo de cultivo. Se evidencia como las TCR para los tratamientos y el control son fluctuantes a lo largo del tiempo, lo cual es esperado para este parámetro en etapas tempranas de desarrollo. El tratamiento de 1% presenta un estímulo adicional en el transcurso de la semana 3-4, pero posteriormente este efecto decae considerablemente, mientras que los tratamientos de 3% y 5 % presentan valores de TCR mayores al control y estables en la mayor parte del ciclo del cultivo.

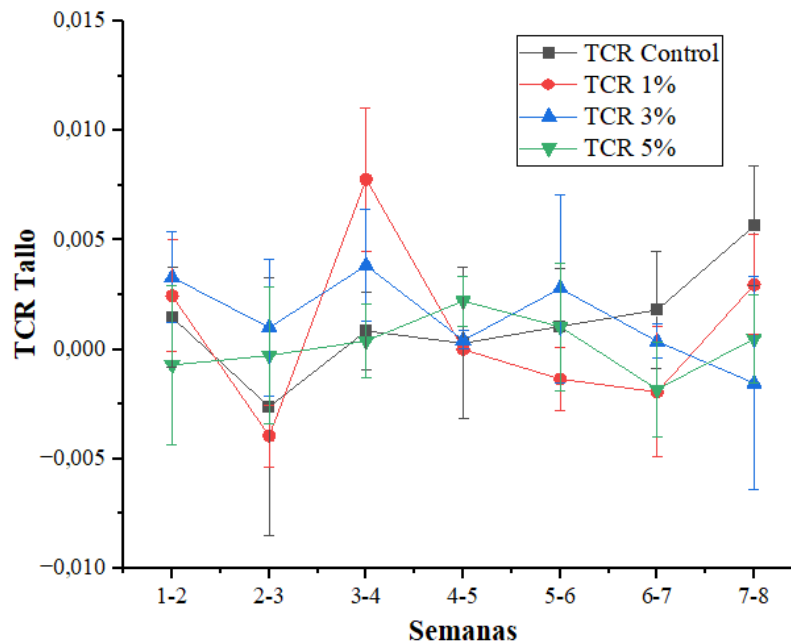


Fig 23. Tasas de crecimiento del diámetro de tallo en las plántulas de fríjol Uribe Rosado según tratamiento

8.7.3. Desarrollo de la plántula y productividad

Para comprender cómo los diferentes tratamientos con biochar influyeron en el desarrollo de la plántula de fríjol Uribe Rosado, se hace uso del término de productividad de la plántula, la cual asocia y proporciona información respecto a los valores en peso seco (g) correspondientes a los segmentos de la plántula, siendo en este caso: Sistema radicular, sistema aéreo o arbóreo y las vainas de fríjol o biomasa producida por la plántula. De este modo, el término productividad hace referencia a la cantidad o peso producido en cada segmento, dando lugar a valores comparativos entre el control y los tratamientos implementados.

La Fig. 23, presenta los valores en peso seco para cada segmento de las plántulas de fríjol Uribe Rosado para cada por tratamiento. En primera instancia, todos los tratamientos de biochar presentan valores promedio superiores para cada segmento de la plántula en comparación con el control, indicando un efecto positivo del biochar frente a la respuesta del cultivo. Entre los tratamientos se destaca el correspondiente al 3%, debido a que registra los mayores valores para los 3 segmentos de la plántula analizados.

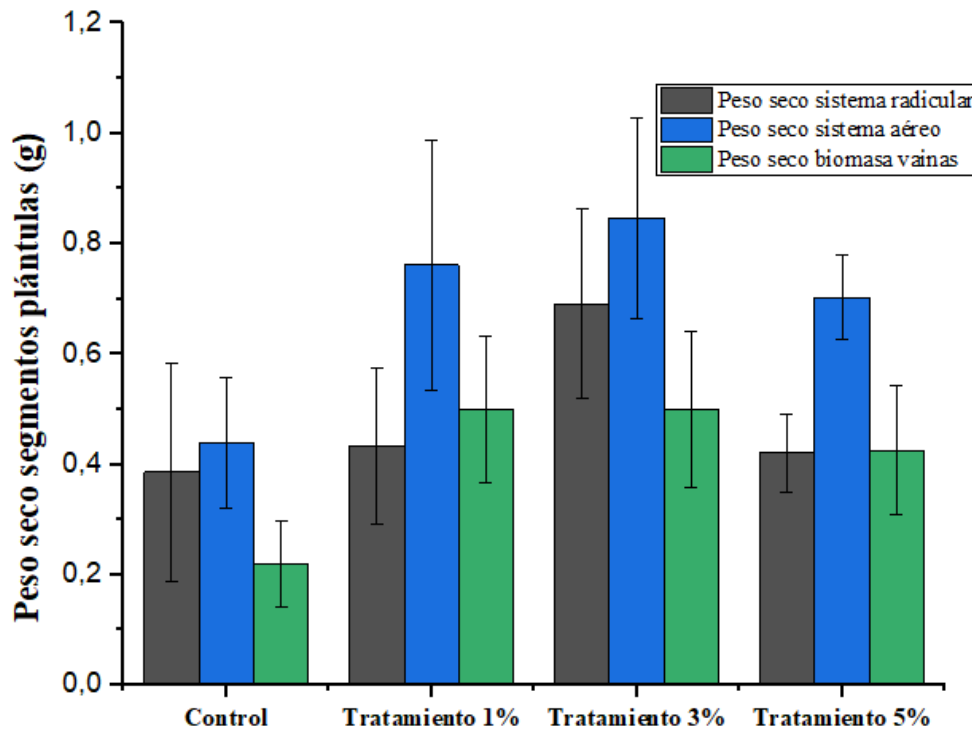


Fig 24. Desarrollo de la plántula y productividad del cultivo de frijol Uribe Rosado por tratamiento

La tabla 9 presenta los porcentajes de aumento para cada segmento de la plántula según el tratamiento respecto al control:

TABLA VIII
PORCENTAJES DE AUMENTO RESPECTO AL CONTROL PARA LOS SEGMENTOS DE LA PLÁNTULA POR TRATAMIENTO APLICADO

Tratamiento	Aumento en sistema radicular (%)	Aumento en sistema aéreo (%)	Aumento peso vainas de frijol (%)
1%	12,3	73,3	127,3
3%	78,9	92,8	127,9
5%	9,0	59,9	94,0

Los resultados ofrecen información respecto a la influencia y aporte del biochar al desarrollo de la plántula y productividad del cultivo de frijol Uribe Rosado, siendo el tratamiento de 3% el que presenta los valores en porcentaje más altos en comparación al control. Los tratamientos de 1 y 5% también presentan un efecto biomejorador si se comparan con el control, indicando que todos los tratamientos favorecieron el desarrollo de las plántulas y la productividad de frijol Uribe Rosado.

