



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Rendimiento y estado nutricional del café (*Coffea arabica* L.) en respuesta a aplicación de biocarbón**

**Alefsi David Sánchez Reinoso**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía  
Bogotá, Colombia  
2022



# **Rendimiento y estado nutricional del café (*Coffea arabica* L.) en respuesta a aplicación de biocarbón**

**Alefsi David Sánchez Reinoso**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Doctor en Ciencias Agrarias**

Director (a):

Ph.D. Hermann Restrepo Díaz

Codirector (a):

Ph.D. Leonardo Lombardini

Línea de Investigación:

Fisiología Vegetal

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía

Bogotá, Colombia

2022



*A mis padres Fanny Reinoso Mosquera y José Crispín Sánchez Rincón, por sus consejos e incondicional apoyo en cada decisión que he tomado. A mis hermanos y amigos que me acompañaron este proceso de formación personal y académica. A Dios por darme la salud, fortaleza, entereza y talento para alcanzar mis objetivos. A todos mis seres queridos, conocidos y personas que ya no nos acompañan pero que sellaron su esencia en mi vida.*



# Declaración de obra original

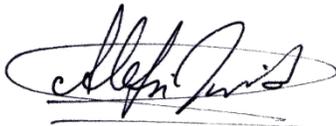
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Alefsi David Sánchez Reinoso

Fecha 28/06/2022

**Fecha: 28 de junio del 2022**

# Agradecimientos

Quiero dar las gracias a todas aquellas personas involucradas en el desarrollo de esta tesis y me brindaron una experiencia única e inolvidable.

A la Escuela de Posgrados de la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Universidad Nacional de Colombia, mi alma máter.

A los profesores Hermann Restrepo, Leonardo Lombardini, Carlos Zuluaga, Augusto Ramírez, Edgar Avila y Jesús Hernán Camacho por su apoyo y consejos durante mi trabajo en el doctorado.

Al Laboratorio de Análisis Físicoquímico del Instituto de Ciencia y Tecnología de Alimentos (ICTA) y al profesor Carlos Fuenmayor por su ayuda en el desarrollo de uno de los objetivos del trabajo.

A mis compañeros Alejandra Colmenares, Felipe Reyes, Cristian Chávez y Daniel Pantoja por su apoyo en las etapas del desarrollo de la tesis.

A la Asociación De Productores De Frutas Chaparral Hermosas – APROFRUCH y especialmente al señor José Crispín Sánchez por su inmensa colaboración y apoyo en contrapartida para el establecimiento de la investigación.

A Eliana Camacho y a “Erase Una Vez, Café de Especialidad” por sus asesorías en la etapa final de la investigación.

A los laboratoristas y personal administrativo por su generoso apoyo prestado en el desarrollo de la investigación.

A la Gobernación del Tolima, el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS, convocatoria 755 del 2016, para la formación de capital humano de alto nivel para Tolima, Colombia) actualmente Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación (Minciencias); y al Grupo de Investigación en Ciencias del Suelo – GRICIS avalado por la Universidad del Tolima.

## Resumen

### Rendimiento y estado nutricional del café (*Coffea arabica* L.) en respuesta a aplicación de biocarbón

El café de Colombia es reconocido mundialmente por su sabor y aroma suave. Su cultivo genera una gran cantidad de residuos como la pulpa fresca, que conlleva a problemas medioambientales, sanitarios y económicos. La obtención de biocarbón (BC) por pirólisis de la pulpa de café y su incorporación al suelo puede ser un complemento a la nutrición mineral del cultivo. El objetivo fue evaluar el efecto de la aplicación de biocarbón obtenido de pulpa de café sobre la fisiología y el comportamiento agronómico del cultivo de café variedad Castillo el Tambo (*Coffea arabica* L.). La investigación fue desarrollada en dos etapas: i) vegetativa, usando plantas de tres meses de edad, realizada en condiciones de invernadero; y ii) producción, usando un cultivo comercial de café de tres años de edad, realizada en Chaparral Tolima. Cuatro dosis de BC (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y cuatro niveles de fertilización química (FQ) (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) fueron evaluadas. Tres grupos de variables fueron registrados durante el experimento: i) parámetros fisiológicos de plántulas y árboles de café; ii) características físicas y químicas del suelo en un cultivo comercial de café; y iii) parámetros de calidad de granos tostados y bebidas de café. Los resultados indicaron que: a) en invernadero, un efecto positivo se encontró en plantas con 8 t ha<sup>-1</sup> BC y niveles de fertilización del 66 y 100%. b) Un efecto positivo fue observado en árboles de café tratados con 8 t ha<sup>-1</sup> BC y 100%. c) 16 t ha<sup>-1</sup> BC favoreció el pH, densidad aparente, estado de agregación y respiración microbiana del suelo en comparación con 0 t ha<sup>-1</sup> BC. d) Aplicaciones de 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC y 66%-100% fertilización química registraron mayor sensibilidad a los compuestos aromáticos de granos tostados de café en la nariz electrónica. Enmiendas de BC entre 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> y FQ entre el 66% y 100% incrementó el contenido de SST, redujo el pH e incrementó la acidez titulable en bebidas de granos tostados de café. En conclusión, 8 t ha<sup>-1</sup> BC de pulpa de café puede ser una alternativa para complementar la nutrición de plántulas y árboles de café. Aplicaciones entre 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC pueden apoyar las estrategias de manejo de suelos cafeteros y ayuda al aprovechamiento de residuos sólidos. El BC como un complemento a la fertilización química mostró un efecto positivo sobre el perfil aromático obtenido para los granos tostados de café y atributos de calidad en taza.

**Palabras clave:** pirólisis, enmienda del suelo, nutrición mineral, rendimiento del cultivo, calidad en taza.

## Abstract

### Yield and nutritional status of coffee (*Coffea arabica* L.) in response to biochar application

Colombian coffee is recognized worldwide for its mild flavor and aroma. Its cultivation generates a large amount of waste such as fresh pulp, which leads to environmental, health and economic problems. Obtaining biochar (BC) by pyrolysis of coffee pulp and its incorporation to the soil can be a complement to the crop mineral nutrition. The objective was to evaluate the effect of the application of biochar obtained from coffee pulp on the physiology and agronomic performance of the Castillo el Tambo variety coffee crop (*Coffea arabica* L.). The research was developed in two stages: i) vegetative, using three-month-old plants, carried out under greenhouse conditions; and ii) production, using a three-year-old commercial coffee crop, carried out in Chaparral Tolima. Four doses of BC (0, 4, 8 and 16 t ha<sup>-1</sup>) and four levels of chemical fertilization (CF) (0%, 33%, 66% and 100% of the nutritional requirements) were evaluated. Three groups of variables were recorded during the experiment: i) physiological parameters of coffee seedlings and trees; ii) physical and chemical characteristics of the soil in a commercial coffee crop; and iii) quality parameters of roasted beans and coffee beverages. The results indicated that: a) in the greenhouse, a positive effect was found in plants with 8 t ha<sup>-1</sup> BC and fertilization levels of 66 and 100%. b) A positive effect was observed in coffee trees treated with 8 t ha<sup>-1</sup> BC and 100%. c) 16 t ha<sup>-1</sup> BC favored the pH, apparent density, state of aggregation and microbial respiration of the soil compared to 0 t ha<sup>-1</sup> BC. d) Applications of 8 and 16 t ha<sup>-1</sup> BC and 66%-100% chemical fertilization registered greater sensitivity to the aromatic compounds of roasted coffee beans in the electronic nose. Amendments of BC between 8 and 16 t ha<sup>-1</sup> and CF between 66% and 100% increased the content of TSS, reduced the pH and increased the titratable acidity in beverages of roasted coffee beans. In conclusion, 8 t ha<sup>-1</sup> BC of coffee pulp can be an alternative to supplement the nutrition of coffee seedlings and trees. Applications between 8 and 16 t ha<sup>-1</sup> BC support coffee soil management strategies and help the use of solid waste. BC as a complement to chemical fertilization showed a positive effect on the aromatic profile obtained for roasted coffee beans and cup quality attributes.