Adicionalmente, el aumento en el desarrollo del sistema radicular tras la adición de biochar, dio lugar a la presencia de nódulos o protuberancias dentro de la conformación de las raíces de las plántulas que presentaban el tratamiento de biochar. Los nódulos son de interés, pues son indicadores de microorganismos fijadores de nitrógeno en el suelo. De este modo, la Fig 24. presenta un esquema visual comparativo entre los 3 segmentos estudiados en este trabajo, realizando énfasis en los sistemas radiculares y los nódulos encontrados en los mismos.

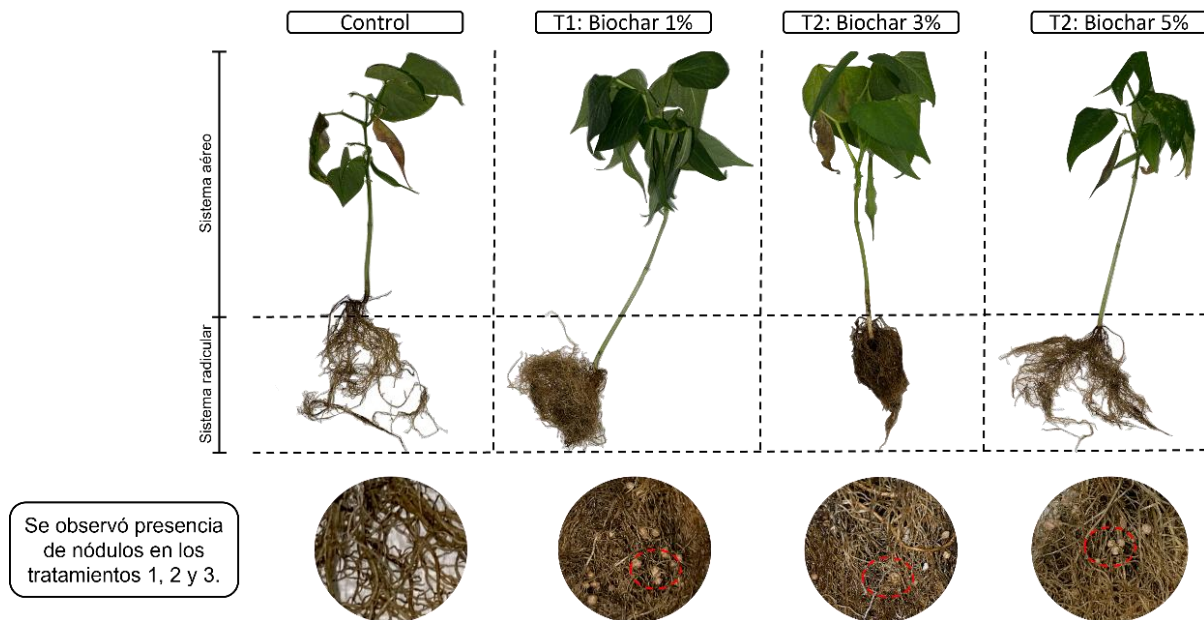


Fig 25. Segmentos de las plántulas comparativos entre tratamientos de biochar y el control

Por consiguiente, en las plántulas de control no se encontró presencia de nódulos, mientras que los tratamientos de biochar evidencian la formación de estos. Esto indica que el biochar adicionado en los suelos puede promover o estimular la actividad microbiana del suelo como se expresaba en el análisis de mineralización del carbono orgánico. Estos resultados son consecuentes con los reportados en [70] [71], donde se evidencia que la implementación de biochar en el suelo, incrementó la presencia de bacterias de crecimiento vegetal, grupo que incluye en este caso a fijadores de nitrógeno como lo es el género *Rhizobium*. En conjunto, la evidencia sugiere que el biochar tiene la capacidad de generar condiciones idóneas para el crecimiento microbiano, lo cual se refleja en la producción de nódulos en el sistema radicular de las plántulas.

Teniendo en cuenta el impacto del biochar en el desarrollo de la actividad biología del suelo y la productividad del frijol Uribe Rosado, es clave correlacionar el efecto del aumento en propiedades

como el carbono orgánico del suelo y la capacidad de intercambio catiónico con el desarrollo de las plántulas y su productividad. Principalmente, el suministro y aumento en el carbono orgánico del suelo tras la adición del biochar puede promover condiciones favorables para el crecimiento de la plántula y el desarrollo radicular tal como reporta [72], incluyendo la mejora de propiedades físicas del suelo como la retención de humedad, la agregación y la aireación del mismo, lo cual en este caso se refleja en los porcentajes de aumento para estas 2 secciones, tal como se expresa en la tabla 8 para los tratamientos de 1, 3 y 5% en el sistema radicular y el sistema aéreo de las plántulas de fríjol Uribe Rosado. Lo anterior se confirma debido a que el contenido de carbono orgánico adicional tiene influencia directa frente al contenido de materia orgánica, siendo este uno de los factores primordiales para favorecer el bienestar y desarrollo biológico del suelo, resultando directamente en un aumento en el crecimiento del cultivo evaluado. Así mismo, la adición del biochar trae consigo el aporte nutricional por parte del contenido NPK, lo cual directamente favorece la fertilidad del suelo, y, por ende, el crecimiento del cultivo [69] tal como se puede evidenciar adicionalmente en la figura 21, indicando que tras la adición del biochar, el crecimiento de las plántulas fue mayor durante la mayor parte del tiempo del ciclo de cultivo para los tratamientos de biochar.

8.8. Análisis estadísticos

Con el fin de evaluar si las diferencias observadas entre tratamientos de biochar aplicados y el control son estadísticamente significativas, esta sección presenta el análisis de varianza (ANOVA) realizado tanto a las variables fisicoquímicas como agronómicas. Dentro de estas, todas las variables presentan significancia estadística dentro de al menos 1 factor a analizar (Tratamiento o tiempo), por lo que se presentara el tratamiento e interpretación estadística de los resultados obtenidos.