**Keywords:** pyrolysis, soil amendment, mineral nutrition, crop yield, cup quality.

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>X</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XIX</b>
<b>Lista de símbolos y abreviaturas</b> .....	<b>XXI</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo 1 Marco teórico</b> .....	<b>5</b>
1.1 Origen y distribución del cultivo de café .....	5
1.2 Crecimiento y desarrollo de la planta de café .....	5
1.2.1 Fase vegetativa .....	5
1.2.2 Fase reproductiva .....	6
1.2.3 Desarrollo del fruto .....	6
1.3 Componentes de rendimiento del cultivo de café .....	7
1.4 La nutrición del cultivo de café .....	8
1.4.1 La nutrición sobre el comportamiento agronómico del café .....	8
1.4.2 Tendencias de la nutrición del cultivo de café .....	9
1.5 El biocarbón como alternativa para la agricultura .....	10
1.5.1 Producción de biocarbón y factores que lo regulan.....	11
1.5.2 El suelo en respuesta a la aplicación de biocarbón.....	11
1.5.3 La fisiología de las plantas cultivadas en respuesta a la aplicación de biocarbón .....	14
1.6 Bibliografía .....	18
<b>Capítulo 2 Respuesta fisiológica de plántulas de café (<i>Coffea arabica</i> L. var. Castillo) a la aplicación de biocarbón en condiciones de déficit hídrico</b> .....	<b>29</b>
2.1 Introducción .....	30
2.2 Materiales y métodos .....	33
2.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento .....	33
2.2.2 Tratamientos de biocarbón y déficit hídrico .....	34
2.2.3 Parámetros de intercambio gaseoso de la hoja .....	35
2.2.4 Área foliar y acumulación de materia seca .....	36
2.2.5 Clorofilas y eficiencia de la clorofila a .....	36
2.2.6 Conductividad hidráulica de la raíz y variables de raíz .....	37
2.2.7 Análisis de datos .....	37

2.3 Resultados .....	38
2.3.1 Parámetros de intercambio gaseoso de la hoja y estatus hídrico de la planta.	38
2.3.2 Contenido relativo de clorofilas y fluorescencia de la clorofila a .....	43
2.3.3 Acumulación de materia seca y eficiencia del área unitaria.....	46
2.3.4 Variables de raíz .....	49
2.4 Discusión.....	50
2.5 Bibliografía .....	54
<b>Capítulo 3 Respuesta fisiológica de plántulas de café (<i>Coffea arabica</i> L. var. Castillo) a diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización.....</b>	
3.1 Introducción.....	64
3.2 Materiales y métodos.....	68
3.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento .....	68
3.2.2 Tratamientos de biocarbón y niveles de fertilización .....	68
3.2.3 Parámetros de intercambio gaseoso de la hoja y conductividad hidráulica de la raíz	70
3.2.4 Crecimiento de la plántula (altura, tasa relativa de crecimiento, acumulación de materia seca y partición de asimilados.....	70
3.2.5 Clorofilas y eficiencia de la clorofila a.....	71
3.2.6 Diseño experimental y análisis de los datos .....	71
3.3 Resultados .....	72
3.3.1 Parámetros de intercambio gaseoso de la hoja y estatus hídrico de la planta.	72
3.3.2 Contenido relativo de clorofilas y fluorescencia de la clorofila a .....	74
3.3.3 Crecimiento: acumulación de materia seca, partición de asimilados y tasa relativa de crecimiento .....	75
3.3.4 Uso eficiente del agua y eficiencia agronómica.....	78
3.3.5 Análisis de componentes principales biplot (ACP).....	78
3.4 Discusión.....	80
3.5 Bibliografía .....	84
<b>Capítulo 4 Comportamiento fisiológico y estado nutricional de árboles de café (<i>Coffea arabica</i> L.) en respuesta a aplicaciones de biocarbón.....</b>	
4.1 Introducción.....	92
4.2 Materiales y métodos.....	95
4.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento .....	95
4.2.2 Tratamientos de biocarbón y niveles de fertilización .....	97
4.2.3 Conductancia estomática de la hoja.....	98
4.2.4 Clorofilas y fluorescencia de la clorofila a.....	98
4.2.5 Concentración foliar de macro y micro nutrientes.....	100
4.2.6 Recolección, rendimiento y eficiencia agronómica .....	100
4.2.7 Análisis de los datos .....	101
4.3 Resultados .....	104
4.3.1 Conductancia estomática, contenido relativo de clorofila y fluorescencia de la clorofila a .....	104
4.3.2 Concentración foliar de nutrientes.....	108
4.3.3 Rendimiento, eficiencia agronómica y análisis de componentes principales biplot	112
4.4 Discusión.....	117
4.5 Bibliografía .....	121

<b>Capítulo 5 La aplicación de biocarbón de pulpa de café mejora características físicas, químicas y biológicas de un suelo cafetero .....</b>	<b>129</b>
5.1 Introducción .....	130
5.2 Materiales y métodos .....	132
5.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento .....	132
5.2.2 Tratamientos de biocarbón y niveles de fertilización .....	133
5.2.3 Características físicas del suelo .....	134
5.2.4 Características químicas del suelo .....	135
5.2.5 Respiración microbiana del suelo .....	136
5.2.6 Análisis de los datos .....	137
5.3 Resultados .....	138
5.3.1 Efecto de cuatro dosis de BC (0, 4, 8 y 16 t ha <sup>-1</sup> ) sobre las características físicas del suelo .....	138
5.3.2 Características químicas del suelo .....	139
5.3.3 Respiración microbiana del suelo y análisis de componentes principales biplot	144
5.4 Discusión .....	147
5.5 Bibliografía .....	150
<b>Capítulo 6 Evaluación de compuestos volátiles de granos de café (<i>Coffea arabica</i> L.) en respuesta a aplicaciones de biocarbón usando una nariz electrónica. ....</b>	<b>155</b>
6.1 Introducción .....	156
6.2 Materiales y métodos .....	160
6.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento .....	160
6.2.2 Tratamientos de biocarbón y niveles de fertilización .....	160
6.2.3 Tostado y preparación de la bebida .....	162
6.2.4 Perfil aromático .....	162
6.2.5 Atributos de calidad de granos de café .....	164
6.2.6 Análisis de los datos .....	164
6.3 Resultados .....	164
6.3.1 Perfil aromático y análisis de correlación de Pearson .....	164
6.3.2 Atributos de calidad de grano de café .....	171
6.4 Discusión .....	174
6.5 Bibliografía .....	177
<b>Capítulo 7 Discusión final .....</b>	<b>182</b>
7.1 Bibliografía .....	185
<b>Capítulo 8 Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>189</b>
8.1 Conclusiones .....	189
8.2 Recomendaciones .....	191
<b>Capítulo 9 Modelo conceptual .....</b>	<b>192</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>197</b>
Resumen artículo de revisión .....	197

## Lista de figuras

Pág.

- Figura 1.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y riego reducido (25, 50, 75 y 90% de las necesidades de evapotranspiración) sobre la conductancia estomática ( $g_s$ ) en hojas de plántulas de café establecidas en macetas (A) y tubos (B) en cuatro puntos de muestreo (30, 40, 50 y 60 días después de trasplante (DAT)). Las barras representan  $\pm$  error estándar (macetas n = 4; tubos n = 3). Letras mayúsculas se refieren a diferencias entre la condición de estrés bajo cada periodo de reducción del riego. Letras minúsculas se refieren a diferencias entre dosis de biocarbón bajo cada periodo de reducción del riego. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$  ..... 41
- Figura 2.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y riego reducido (90% de las necesidades de evapotranspiración) sobre la transpiración total a través del experimento (A) y conductancia hidráulica de raíz en plántulas de café a los 60 DAT (B). Los puntos o barras representan la media de cuatro plantas del ensayo de macetas  $\pm$  error estándar. En la Figura A, las letras mayúsculas se refieren a diferencias entre la condición de estrés bajo cada periodo de reducción del riego; mientras, las letras minúsculas indican diferencias entre dosis de biocarbón bajo cada periodo de reducción del riego. En la Figura B, las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$ ..... 42
- Figura 3.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y riego reducido (90% disminución del riego) sobre la Fotosíntesis neta ( $F_n$ ) (A) y Eficiencia de la carboxilación ( $F_n/C_i$ ) (B) en plántulas de café del experimento establecidos en tubos de PVC a los 60 DAT. Las barras representan la media de tres plantas  $\pm$  error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$ ..... 43
- Figura 4.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y riego reducido (25, 50, 75 y 90% de las necesidades de evapotranspiración) sobre el contenido relativo de clorofila expresado como unidades At-leaf (A y B), la eficiencia máxima del quantum en el PSII ( $F_v/F_m$ ) (C y D) y el decrecimiento de la  $F_v/F_m$  (DQE) a los 60 DAT (90% disminución del riego) (E y F). Las figuras A, C y E representan el ensayo en macetas; mientras, las figuras B, D y F son el ensayo en tubos. Los puntos o barras representan la media de cuatro plantas del ensayo de macetas y de tres plantas del ensayo de tubos  $\pm$  error estándar. En las figuras A, B, C y D las letras mayúsculas se refieren a diferencias entre la condición de estrés bajo cada periodo de reducción del riego; mientras, las letras minúsculas indican diferencias entre dosis de biocarbón bajo cada periodo de reducción del riego. En la Figura E y F, las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$  ..... 45

**Figura 5.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y riego reducido sobre la acumulación de materia seca en diferentes órganos en plántulas de café a los 60 DAT (90% disminución del riego): A y D) Peso seco total; B y E) Peso seco de la parte aérea; C y F) Peso seco de la raíz. Las figuras A, C y E representan el ensayo en macetas; mientras, las figuras B, D y F son el ensayo en tubos. Las barras representan la media de cuatro plantas del ensayo de macetas y de tres plantas del ensayo de tubos ± error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$  ..... 47

**Figura 6.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y riego reducido (25, 50, 75 y 90% de las necesidades de evapotranspiración) sobre el Uso eficiente del agua (WUE) (A y B) y la Unidad de Eficiencia del Área (UAE) (C y D) en plantas de plántulas de café a los 60 DAT (90% disminución del riego). Las figuras A y C representan el ensayo en macetas; mientras, las figuras B y D son el ensayo en tubos. Las barras representan la media de cuatro plantas del ensayo de macetas y de tres plantas del ensayo de tubos ± error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$  ..... 48

**Figura 7.** Gráfica tridimensional (longitud de raíz, peso seco de la raíz y volumen de raíz) para plántulas de café (*Coffea arabica* L.) en condiciones de déficit hídrico del experimento realizado en tubos de PVC a los 60 DAT (90% disminución del riego). B: dosis de biocarbón; C: Control; S: Estrés por riego reducido. Los datos corresponden a la media de tres puntos de datos. .... 49

**Figura 8.** Biplot de Análisis de Componente Principal (PCA) de diferentes variables fisiológicas en plántulas de café (*Coffea arabica* L.) bajo condiciones de estrés por déficit hídrico del experimento realizado en tubos de PVC. RDW: peso seco de la raíz; RV: volumen de raíz; RL: longitud de raíz; Chl: Contenido de clorofilas At-leaf; SDW: peso seco del tallo; TDW: peso seco total; ShDW: peso seco de la parte aérea; Gs: conductancia estomática; UAE: eficiencia del área unitaria; PSH: peso seco de las hojas; Fn: fotosíntesis neta; Fn/Ci: Eficiencia de carboxilación; AF: área foliar; Fv/Fm: eficiencia máxima en el quantum del PSII. C: Control; S: Estrés por déficit hídrico. B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>..... 51

**Figura 9.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre la conductancia estomática ( $g_s$ ) en hojas (A) y conductancia hidráulica de raíz en plántulas de café (B) a los 100 días después de trasplante (DDT). Los puntos representan la media de cinco valores ( $n = 5$ ) ± error estándar. Letras mayúsculas se refieren a diferencias entre las dosis de biocarbón. Letras minúsculas se refieren a diferencias entre niveles de fertilización. Letras similares indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$ . .... 73

**Figura 10.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre el contenido relativo de clorofila expresado como unidades at-Leaf (A) y la eficiencia

máxima del quantum en el PSII (relación  $F_v/F_m$ ) (B) a los 100 DDT. Las barras representan la media de cinco plantas  $\pm$  error estándar. Letras similares indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$ . ..... 74

**Figura 11.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre la materia seca total (A) y partición de asimilados (B) a los 100 DDT. Las barras representan la media de cinco plantas  $\pm$  error estándar. (A) Letras similares indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0.05$ . (B) Letras similares entre barras de color blanco indican que las medias de la partición de asimilados en hojas no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0.05$ ; letras similares entre barras de color gris indican que las medias de la partición de asimilados en tallos no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0.05$ .); letras similares entre barras de color negro indican que las medias de la partición de asimilados en raíces no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$ . ..... 76

**Figura 12.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre la altura de la planta (A) y la Tasa Relativa de Crecimiento (B) a los 100 DDT. Las barras representan la media de cinco plantas  $\pm$  error estándar. Letras similares indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$ . ..... 77

**Figura 13.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre el Uso Eficiente del Agua (A) y Eficiencia Agronómica (B) a los 100 DDT. Las barras representan la media de cinco plantas  $\pm$  error estándar. Letras similares indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$ . ..... 79