Para establecer el nivel de significancia de las variables agronómicas y fisicoquímicas dados los 2 parámetros establecidos (Semana y tratamiento), se realizó inicialmente un ANOVA para las variables que cumplieran con los supuestos de normalidad y homocedasticidad (Variables paramétricas), como se registra en la tabla 10:

TABLA IX
ANOVA PARA VARIABLES PARAMÉTRICAS SEGÚN FACTORES APLICADOS SEGÚN TUKEY

Variable	Valor p	
	Factor 1 (Semana)	Factor 2 (Tratamiento)
Carbono orgánico (CO)	1,51e-15 ***	0,00145 **
Capacidad de intercambio catiónico (CIC)	0,312	2,31e-09 ***
Conductividad eléctrica (CE)	2e-16***	1,09e-11 ***
pH	2e-16 ***	0,000404 ***
Altura de plántula (AP)	2e-16 ***	3,66e-13 ***

Nota: Códigos de significancia: 0 ‘****’ 0,001 ‘***’ 0,01 ‘**’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘’ 1

Las variables NH (Número de hojas) y DT (Diámetro de tallo), no cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad, por lo que no fue posible acoplarlas al modelo del ANOVA. En este sentido, fue necesario aplicar una prueba para variables no paramétricas, la cual en este caso fue Krukal Wallis. En la tabla 11, se presentan los valores p para los 2 factores aplicados bajo la prueba de significancia para variables no paramétricas:

TABLA X
VALORES PARA VARIABLES NO PARAMÉTRICAS SEGÚN FACTORES APLICADOS

Variable	Valor p	
	Factor 1 (Semana)	Factor 2 (Tratamiento)
Número de hojas (NH)	2e-16 ***	0,02919*
Diámetro de tallo (DT)	0,4225	0,004154**

Nota: Códigos de significancia: 0 ‘****’ 0,001 ‘***’ 0,01 ‘**’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘’ 1

De este modo, pueden aplicarse las pruebas post-hoc tanto para las variables paramétricas, como las no paramétricas, siendo correspondientes a Tukey y Pairwise Wilcoxon respectivamente. Estas tienen la finalidad de identificar entre qué grupos pertenecientes a un factor, existen diferencias significativas; por lo que es un análisis complementario al ANOVA. Por consiguiente, a continuación, se mostrarán los resultados para cada variable con base al factor de tratamiento:

TABLA XI
VALORES Y CATEGORIZACIÓN POR LETRAS PARA VARIABLES PARAMÉTRICAS SEGÚN TUKEY

Tratamiento	Carbono orgánico (CO)	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	pH	Conductividad eléctrica (CE)	Altura de plántula (AP)
5%	2,04 a	33,66 a	8,08 a	6,42 a	22,30 a
3%	2,04 a	33,71 a	7,94 b	6,02 b	22,13 a
1%	2,01 ab	32,12 a	7,92 b	5,78 c	18,82 b

Nota: Las letras iguales no representan una diferencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$)

TABLA XII
VALORES p COMPARATIVOS PARA VARIABLES NO PARAMÉTRICAS SEGÚN Pairwise Wilcoxon

Comparación tratamientos	Valor p	Valor p
	Diámetro de tallo (DT)	Numero de hojas (NH)
Control – 1%	0,02	0,73
Control – 3%	0,01	0,14
Control – 5%	0,02	0,03
1% - 3%	1,00	0,73
1% - 5%	0,64	0,49
3% - 5%	1,00	0,73

La tabla 11 presenta la categorización del factor “Tratamiento” con base a su información estadística, de este modo, es posible identificar estadísticamente que grupos dentro del factor son diferentes entre sí ($p < 0,05$) para cada variable analizada. La agrupación en este caso se realiza por letras, siendo un indicativo de los grupos que sean distintos entre sí. Si 2 grupos presentan la misma letra, pertenecerán a un mismo grupo dentro del contexto estadístico, es decir, no son significativamente diferentes. Así mismo, los valores para cada variable fisicoquímica paramétrica están asociados a las medias dentro de todo el experimento realizado, por lo cual reflejan el aporte total dentro de todo el conjunto de datos recolectados.

El carbono orgánico del suelo presenta un efecto biomejorador para cada tratamiento de biochar implementado, siendo en este caso los tratamientos de 3% y 5% los que presentan un mayor aporte a la propiedad fisicoquímica, siendo categorizados dentro del grupo a, diferente del grupo b el cual pertenece al control. Para el caso del tratamiento de 1%, se encuentra dentro del grupo ab, el cual en este caso da indicios de que, aunque puede haber un efecto biomejorador por parte del biochar, no alcanza a ser lo suficientemente significativo para alcanzar el aumento que proporciona tratamientos como el tratamiento de 3 y 5%. La capacidad de intercambio catiónico se ve

favorecida tras la adición de biochar, categorizando a los tratamientos de 1, 3 y 5% dentro del grupo a, diferente del grupo b perteneciente al control. Lo anterior en este caso indica que, aunque hay un efecto biomejorador por parte de los tratamientos en el aumento de la capacidad de intercambio catiónico, no hay una diferencia estadística entre los grupos de tratamientos, aun así, el tratamiento de 3% presenta el valor promedio o media mayor para los valores obtenidos de CIC. Para el caso del pH, el tratamiento de 5% se encuentra en un grupo diferente al grupo estadístico del control y del tratamiento de 1% y 3%, lo anterior en este caso concuerda con lo visto experimentalmente y expresa que el tratamiento de 5% fue el que proporcionó una mayor tendencia hacia la alcalinidad. No obstante, si se compara las medias de cada tratamiento y el control, se puede establecer que no presentan diferencias significativas entre sí, pero lo suficiente para categorizarse dentro de los grupos mencionados. La conductividad eléctrica se encuentra en este caso dentro de 3 grupos, siendo el tratamiento de 5% el que presenta el mayor incremento de la propiedad, siendo categorizado en el grupo a, seguido del tratamiento de 3% en el grupo b, y el tratamiento de 1% y el control dentro del grupo C. Esta categorización se correlaciona con los resultados experimentales, evidenciando que el tratamiento de 5% es el que presentó una mayor presencia de iones solubles en el suelo, siguiendo en un orden descendente para el tratamiento de 3%, 1% y el control respectivamente. Así mismo, para la variable Altura de plántula (AP) se observa que los tratamientos de 3% y 5% son los que presentan un valor mayor comparado con el control, categorizados dentro del grupo a, mientras que el tratamiento de 1% y el control están dentro del grupo b.