**Figura 14.** Análisis de Componente Principales (PCA) de diferentes variables fisiológicas en plántulas de café (*Coffea arabica* L.) bajo diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización química. Chl: Contenido de clorofilas at-Leaf; Gs: Conductancia estomática de la hoja; Altura: altura de la planta;  $F_v/F_m$ : eficiencia máxima en el quantum del PSII; WUE: Uso Eficiente del Agua; TDW: peso seco total; AE: Eficiencia Agronómica. B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>. F0: 0% de los requerimientos nutricionales; F33: 33% de los requerimientos nutricionales; F66: 66% de los requerimientos nutricionales; F100: 100% de los requerimientos nutricionales. .... 80

**Figura 15.** Registros de precipitación y radiación solar (A), humedad relativa (B), temperatura máxima y mínima (C) en el experimento de Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) ubicado en la vereda Aguabonita, Corregimiento de las Hermosas, Chaparral Tolima. Los datos se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana [Chaparral (latitud 3° 37' 35,193" N, longitud 75° 32' 35,483" O, altitud: 914 m.s.n.m)] de Meteoblue weather ..... 96

**Figura 16.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre conductancia estomática ( $g_s$ ) (A y B), contenido relativo de clorofila (lecturas at-Leaf) (C y D) y eficiencia máxima del quantum en el PSII ( $F_v/F_m$ ) (E y F) en 2019 y 2020. Las barras representan la media de cuatro bloques  $\pm$  error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$  ..... 105

**Figura 17.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre rendimiento del cultivo en café pergamino seco (CPS) ( $g_s$ ) (A y B) y Eficiencia Agronómica (EA) (C y D) en 2019 y 2020. Las barras representan la media de cuatro bloques  $\pm$  error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$ ..... 113

**Figura 18.** Biplot de Análisis de Componente Principal (PCA) de diferentes variables fisiológicas en plántulas de café (*Coffea arabica* L.) bajo diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización. Chl: Contenido de clorofilas at-Leaf;  $g_s$ : Conductancia estomática de la hoja;  $F_v/F_m$ : eficiencia máxima en el quantum del PSII; CPS: rendimiento en café pergamino seco; PCG: peso de cien granos; EA: eficiencia agronómica. Contenido de nutrientes en la hoja: N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: Magnesio; Cu: cobre; Fe: hierro; Mn: manganeso; B: boro; y Zn: zinc. B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>. F0: 0% de los requerimientos nutricionales; F33: 33% de los requerimientos nutricionales; F66: 66% de los requerimientos nutricionales; F100: 100% de los requerimientos nutricionales. **A)** Periodo de evaluación del año 2019. **B)** Periodo de evaluación del año 2020..... 116

**Figura 19.** Registros de humedad relativa, precipitación, temperatura máxima y mínima (A) y radiación solar (B) en el experimento de Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) ubicado en la vereda Aguabonita, Corregimiento de las Hermosas, Chaparral Tolima. Los datos se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana [Chaparral (latitud 3° 37' 35,193" N, longitud 75° 32' 35,483" O, altitud: 914 m.s.n.m.)] de Meteoblue weather. .... 138

**Figura 20.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre la respiración microbiana del suelo en el cultivo de café en los años 2019 (A) y 2020 (B). Los putos representan  $\pm$  error estándar ( $n = 4$ ). Las barras representan la media de cuatro bloques  $\pm$  error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$ ..... 145

**Figura 21.** Biplot de Análisis de Componente Principal (PCA) de diferentes variables de suelo del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) bajo diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización. Respiración: respiración microbiana del suelo; pH: pH del suelo; CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva; Al: acidez intercambiable; contenido de

nutrientes en el suelo: CO: carbono orgánico; Nest: nitrógeno estimado; Ca: calcio; Mg: magnesio; K: potasio; Na: sodio; P: contenido de fósforo; Cu: cobre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Zn: zinc y, B: boro. B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>. F0: 0% de los requerimientos nutricionales; F33: 33% de los requerimientos nutricionales; F66: 66% de los requerimientos nutricionales; F100: 100% de los requerimientos nutricionales. **A)** Periodo de evaluación del año 2019. **B)** Periodo de evaluación del año 2020. .... 146

**Figura 22.** Biplot de Análisis de Componente Principal (PCA) de los sensores de la Nariz Electrónica en granos tostados de café (*Coffea arabica* L.) bajo diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización para la cosecha del año 2019: W1C (aromático), W3C (aromático), W5C (arom-aliph), W1S (metano amplio), W2S (alcohol amplio), W3S (metanoalifado), W5S (rango amplio), W6S (hidrógeno), W1W (azufre orgánico), W2W (sulfhidrato). B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>. F0: 0% de los requerimientos nutricionales; F33: 33% de los requerimientos nutricionales; F66: 66% de los requerimientos nutricionales; F100: 100% de los requerimientos nutricionales. .... 166

**Figura 23.** Biplot de Análisis de Componente Principal (PCA) de los sensores de la Nariz Electrónica en granos tostados de café (*Coffea arabica* L.) bajo diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización para la cosecha del año 2020: W1C (aromático), W3C (aromático), W5C (arom-aliph), W1S (metano amplio), W2S (alcohol amplio), W3S (metanoalifado), W5S (rango amplio), W6S (hidrógeno), W1W (azufre orgánico), W2W (sulfhidrato). B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>. F0: 0% de los requerimientos nutricionales; F33: 33% de los requerimientos nutricionales; F66: 66% de los requerimientos nutricionales; F100: 100% de los requerimientos nutricionales. .... 167

**Figura 24.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre los sólidos solubles totales (SST) de la bebida de granos de café en los años 2019 (A) y 2020 (B). Los putos representan  $\pm$  error estándar (n = 4). Las barras representan la media de cuatro bloques  $\pm$  error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$  ..... 171

**Figura 25.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre el pH de la bebida de granos de café en los años 2019 (A) y 2020 (B). Los putos representan  $\pm$  error estándar (n = 4). Las barras representan la media de cuatro bloques  $\pm$  error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$  ..... 172

**Figura 26.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre la acidez titulable de la bebida de granos de café en los años 2019 (A) y 2020 (B). Los putos representan  $\pm$  error estándar (n = 4). Las barras representan la media de cuatro

bloques  $\pm$  error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$ .....173

**Figura 27.** Modelo conceptual del comportamiento fisiológico de las plantas de café (*Coffea arabica* L.) variedad Castillo el Tambo en respuesta a aplicaciones de biocarbón .....195

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Principales respuestas de la aplicación de biocarbón sobre propiedades físicas y químicas del suelo.....	13
<b>Tabla 2.</b> Efectos de la aplicación de biocarbón al suelo sobre variables fisiológicas de plantas cultivadas.....	16
<b>Tabla 3.</b> Resumen del análisis de varianza entre diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha <sup>-1</sup> ), niveles de riego (100% evapotranspiración vs riego reducido) y fechas de muestreo (30, 40, 50 y 60 días después de trasplante) sobre las variables fisiológicas de las plántulas de café.....	39
<b>Tabla 4.</b> Resumen del análisis de la varianza del efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha <sup>-1</sup> ) y niveles de riego (100% evapotranspiración vs riego reducido) sobre variables fisiológicas a los 60 días después del trasplante en los ensayos establecidos en macetas y en tubos.....	40
<b>Tabla 5.</b> Resumen del análisis de la varianza del efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha <sup>-1</sup> ) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre variables fisiológicas a los 100 días después del trasplante. ....	72
<b>Tabla 6.</b> Resumen del análisis de la varianza del efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha <sup>-1</sup> ) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre las variables fisiológicas (conductancia estomática de la hoja, contenido de clorofila, eficiencia máxima de la clorofila a, rendimiento y eficiencia agronómica) y estado nutricional de los árboles de café durante dos años de experimentación (2019 y 2020). ....	103
<b>Tabla 7.</b> Resumen de análisis de varianza y contrastes polinómicos en variables como el Flujo lineal de electrones (LEF), Quenching no fotoquímico total (NPQ <sub>t</sub> ), Rendimiento del quantum en PSII en condiciones de luz (Phi2), Fracción de luz perdida a través de procesos inhibidores de la fotosíntesis no regulados (PniNO), Fracción de luz dedicada a la disipación no fotoquímica (PniNPQ); Centros activos en PS1 (PS1 <sub>Centros Activos</sub> ), Centros abiertos en PS1 (PS1 <sub>Centros Abiertos</sub> ), Centros sobre reducidos en PS1 (PS1 <sub>Centros Sobre Reducidos</sub> ),	

Centros oxidados en PS1 (PS1 <sub>Centros Oxidados</sub> ) en hojas de árboles de café tratadas con cuatro dosis de biocarbón y diferentes niveles de fertilización para el periodo de evaluación del año 2020.....	107
<b>Tabla 8.</b> Contenido de macronutrientes en hojas de árboles de café tratadas con cuatro dosis de biocarbón y diferentes niveles de fertilización durante dos años de experimentación (2019 y 2020).....	110
<b>Tabla 9.</b> Contenido de micronutrientes en hojas de árboles de café tratadas con cuatro dosis de biocarbón y diferentes niveles de fertilización durante dos años de experimentación (2019 y 2020).....	111
<b>Tabla 10.</b> Coeficiente de correlación de Pearson ( <i>r</i> ) entre las diferentes variables fisiológicas, rendimiento y contenido foliar de nutrientes en respuesta a la aplicación de biocarbón y niveles de fertilización en árboles de café.....	114
<b>Tabla 11.</b> Análisis de contrastes polinómicos de variables de física de suelos en el cultivo de café en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha <sup>-1</sup> ) para el periodo de evaluación del año 2020.....	141
<b>Tabla 12.</b> Análisis de contrastes polinómicos del pH, el contenido de carbono orgánico (CO), nitrógeno estimado (N <sub>est</sub> ), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na) y acidez intercambiable (AI) en el suelo del cultivo de café en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha <sup>-1</sup> ) durante dos años de experimentación (2019 y 2020).....	142
<b>Tabla 13.</b> Análisis de contrastes polinómicos de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), el contenido de fósforo (P), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y boro (B) en el suelo del cultivo de café en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha <sup>-1</sup> ) durante dos años de experimentación (2019 y 2020). .....	143
<b>Tabla 14.</b> Resumen del análisis de la varianza del efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha <sup>-1</sup> ) sobre los sensores de la nariz electrónica en granos tostados de café durante el año 2019. ....	169
<b>Tabla 15.</b> Resumen del análisis de la varianza del efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha <sup>-1</sup> ) sobre los sensores de la Nariz Electrónica en granos tostados de café durante el año 2020. ....	170
<b>Tabla 16.</b> Coeficiente de correlación de Pearson ( <i>r</i> ) entre los diferentes atributos de calidad de taza y sensores de la nariz electrónica en respuesta a la aplicación de biocarbón y niveles de fertilización en árboles de café.....	174

## Lista de símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$A$	Área	$m^2$	$\iint dx dy$
$D$	Diámetro	m	
$L$	Longitud	m	$DF$
$T$	Temperatura	C	$DF$
$T$	Tiempo	s	$DF$
$V$	Volumen	L	$\int dr^3$

### Superíndices

#### Superíndice Término

N	Exponente, potencia
---	---------------------

### Abreviaturas

Abreviatura	Término
BC	Biocarbón
NF	Nivel de fertilización
FQ	Fertilización química
DDT	Días después de Trasplante
RR	Riego reducido
$F_n$	Fotosíntesis neta

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
$g_s$	Conductancia estomática
$E$	Transpiración
$UEA$	Uso Eficiente del Agua
$UEA_i$	Uso Eficiente del Agua intrínseco
$C_i/C_a$	Relación Carbono intercelular sobre Carbono atmosférico
$P_n/C_i$	Eficiencia de la carboxilación
$Chl\ total$	Clorofila total
$F_v/F_m$	Eficiencia máxima potencial del fotosistema II
LEF	Flujo lineal de electrones
$NPQ_t$	Quenching no fotoquímico total
$\Phi_2$	Rendimiento del quantum en PSII en condiciones de luz
$\Phi_{iNO}$	Fracción de luz perdida a través de procesos inhibidores de la fotosíntesis no regulados
$\Phi_{iNPQ}$	Fracción de luz dedicada a la disipación no fotoquímica
$PS1_{\text{Centros Activos}}$	Centros activos en PS1
$PS1_{\text{Centros Abiertos}}$	Centros abiertos en PS1
$PS1_{\text{Centros Sobre Reducidos}}$	Centros sobre reducidos en PS1
$PS1_{\text{Centros Oxidados}}$	Centros oxidados en PS1
CPS	Café pergamino seco
EA	Eficiencia agronómica
CP	Componente principal
PST	Peso seco del tallo
PSH	Peso seco de las hojas
PST	Peso seco del tallo
PSR	Peso seco de la raíz

---

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
PSTt	Peso seco total
DMP	Diámetro medio ponderado
AE	Agregados estables
$\rho_a$	Densidad aparente del suelo
PS	Punto de saturación
CC	Capacidad de campo
MP	Marchitez permanente
CICE	Capacidad de intercambio catiónico efectiva
SST	Sólidos solubles totales



# Introducción

El género *Coffea* es un grupo de plantas que pertenecen a la familia de las Rubiáceas y son originarias de la región del altiplano occidental de Etiopía y Yemen; las principales especies cultivadas a nivel mundial son *Coffea arabica* y *Coffea canephora* (Labouisse *et al.*, 2008). Colombia es considerado el tercer país productor a nivel mundial con cerca de 15 millones de sacos de 60 kg después de Brasil y Vietnam, (Organización Internacional del Café, 2016). En adición, *Coffea arabica* es la especie predominante con una producción de 13.890.000 sacos de 60 kg de café verde en 853.700 ha en el año 2020 (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2021a).

El rendimiento del cultivo del café puede ser influenciado por factores como la disponibilidad de agua en el suelo (Tesfaye *et al.*, 2014), el manejo agronómico (Debela Bote y Jan, 2017), características físicas, químicas y microbiológicas del suelo (Bagyaraj *et al.*, 2015; de Beenhouwer *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2016) y la fertilización (Melke e Ittana, 2014). La nutrición mineral de las plantas es un área de importancia fundamental tanto para la ciencia básica como para la aplicada, la cual durante los últimos años ha realizado progresos sorprendentes enfocados en la comprensión de los mecanismos de absorción de nutrientes y sus funciones en el metabolismo de las plantas, causando un incremento de los rendimientos de las cosechas mediante el suministro de nutrientes minerales (Marschner, 2011).