La tabla 12 establece una comparación entre los tratamientos de 1, 3 y 5% frente al control. Se presentan los valores p obtenidos mediante la prueba post hoc para las variables no paramétricas DT y NH, lo cual en este caso asocia únicamente a la significancia estadística de cada variable tras la implementación de los tratamientos. Para el diámetro de tallo (DT), se observaron diferencias significativas entre el control y todos los tratamientos con biochar ($p < 0.05$), lo que indica que incluso las dosis más bajas (1% y 3%) son suficientes para generar un aumento en el vigor estructural de la plántula. Sin embargo, no se registraron diferencias entre los tratamientos con biochar, sugiriendo que el efecto sobre esta variable no es dependiente de la dosis. En contraste, para el número de hojas solo el tratamiento del 5% presentó diferencias estadísticamente significativas frente al control, lo cual se traduce en una mayor área fotosintética, relacionada con la productividad del cultivo.

IX. CONCLUSIONES

Es posible la obtención de un material carbonoso a partir de reactores de bajo costo como el microgasificador utilizado en este estudio, lo cual confirma la viabilidad del sistema para el aprovechamiento o valorización de residuos agroindustriales como la cáscara de café.

El biochar obtenido mediante el microgasificador de tiro ascendente es un material carbonoso que combina regiones grafíticas y amorfas, con grupos funcionales oxigenados como hidroxilo (O-H), carbonilos (C=O) y éteres (C-O-C) en su estructura. Asimismo, presenta nutrientes minerales como K, Mg, P y Ca, junto con una porosidad desarrollada que, en conjunto, favorecen su potencial como un biomejorador eficaz para suelos agrícolas.

A partir de los resultados obtenidos tras la implementación del biochar en el suelo, se concluye que todas las variables fisicoquímicas y agronómicas analizadas presentaron diferencias estadísticamente significativas, evidenciando una respuesta consistente y no aleatoria del sistema suelo-planta frente a este tratamiento. Este efecto confirma que el biochar puede funcionar como un biomejorador en el cultivo de fríjol Uribe Rosado.

La aplicación del biochar evidencia un efecto positivo en el crecimiento y desarrollo del fríjol Uribe Rosado en comparación con las plantas de control, lo cual se refleja en los porcentajes de aumento para los segmentos de las plántulas, así como en el comportamiento de las variables agronómicas tras su aplicación.

X. RECOMENDACIONES

El efecto del biochar sobre las propiedades del suelo se estudió en condiciones controladas de laboratorio y a corto plazo. En este sentido, sería importante registrar el efecto a largo plazo o de envejecimiento del biochar, y en condiciones no controladas, para que se establezca su efecto biomejorador bajo parámetros variables de temperatura, humedad, tipo de suelo, y microorganismos, tal como sería en un cultivo en campo.

Se propone modificar el microgasificador de tiro ascendente con el propósito de controlar y mantener un régimen térmico estable, permitiendo operar a temperaturas específicas de pirólisis. Esta adecuación facilitaría la síntesis de materiales carbonosos bajo condiciones térmicas definidas y reproducibles.

Evaluar y realizar seguimiento a otro tipo de propiedades fisicoquímicas del suelo tras la implementación del biochar, tales como el contenido NPK disponible y sus formas asimilables.

XI. PARTICIPACIÓN EN EVENTOS CIENTÍFICOS

1. XVII Encuentro Redbio 2025, Universidad EAFIT (Medellín). Ponencia oral. *“Biochar de cáscarilla de café aplicado en frijol Uribe Rosado: una alternativa para la agricultura sostenible en el suroeste antioqueño”*. Grupo de Investigación: Catalizadores y Adsorbentes. **Juan Adaime**, Cecilia Manrique, Andrea García, Johana Arboleda, Laura Urán y Adriana Echavarría.
2. II Simposio de Química de la Universidad de Medellín 2025. Universidad de Medellín (Medellín). Modalidad póster *“Obtención de biomejoradores de suelo a partir de biomasa residual proveniente de la subregión del suroeste antioqueño aplicados en cultivos de frijol Uribe Rosado”*. Grupo de Investigación: Catalizadores y Adsorbentes. **Juan Adaime**, Cecilia Manrique, Andrea García, Johana Arboleda, Laura Urán y Adriana Echavarría.
3. Encuentro de Semilleros de Investigación y Jóvenes Investigadores ESI + JI 2025. Universidad de Antioquia (Medellín). Modalidad póster *“Obtención de biomejoradores de suelo a partir de biomasa residual proveniente de la subregión del suroeste antioqueño”*. Grupo de Investigación: Catalizadores y Adsorbentes. **Juan Adaime**, Cecilia Manrique, Andrea García, Johana Arboleda, Laura Urán y Adriana Echavarría.
4. I Simposio de Química de la Universidad de Medellín 2024. Universidad de Medellín (Medellín). Modalidad póster. *“Obtención de biomejoradores de suelo a partir de biomasa residual proveniente de la subregión del suroeste antioqueño”*. Grupo de Investigación: Catalizadores y Adsorbentes. **Juan Adaime**, Cecilia Manrique, Andrea García, Johana Arboleda, Laura Urán y Adriana Echavarría.