Suplir las necesidades de un creciente mercado es un gran reto de la agricultura moderna, generando un incremento de la demanda de alternativas tecnológicas de producción que encaminen a una sostenibilidad ambiental y económica (Sadeghian-Khalajabadi, 2008; Grillo Pinto *et al.*, 2013). Adicionalmente, la agricultura intensiva demanda de mayor flujo de nutrientes por parte de los cultivos y, debido a un manejo ineficiente de la fertilidad del suelo, se está suministrando fertilizantes de manera excesiva ocasionando el agotamiento de la capa fértil y la contaminación de fuentes hídricas (FAO, 1999). Estas prácticas contribuyen al deterioro del recurso hídrico y al calentamiento global, principalmente cuando las tasas de fertilización mineral son tan altas que resultan en pérdidas de nitrógeno acompañadas de emisiones de N<sub>2</sub>O (gas de efecto invernadero), lo que convertiría a este sistema productivo insostenible para el ambiente, especialmente a los

niveles de fertilización recomendados en monocultivo (Capa *et al.*, 2015). En los últimos años, se han impulsado estrategias enfocadas en mejorar la eficiencia de la absorción de nutrientes por parte de las plantas, reduciendo los costos de producción y mitigando los efectos nocivos sobre el medio ambiente (FAO, 1999).

La producción del cultivo de café es afectada por la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Sadeghian, 2008). En consecuencia, es importante desarrollar estrategias de fertilización dirigidas a las etapas fenológicas que requieran dosis específicas para el óptimo crecimiento y desarrollo de las plantas de café con el fin de garantizar una producción exitosa (Salamanca-Jimenez, 2017). Lo anterior, plantea la necesidad de generar estudios enfocados en planes de nutrición más eficientes para el cultivo de café (Grillo Pinto *et al.*, 2013; Bedoya Cardoso y Salazar Moreno, 2014). Además, por cada millón de sacos de 60 kg de café pergamino seco que se exporta en Colombia, se generan aproximadamente 162.900 toneladas de pulpa fresca, que de no ser utilizada correctamente equivaldría a la contaminación producida durante un año en excretas y orina, por una población de 868.736 habitantes (Rodríguez, 2009).

En este sentido, una alternativa de uso de estos desechos, es la transformación en biocarbón (BC) mediante el proceso de pirólisis, el cual se puede incorporar a los suelos de los cultivos de café. Sin embargo, existen muchos vacíos en el conocimiento de los efectos de la aplicación de BC vía edáfica sobre la fisiología de las plantas cultivadas, ya que los principales estudios se enfocan en evaluaciones de variables físicas, químicas y microbiológicas del suelo. En consecuencia, los principales beneficiarios de los resultados de esta investigación serán el sector productivo y la comunidad científica, ya que se obtuvo información nueva acerca de los efectos de la aplicación edáfica de BC sobre parámetros fisiológicos del cultivo de café.

El BC es considerado como una alternativa para mitigar el impacto ambiental por el uso excesivo de fertilizantes (Lehmann y Joshep, 2009). Este producto ha sido reportado ampliamente en biorremediación de suelos y aguas (Tan *et al.*, 2016). Aunque se han demostrado efectos positivos de aplicación al suelo sobre el estado nutritivo de cultivos utilizando diferentes fuentes orgánicas para su fabricación (Schulz *et al.*, 2013), las respuestas fisiológicas de las plantas aún no se conocen con claridad. No obstante, en los sistemas productivos del café, la pulpa obtenida en el proceso de beneficio del fruto podría

representar anualmente una producción cercana a los 2.258 kg ha<sup>-1</sup> (Montoya, 2006; Rodríguez, 2007). Este subproducto contiene altos niveles de sustancias tóxicas (ácidos fenólicos y cafeína) que causan efectos negativos para los mamíferos y organismos acuáticos en el medio ambiente (Hoseini *et al.*, 2021), por lo que es necesario plantear estrategias de manejo que ayuden a mitigar los riesgos de contaminación.

Por otro lado, se han realizado investigaciones cuya meta es evaluar el potencial del BC como enmienda de suelos y sumidero de carbono (Sohi, 2012). Sin embargo, existen muchos vacíos en el conocimiento acerca de los efectos de la aplicación al suelo de BC sobre las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de suelos cafeteros y especialmente del comportamiento agronómico y fisiológico de plantas de café. Por lo que esta investigación permitió responder la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el efecto del uso de biocarbón como complemento a la nutrición mineral sobre propiedades físicas y químicas del suelo, como también el comportamiento fisiológico y agronómico en un genotipo comercial del cultivo de café (*Coffea arabica* L.)?

En este trabajo fue necesario cumplir con los siguientes objetivos:

### **Objetivo general**

Evaluar el efecto de la aplicación de biocarbón obtenido de pulpa de café sobre la fisiología y el comportamiento agronómico del cultivo de café variedad Castillo el Tambo (*Coffea arabica* L.).

### **Específicos**

- Evaluar el efecto de la utilización de diferentes dosis de biocarbón y fertilizantes de síntesis química sobre parámetros fisiológicos tales como propiedades de intercambio gaseoso, estado nutricional (macro y micro nutrientes) y rendimiento de plantas de café variedad Castillo El Tambo.
- Determinar las variaciones en características físicas y químicas del suelo en un cultivo comercial de café variedad Castillo El Tambo, debido a la utilización de biocarbón.

- Estudiar la influencia de la aplicación de biocarbón sobre parámetros de calidad de los granos de café variedad Castillo El Tambo.

El documento está presentado en diferentes capítulos como se relaciona a continuación: en el primero, se reúne el marco teórico como estado del arte, enfocado principalmente en las generalidades del café, la nutrición en el cultivo de café y el uso del biocarbón en la agricultura. Posteriormente, se presentan cinco capítulos adicionales (escritos a manera de artículo científico), los cuales reúnen los resultados de las diferentes etapas de investigación para el cumplimiento de los objetivos de la tesis. La primera etapa correspondió al cumplimiento del primer objetivo específico, buscando evaluar el estado nutritivo y comportamiento fisiológico de plántulas y árboles de café (*Coffea arabica* L.) variedad Castillo - El Tambo en respuestas a aplicación de biocarbón y niveles de fertilización. La segunda etapa consistió en el alcance del segundo objetivo del presente trabajo mediante la evaluación de los efectos de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón en características físicas y químicas del suelo de un cultivo de café. La tercera etapa abarcó el estudio de los parámetros de rendimiento y calidad de granos de café en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización con el fin de dar alcance al tercer objetivo de la tesis. Para ello fue necesario realizar tres experimentos: los primeros dos experimentos fueron llevados a cabo en condiciones de invernadero usando plántulas de café de tres meses de edad; mientras que el tercer experimento se realizó en condiciones de campo usando un cultivo comercial de café de tres años de edad.

# Capítulo 1 Marco teórico

## 1.1 Origen y distribución del cultivo de café

El café pertenece a la familia de las Rubiaceas (Bridson, 1988). El género *Coffea* es el más importante y está compuesto por 41 especies originarias de la región húmeda tropical de África occidental, 59 especies silvestres de la isla de Madagascar y otras tres ubicadas en las islas de las Mascareñas (Davis *et al.*, 2006). La planta de café es un arbusto o árbol pequeño de tipo perenne, con hojas coriáceas de forma elíptica y de color oscuro. Su tallo es recto y puede alcanzar alrededor de 3 m en especies cultivadas y hasta los 10 m en estado silvestre (Llaserhermes *et al.*, 1999). Su fruto es una drupa indehiscente que contiene dos semillas. También, desarrolla un mesocarpio que produce una pulpa de color generalmente rojo, con alta presencia de compuestos aromáticos y sabor dulce (Davis *et al.*, 2006).

Las dos especies de café más cultivadas son *Coffea arabica* y *Coffea canephora*, las cuales abarcan cerca del 70% de la producción mundial (Llaserhermes *et al.*, 1999). Colombia es el principal productor de café arábico suave y el tercer mayor productor a nivel internacional (Pineda *et al.*, 2019). En adición, Colombia cuenta con el Banco de Germoplasma de Café de Cenicafé, conocido como la Colección Colombiana de Café (C.C.C.), al cual pertenecen más de 3.000 materiales genéticos que son utilizados de acuerdo a los objetivos del mejoramiento del café en el país (Cortina-Guerrero *et al.*, 2013). Las variedades Colombia (Castillo-Zapata y Moreno-Ruíz, 1988), Tabi (Moreno-Ruíz, 2002), Castillo y Castillo regionales (Alvarado-Alvarado *et al.*, 2005) han sido de gran importancia para la caficultura colombiana debido a sus características de resistencia a la roya.

## 1.2 Crecimiento y desarrollo de la planta de café

### 1.2.1 Fase vegetativa

La fase vegetativa comprende los estadios de la germinación hasta la iniciación del primordio floral (Arila-Pulgarín *et al.*, 2002). El proceso de germinación puede tardar cerca

de 30 días desde la siembra y distingue cinco estados que comprenden la imbibición, brotación, germinación temprana, germinación tardía y elongación (Flórez-Ramos *et al.*, 2013). Generalmente, el cultivo de café requiere del uso de germinadores hasta cuando la plántula emite el primer par de hojas primarias y pueda ser ubicada en bolsas con suelo; este periodo tarda aproximadamente entre 60 a 70 días después de la germinación (Arcila-Pulgarín *et al.*, 2007). Posteriormente, el desarrollo de las plantas en estado de almácigo (vivero) tiene una duración entre 60 y 190 días; en este periodo de tiempo se forman las raíces y las ramas (Flórez-Ramos *et al.*, 2013).

Finalmente, las plantas de café son trasplantadas a su sitio definitivo en campo. A partir de este momento, las plantas presentan el proceso de formación y elongación de ramas (durante un periodo promedio de un año y medio antes de la primera floración). En esta fase vegetativa también se caracteriza por evidenciar mayor crecimiento ortotrópico del tallo y crecimiento plagiotrópico de las ramas (Arcila-Pulgarín *et al.*, 2007; Flórez-Ramos *et al.*, 2013).

### **1.2.2 Fase reproductiva**

La fase reproductiva hace referencia al desarrollo de las inflorescencias, inicia aproximadamente entre el segundo y tercer año después de la germinación y está determinada por las condiciones ambientales (Arcila-Pulgarín *et al.*, 2007). Generalmente, las flores del café se forman a partir de yemas seriadas localizadas en las axilas foliares de los nudos de las ramas plagiotrópicas y cuentan con un potencial para producir entre 24 y 32 flores (Flórez-Ramos *et al.*, 2013). En adición, seis etapas de desarrollo floral han sido descritas de la siguiente forma: diferenciación, iniciación de la inflorescencia, desarrollo de los botones florales, latencia, preantesis y antesis o apertura floral (Arcila-Pulgarín *et al.*, 2007).

### **1.2.3 Desarrollo del fruto**

El fruto de café es una drupa ovoide o globular de peciolo corto que puede alcanzar un diámetro entre 11,5 a 14,5 mm y una longitud entre 10 a 15 mm (Flórez-Ramos *et al.*, 2013). La formación del fruto puede tardar entre 180 y 330 días desde el momento de floración hasta la maduración. Adicionalmente, su desarrollo se han descrito cinco etapas:

la primera inicia con la fertilización del óvulo; en la segunda etapa, el fruto crece rápidamente en volumen y peso, generando una alta demanda de agua; la tercer etapa se caracteriza porque el fruto aún no termina de formarse pero presenta una alta demanda de nutrientes; la cuarta etapa comprende la fase de maduración del fruto y el endospermo llena el grano entero; finalmente, la quinta etapa se refiere a aquel periodo posterior al momento ideal de recolección y el fruto pierde peso por sobremaduración (Arcila y Jaramillo, 2003).

### 1.3 Componentes de rendimiento del cultivo de café

La productividad del cultivo de café generalmente se estima a través del rendimiento por árbol de café cereza, la producción de café pergamino seco (CPS) (ecuación 1) y la relación café cereza / CPS (calculada a partir de la diferencia entre peso de una muestra de 1 kg de café cereza y el peso de CPS en kg obtenido a partir del proceso de beneficio de dicha muestra hasta alcanzar un grado de humedad entre 10 – 12 %) (Muñoz-Belancazar *et al.*, 2021).

$$\mathbf{Rendimiento} = CPS \left( \frac{kg}{ha} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

El factor de rendimiento (FR) es definido como la cantidad de CPS que se requiere trillar para obtener un saco de 70 kg de café excelso (almendra sana sobre la malla 13) de exportación (Puerta-Quintero, 2016). Generalmente, es calculado con una muestra de 250 g de CPS acorde a la ecuación 2, y tiene en cuenta las siguientes clasificaciones: un FR < 94, muestra que es un café de mayor calidad y su precio es superior al precio base; FR = 94 obtiene el precio base; y, un FR > 94, el cual indica que es un café de menor calidad y precio es más bajo (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2021b)

$$\mathbf{Factor\ calculado} = \frac{250\ g\ de\ muestra\ x\ 70\ kg\ de\ café\ Excelso}{Café\ Excelso\ hallado\ en\ la\ muestra\ de\ 250\ g} \quad \text{Ecuación 2}$$

## 1.4 La nutrición del cultivo de café

El rendimiento del cultivo del café puede ser afectado por factores como el genotipo sembrado (Colodetti *et al.*, 2015), la densidad de siembra (Sakai *et al.*, 2015), cambio en la proporción de hojas y frutos (Chaves *et al.*, 2012), radiación (Nesper *et al.*, 2017), disponibilidad de agua en el suelo (Tesfaye *et al.*, 2014), el manejo agronómico (Debela-Bote y Jan, 2017), características físicas, químicas y microbiológicas del suelo (Bagyaraj *et al.*, 2015; de Beenhouwer *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2015), la fertilización (Melke e Ittana, 2014), entre otros. La nutrición juega un papel fundamental en el rendimiento de las plantaciones porque los nutrientes participan en varios procesos fisiológicos como fotosíntesis, distribución de asimilados y respiración (Marschner, 2011).