REFERENCIAS

- [1] M. Ridder, “El mercado mundial del café: estadísticas y datos,” *statista*.
- [2] Federación Nacional de Cafeteros, “Producción anual de café de Colombia cierra 2022 en 11,1 millones de sacos,” Federación Nacional de Cafeteros. Accessed: Jan. 03, 2026. [Online]. Available: <https://federaciondefcafeteros.org/wp/listado-noticias/produccion-anual-de-cafe-de-colombia-cierra-2022-en-111-millones-de-sacos/>.
- [3] S. J. Muñoz Ríos, L. M. Rey Hernández, K. N. Acuña Rodríguez, Á. C. Acuña Llanes, and F. N. Gómez Jaimes, “Biochar production from palm kernel shell, coffee husk and bovine rumen content via pyrolysis and its use in the removal of methylene blue from aqueous solution,” *Innovaciencia*, vol. 12, no. 1, Jul. 2024, doi: 10.15649/2346075X.3550.
- [4] Gabinete municipal 2024 - 2027, “Plan de Desarrollo Ciudad Bolívar 2024 - 2027: Con pasión construimos visión,” Ciudad Bolívar, 2024.
- [5] Gobernación de Antioquia, “Plan de desarrollo departamental de Antioquia 2024 - 2027,” Medellín, 2024.
- [6] J. A. Serna-Jiménez, L. S. Torres-Valenzuela, K. Martínez Cortínez, and M. C. Hernández Sandoval, “Aprovechamiento de la pulpa de café como alternativa de valorización de subproductos,” *Revista ION*, vol. 31, no. 1, pp. 37–42, Nov. 2018, doi: 10.18273/revion.v31n1-2018006.
- [7] TeleAntioquia, “Más de 1,9 millones de sacos de café espera producir Antioquia,” TeleAntioquia, Colombia, Jan. 20, 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=UGl5hKvhRG4>
- [8] Periodico El Suroeste, “Balance del sector cafetero,” Periodico El Suroeste. [Online]. Available: <https://periodicoelsuroeste.com/balance-sector-cafetero/>
- [9] APPA Renovables, “¿Qué es la biomasa?,” APPA Renovables. [Online]. Available: <https://www.appa.es/appa-biomasa/que-es-la-biomasa/?cn-reloaded=1>
- [10] N. Ahmed *et al.*, “Micronutrients and their effects on Horticultural crop quality, productivity and sustainability,” *Sci. Hortic.*, vol. 323, p. 112512, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.scienta.2023.112512.
- [11] F. Nadeem, M. A. Hanif, M. I. Majeed, and Z. Mushtaq, “Role of Macronutrients and Micronutrients in the Growth and Development of Plants and Prevention of Deleterious

- Plant Diseases ,” *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, vol. 13, pp. 31–52, 2018.
- [12] N. Bolan *et al.*, “Soil acidification and the liming potential of biochar,” Jan. 15, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.envpol.2022.120632.
- [13] S. Kumar, S. Kumar, and T. Mohapatra, “Interaction Between Macro- and Micro-Nutrients in Plants,” *Front. Plant Sci.*, vol. 12, May 2021, doi: 10.3389/fpls.2021.665583.
- [14] A. K. Shukla *et al.*, “Deficiency of phyto-available sulphur, zinc, boron, iron, copper and manganese in soils of India,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 19760, Oct. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-99040-2.
- [15] G. Lopez *et al.*, “Nutrient deficiency effects on root architecture and root-to-shoot ratio in arable crops,” *Front. Plant Sci.*, vol. 13, Jan. 2023, doi: 10.3389/fpls.2022.1067498.
- [16] J. M. De la Rosa *et al.*, “Impact of Biochar Amendment on Soil Properties and Organic Matter Composition in Trace Element-Contaminated Soil,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 4, Feb. 2022, doi: 10.3390/ijerph19042140.
- [17] E. Martínez H, J. P. Fuentes E, and E. Acevedo H, “CARBONO ORGÁNICO Y PROPIEDADES DEL SUELO,” *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, vol. 8, no. 1, pp. 68–96, 2008, doi: 10.4067/S0718-27912008000100006.
- [18] A. Ali *et al.*, “The role of biochar in enhancing soil health & interactions with rhizosphere properties and enzyme activities in organic fertilizer substitution,” *Front. Plant Sci.*, vol. 16, Jun. 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1595208.
- [19] Y. Zhang, J. Wang, and Y. Feng, “The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review,” *Catena (Amst.)*, vol. 202, p. 105284, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.catena.2021.105284.
- [20] Germisemillas S.A.S, “Frijol Uribe Rosado,” Copacabana, Oct. 2023. [Online]. Available: <https://germisemillas.com/semillas/frijol-uribe-rosado/>
- [21] Oro Verde Semillas, “Frijol Uribe Rosado,” Oro Verde Semillas.
- [22] J. H. Arias Restrepo, T. Rengifo Martínez, and M. Jaramillo Carmona, “Buenas prácticas agrícolas (BPA) en la producción de frijol voluble,” 2007.
- [23] CONAVI and SIESCO, “Diseño bioclimático - Clima templado húmedo,” 2021. [Online]. Available: <https://siesco.conavi.gob.mx/doc/tecnicos/diseno/Diseño%20Templado%20Húmedo.pdf>

-
- [24] Pedro Félix-Valencia, Isidoro Padilla-Valenzuela, José Eliseo Ortiz-Enríquez, María Monserrat Torres-Cruz, and Guillermo Fuentes-Dávila, “Effect of temperature, relative humidity and drip irrigation on productivity of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in the Yaqui Valley, Sonora, Mexico,” *GSC Advanced Research and Reviews*, vol. 17, no. 2, pp. 010–020, Nov. 2023, doi: 10.30574/gscarr.2023.17.2.0406.
- [25] D. Dey, D. Sarangi, and P. Mondal, “Biochar: Porous Carbon Material, Its Role to Maintain Sustainable Environment,” 2023, pp. 595–621. doi: 10.1007/978-981-19-7188-4_22.
- [26] A. Tomczyk, Z. Sokołowska, and P. Boguta, “Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects,” Mar. 01, 2020, *Springer*. doi: 10.1007/s11157-020-09523-3.
- [27] E. B. Dayoub, Z. Tóth, G. Soós, and A. Anda, “Chemical and Physical Properties of Selected Biochar Types and a Few Application Methods in Agriculture,” *Agronomy*, vol. 14, no. 11, p. 2540, Oct. 2024, doi: 10.3390/agronomy14112540.
- [28] P. Kuryntseva, K. Karamova, P. Galitskaya, S. Selivanovskaya, and G. Evtugyn, “Biochar Functions in Soil Depending on Feedstock and Pyrolyzation Properties with Particular Emphasis on Biological Properties,” *Agriculture*, vol. 13, no. 10, p. 2003, Oct. 2023, doi: 10.3390/agriculture13102003.
- [29] M. Varkolu *et al.*, “Recent Advances in Biochar Production, Characterization, and Environmental Applications,” *Catalysts*, vol. 15, no. 3, p. 243, Mar. 2025, doi: 10.3390/catal15030243.
- [30] H. Gohar, G. Beggio, M. Schiavon, and M. C. Lavagnolo, “A systematic review on the potential of agro-industrial waste for pyrolysis: feedstocks properties and their impact on biochar and pyrolysis gas composition,” *Biomass Bioenergy*, vol. 200, p. 108047, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.biombioe.2025.108047.
- [31] T. C. Puentes Escobar and A. Rodríguez Carlosama, “Impacto del biocarbón en el suelo agrícola,” *Avances Investigación en Ingeniería*, vol. 18, no. 2 (Julio-Diciembre), Sep. 2021, doi: 10.18041/1794-4953/avances.2.7540.
- [32] S. Bolan *et al.*, “Biochar modulating soil biological health: A review,” *Science of The Total Environment*, vol. 914, p. 169585, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169585.
- [33] D. C. B. D. Santos, R. B. W. Evaristo, R. C. Dutra, P. A. Z. Suarez, E. A. Silveira, and G. F. Ghesti, “Advancing Biochar Applications: A Review of Production Processes, Analytical

- Methods, Decision Criteria, and Pathways for Scalability and Certification,” *Sustainability*, vol. 17, no. 6, p. 2685, Mar. 2025, doi: 10.3390/su17062685.
- [34] C. Liu *et al.*, “Biochar-Assisted Agriculture: From Healthy Soil to Healthy Plants,” Nov. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/plants14213273.
- [35] S. Mona *et al.*, “Characterization and utilization of algal and wheat husk biochar as biofertilizers for sustainable soil amelioration,” *Bioresour. Technol. Rep.*, vol. 27, p. 101893, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.biteb.2024.101893.
- [36] C. Roth, “Micro-Gasification: Cooking with gas from biomass,” Eschborn, Jan. 2011.
- [37] P. Apáez Barrios, J. A. S. Escalante Estrada, and M. T. Rodríguez González, “Crecimiento y rendimiento del frijol chino en función del tipo de espaldera y clima,” *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 13, no. 3, pp. 307–315, 2011.
- [38] F. P. Gardner, R. B. Pearce, and R. L. Mitchell, “Physiology of crop plants,” *Blackwell Publishing Company*, 2003.
- [39] C. Setter, F. T. M. Silva, M. R. Assis, C. H. Ataíde, P. F. Trugilho, and T. J. P. Oliveira, “Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions,” *Fuel*, vol. 261, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2019.116420.
- [40] T. Guimarães, A. F. De Oliveira, R. P. Lopes, and A. P. De Carvalho Teixeira, “Biochars obtained from arabica coffee husks by a pyrolysis process: Characterization and application in Fe(ii) removal in aqueous systems,” *New Journal of Chemistry*, vol. 44, no. 8, pp. 3310–3322, Feb. 2020, doi: 10.1039/c9nj04144c.
- [41] P. Suraj, S. Sreekumar, P. Arun, and C. Muraleedharan, “Feasibility study of coffee husk char-derived carbon dots to enhance solar photovoltaic-thermal applications,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 179, May 2024, doi: 10.1016/j.jaap.2024.106509.
- [42] M. A. R. Lopez *et al.*, “Mechanisms of Phenol Adsorption on Banana Leaves and Coffee Husk Biochars,” *ACS Omega*, vol. 10, no. 16, pp. 15989–16005, Apr. 2025, doi: 10.1021/acsomega.4c07665.
- [43] J. Paredes, V. Pretell, A. Pilco, W. Ramos, and C. Ubillas, “Characterization of Two Lignocellulosic Biomasses Coffea Arabica L. for the production of Biochar,” in *Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2022. doi: 10.18687/LACCEI2022.1.1.344.

-
- [44] S. Poyilil, A. Palatel, and M. Chandrasekharan, “Physico-chemical characterization study of coffee husk for feasibility assessment in fluidized bed gasification process,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 34, pp. 51041–51053, Jul. 2022, doi: 10.1007/s11356-021-17048-7.
- [45] N. Kiggundu and J. Sittamukyoto, “Pyrolysis of Coffee Husks for Biochar Production,” *J. Environ. Prot. (Irvine, Calif.)*, vol. 10, no. 12, pp. 1553–1564, 2019, doi: 10.4236/jep.2019.1012092.
- [46] M. Gholizadeh, S. Meca, S. Zhang, F. Clarens, and X. Hu, “Understanding the dependence of biochar properties on different types of biomass,” *Waste Management*, vol. 182, pp. 142–163, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2024.04.011.
- [47] T. Van Limbergen *et al.*, “Characterisation of Two Wood-Waste and Coffee Bean Husk Biochars for the Removal of Micropollutants from Water,” *Front. Environ. Sci.*, vol. 10, Mar. 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.814267.
- [48] N. T. Vu and K. U. Do, “Insights into adsorption of ammonium by biochar derived from low temperature pyrolysis of coffee husk,” *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 13, no. 3, pp. 2193–2205, Feb. 2023, doi: 10.1007/s13399-021-01337-9.
- [49] V. Zungu, L. Hadebe, P. Mpungose, I. Hamza, J. Amaku, and B. Gumbi, “Fabrication of Biochar Materials from Biowaste Coffee Grounds and Assessment of Its Adsorbent Efficiency for Remediation of Water-Soluble Pharmaceuticals,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 5, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14052931.
- [50] J. N. Njeri, E. W. Nthiga, and M. Gerald, “The Efficacy of Coffee Husks Biochar in the Adsorption of Methyl Red from Textile Dyeing Wastewater,” *International Journal of Scientific Research in Chemical Sciences*, vol. 10, no. 4, pp. 1–09, 2023, doi: 10.26438/ijsrcs/v10i4.19.
- [51] M. M. Afessa, F. E. Olu, W. S. Geleta, S. S. Legese, and A. V. Ramayya, “Unlocking the potential of biochar derived from coffee husk and khat stem for catalytic tar cracking during biomass pyrolysis: characterization and evaluation,” *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 15, no. 7, pp. 11011–11026, Apr. 2025, doi: 10.1007/s13399-024-05957-9.
- [52] K. B. Cantrell, P. G. Hunt, M. Uchimiya, J. M. Novak, and K. S. Ro, “Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar,” *Bioresour. Technol.*, vol. 107, pp. 419–428, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2011.11.084.

-
- [53] L. B. Cangussu, J. C. Melo, A. S. Franca, and L. S. Oliveira, “Chemical characterization of coffee husks, a by-product of *coffea arabica* production,” *Foods*, vol. 10, no. 12, Dec. 2021, doi: 10.3390/foods10123125.
- [54] R. Janu *et al.*, “Biochar surface functional groups as affected by biomass feedstock, biochar composition and pyrolysis temperature,” *Carbon Resources Conversion*, vol. 4, pp. 36–46, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.crcon.2021.01.003.
- [55] G. Balmuk, M. Videgain, J. J. Manyà, G. Duman, and J. Yanik, “Effects of pyrolysis temperature and pressure on agronomic properties of biochar,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 169, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jaap.2023.105858.
- [56] M. S. Reza *et al.*, “Biochar characterization of invasive *Pennisetum purpureum* grass: effect of pyrolysis temperature,” *Biochar*, vol. 2, no. 2, pp. 239–251, Jun. 2020, doi: 10.1007/s42773-020-00048-0.
- [57] J. Xu *et al.*, “Raman spectroscopy of biochar from the pyrolysis of three typical Chinese biomasses: A novel method for rapidly evaluating the biochar property,” *Energy*, vol. 202, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117644.
- [58] A. Mukherjee, B. R. Patra, J. Podder, and A. K. Dalai, “Synthesis of Biochar From Lignocellulosic Biomass for Diverse Industrial Applications and Energy Harvesting: Effects of Pyrolysis Conditions on the Physicochemical Properties of Biochar,” Jun. 03, 2022, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fmats.2022.870184.
- [59] S. Bolan *et al.*, “Biochar modulating soil biological health: A review,” Mar. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169585.
- [60] Y. Fang, B. Singh, and B. P. Singh, “Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils,” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 80, pp. 136–145, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.soilbio.2014.10.006.
- [61] P. Mendioroz, M. A. Volpe, and A. I. Casoni, “Biochar application for soil amendment and water remediation: A critical review,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 193, p. 107417, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.jaap.2025.107417.
- [62] T. J. Purakayastha, T. Bera, S. Dey, P. Pande, S. Kumari, and A. Bhowmik, “Biochar aided priming of carbon and nutrient availability in three soil orders of India,” *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-56618-w.

-
- [63] X. Yang *et al.*, “A critical review of biochar as an environmental functional material in soil ecosystems for migration and transformation mechanisms and ecological risk assessment,” Jun. 01, 2024, *Academic Press*. doi: 10.1016/j.jenvman.2024.121196.
- [64] Y. Wu, Z. Jiang, L. Ma, X. Wu, Q. Lu, and S. Zang, “Enhanced stability of bacterial co-occurrence networks to biochar amendment reduces soil carbon mineralization in permafrost-affected soils,” *Int. Biodeterior. Biodegradation*, vol. 207, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.ibiod.2025.106224.
- [65] M. Bednik, A. Medyńska-Juraszek, and I. Ćwieląg-Piasecka, “Biochar and Organic Fertilizer Co-Application Enhances Soil Carbon Priming, Increasing CO₂ Fluxes in Two Contrasting Arable Soils,” *Materials*, vol. 16, no. 21, Nov. 2023, doi: 10.3390/ma16216950.
- [66] J. D. Henao Rico, “Informe de resultados - Pruebas microbiológicas,” Medellín, 2025.
- [67] R. R. Domingues *et al.*, “Enhancing cation exchange capacity of weathered soils using biochar: Feedstock, pyrolysis conditions and addition rate,” *Agronomy*, vol. 10, no. 6, Jun. 2020, doi: 10.3390/agronomy10060824.
- [68] W. Song and M. Guo, “Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 94, pp. 138–145, 2012, doi: 10.1016/j.jaap.2011.11.018.
- [69] X. Chen, L. Liu, Q. Yang, H. Xu, G. Shen, and Q. Chen, “Optimizing Biochar Application Rates to Improve Soil Properties and Crop Growth in Saline–Alkali Soil,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 6, Mar. 2024, doi: 10.3390/su16062523.
- [70] F. S. Shikha, M. M. Rahman, N. Sultana, M. A. Mottalib, and M. Yasmin, “Effects of biochar and biofertilizer on groundnut production: a perspective for environmental sustainability in Bangladesh,” *Carbon Research*, vol. 2, no. 1, Dec. 2023, doi: 10.1007/s44246-023-00043-7.
- [71] D. Egamberdieva, L. Li, H. Ma, S. Wirth, and S. D. Bellingrath-Kimura, “Soil amendment with different maize biochars improves chickpea growth under different moisture levels by improving symbiotic performance with mesorhizobium ciceri and soil biochemical properties to varying degrees,” *Front. Microbiol.*, vol. 10, no. OCT, 2019, doi: 10.3389/fmicb.2019.02423.

-
- [72] L. Tian, G. Shao, Y. Gao, E. Song, and J. Lu, “Effects of Biochar on Soil Organic Carbon in Relation to Soil Nutrient Contents, Climate Zones and Cropping Systems: A Chinese Meta-Analysis,” *Land (Basel)*., vol. 13, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.3390/land13101608.

ANEXOS

Anexo A. Diseño y elaboración del microgasificador de tiro ascendente

El microgasificador cuenta con 3 partes principales de operación: Cilindro externo, cilindro interno y chimenea. Por consiguiente, a continuación, se presentan las dimensiones de cada segmento y el diseño del microgasificador utilizado en este trabajo:



Fig 26. Diseño microgasificador tiro ascendente A) Software AutoCAD B) Diseño real utilizado

El cilindro interior cuenta con orificios primarios y secundarios tal como se expresa en la Fig. 3, la cual ilustra el funcionamiento del microgasificador y su principio teórico. Cabe resaltar, que cada uno de estos orificios tienen un diámetro de 0,7 cm c/u y se encuentran en la parte superior de la cara externa del cilindro interior y en la cara inferior del mismo.

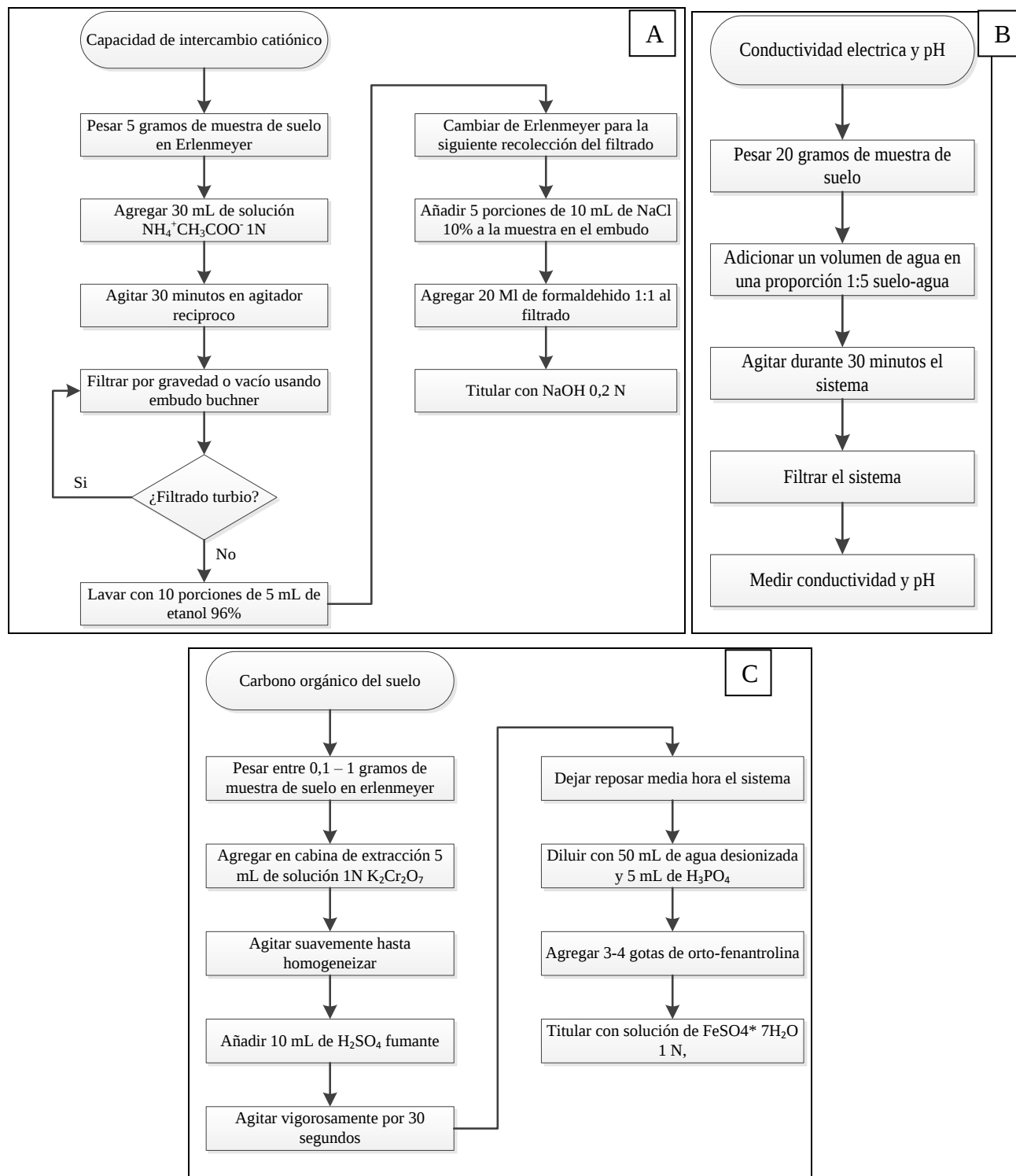
Anexo B. Diagramas de flujo (Normativas NTC) – Caracterización fisicoquímica del suelo

Fig 27. Diagramas de flujo según normativa NTC **A)** Capacidad de intercambio catiónico (CIC) **B)** Carbono orgánico del suelo (COS) **C)** Conductividad eléctrica y pH

Anexo C. Desarrollo de plántulas de frijol Uribe Rosado en cámara climática

Fig 28. Plántulas de frijol Uribe rosado en cámara climática **A)** Semanas iniciales del ciclo de cultivo **B)** Semanas intermedias del ciclo de cultivo

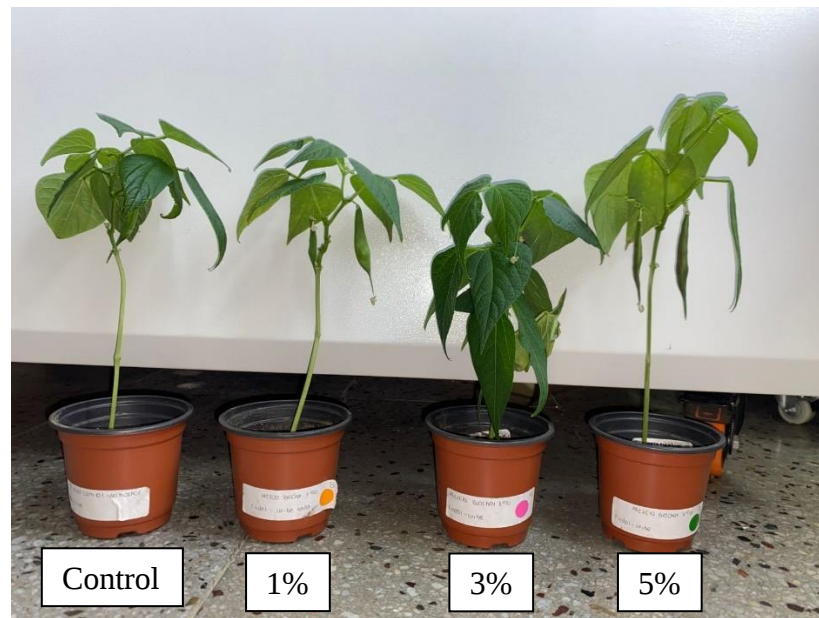
Anexo D. Comparación ilustrativa entre plántulas de frijol Uribe Rosado con tratamientos de biochar y el control

Fig 29. Comparación visual y agronómica entre tratamientos de biochar y control