La productividad de las plantas de café está estrechamente influenciada por el suplemento de nutrientes al cultivo (Sadeghian, 2008), por lo que se han generado diversos estudios enfocados en optimizar la nutrición de las plantas de café (Grillo-Pinto *et al.*, 2013; Martins *et al.*, 2015). Se conoce que los elementos esenciales pueden estar agrupados de acuerdo a la cantidad que requiere ser suministrada a la planta según sus demandas nutricionales y son clasificados como macronutriente (nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre) y micronutrientes (hierro, cobre, manganeso, boro, cloro, níquel, zinc y molibdeno) (White y Brown, 2010; Marschner, 2011). Estos macro y micro nutrientes influyen directamente sobre la productividad del cultivo de café donde se ha reportado que la mayor parte de la absorción de nutrientes se produce en las etapas de expansión, formación del embrión y maduración de los frutos, donde las deficiencias nutricionales pueden ser críticas (Dubberstein *et al.*, 2016).

### 1.4.1 La nutrición sobre el comportamiento agronómico del café

El manejo nutricional de las plantas de café arábico en Colombia durante todas sus etapas fenológicas es reportado por Salamanca-Jiménez *et al.* (2017). Este inicia desde de la germinación, en la cual los requerimientos nutricionales para el desarrollo de las plántulas son suministrados por la semilla. El estado de plántula es uno de los más críticos por la sensibilidad a la ausencia de nutrientes principalmente nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio. Para el estado vegetativo, que normalmente dura cerca de los dos primeros años, se conoce que las plantas muestran respuestas positivas a la aplicación de N, P y K

(7 – 16 g/planta de N, 4 – 6 g/planta de  $P_2O_5$  y 5 – 10 g/planta de  $K_2O$  respectivamente). A partir del primer ciclo de producción, se ha reportado que el café anualmente remueve del suelo en promedio  $135 \text{ kg ha}^{-1}$  de N,  $35 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  y  $145 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $K_2O$  por ciclo de cultivo, demandando la aplicación de fertilizantes (Maro *et al.*, 2014).

Las demandas nutricionales de la planta pueden variar según su estado de desarrollo y por tal motivo, el análisis foliar es una herramienta de diagnóstico útil para mejorar el manejo de la fertilidad del cultivo (Dubberstein *et al.*, 2016; Pérez-Díaz *et al.*, 2014). En este sentido, existen dos herramientas útiles en el manejo de la fertilidad del cultivo de café, basadas en el análisis del contenido de nutrientes en el tejido foliar, los cuales son: i) el nivel crítico, definido como aquella concentración en una parte específica de la planta en determinado estadio de crecimiento, en la cual ocurre reducción del 5% al 10% en la productividad máxima (Summer, 1979; citado por Grillo Pinto *et al.*, 2013); y ii) el rango de suficiencia, entendido como el rango de concentración del nutriente de la cual hay razonable seguridad de que el cultivo tiene un adecuado suministro del elemento y, por debajo de ella, hay razonable seguridad de que el cultivo presenta deficiencias nutricionales que influyen negativamente la producción; cuanto mayor sea la desviación de la concentración adecuada en la muestra analizada con respecto a la deficiencia, mayor será la probabilidad de respuesta del cultivo a la aplicación del fertilizante (Grillo Pinto *et al.*, 2013).

### 1.4.2 Tendencias de la nutrición del cultivo de café

En los últimos años se han impulsado estrategias enfocadas en mejorar la eficiencia de la absorción de nutrientes por parte de las plantas, reduciendo los costos de producción y mitigando los efectos nocivos al medio ambiente (FAO, 1999), entre los que se encuentran: utilización de diferentes dosis de fertilizantes (Frois de Andrade *et al.*, 2015); el uso de microorganismos como las micorrizas arbusculares (Posada y Sieverding, 2014); la liberación de genotipos eficientes y tolerantes a condiciones de baja disponibilidad de nutrientes como el nitrógeno (Colodetti *et al.*, 2014); la aplicación de fertilizantes de liberación lenta (Ribeiro *et al.*, 2016).

El biocarbón (BC) también ha sido documentado ampliamente como una alternativa de complemento en los planes de fertilización de diversos cultivos con efectos positivos a nivel del suelo como también en las diferentes variables fisiológicas, parámetros de rendimiento

y en calidad del órgano cosechado de las plantaciones (Rezende *et al.*, 2016; Waqas *et al.*, 2017). Aunque los estudios son pocos para el caso del cultivo de café (Bommaraju, 2016), se podrían tomar iniciativas que fomenten la implementación de la incorporación de BC al suelo evaluando sus impactos tanto en el ambiente como en la planta.

## 1.5 El biocarbón como alternativa para la agricultura

La conversión de residuos orgánicos para producir biocarbón es una opción viable que puede mejorar el secuestro de carbono en el suelo, reducir los residuos agrícolas y mejorar la calidad del suelo (Lehmann y Joseph, 2009). En este sentido, el biocarbón ha mostrado potencial de mejorar la productividad agrícola convencional y la rentabilidad de los agricultores mediante el favorecimiento del estado nutritivo de la planta (Atkinson *et al.*, 2010).

El origen y uso del biocarbón (BC) como fuente para mejorar la fertilidad del suelo es reportado en las tierras oscuras amazónicas conocidas localmente como “Terra Preta do Índio” (TPI) (Lehmann y Joseph, 2009). Los suelos de esta región amazónica se caracterizan por tener un horizonte A rico en carbono y nutrientes (indicador de calidad del suelo), que se ha formado por la acumulación de residuos orgánicos de origen vegetal y animal bajo condiciones del uso intensivo del fuego (de Sousa *et al.*, 2015). Asimismo, la acumulación de estos residuos favoreció la profundidad de los horizontes superficiales del suelo, alcanzando longitudes de hasta 1 metro (Teixeira, 2009). Por lo tanto, el BC ha sido definido como un producto rico en carbono que proviene del calentamiento de biomasa como madera, estiércol u hojas en un recipiente cerrado con poca o nula disponibilidad de aire (Lehman y Joshep, 2009).

El biocarbón puede generar beneficios significativos cuando se aplica a los suelos agrícolas en complemento con algunos fertilizantes (Schulz *et al.*, 2013). Se ha reportado aumentos en el rendimiento de los cultivos de 45 a 250% cuando el biocarbón es incluido en los planes de nutrición mineral en cultivos, tales como: arroz, rábano, trigo y maíz (Atkinson *et al.*, 2010; Biederman y Harpole, 2013). Las propiedades de retención de agua en el suelo, la conductividad hidráulica saturada y la disponibilidad de nutrientes han sido también favorecidas con la aplicación de carbón vegetal (Jeffery *et al.*, 2011).

### 1.5.1 Producción de biocarbón y factores que lo regulan

El biocarbón es obtenido a través de la pirólisis de la materia orgánica, al ser expuesta a temperaturas que generalmente oscilan entre 200-900 °C y en condiciones de baja o nula concentración de oxígeno (Sohi, 2012). Este proceso se divide generalmente en rápida, intermedia y lenta, dependiendo del tiempo de residencia (tiempo que toma en culminar el proceso de pirólisis) y de la temperatura de exposición de la biomasa (Lhemann y Joseph, 2009). La primera se caracteriza por realizarse con un tiempo de residencia muy corto (menos de 2 segundos) y se usa a menudo para producir bio-aceite a partir de biomasa, obteniendo aproximadamente un 75% de rendimiento (Mohan *et al.*, 2006). Los procesos de pirólisis lenta e intermedia suelen ocurrir con un tiempo de residencia que puede variar de pocos minutos a varias horas o incluso días y se alcanzan rendimientos en la producción de BC entre el 25-35% (Brown, 2009).

Los subproductos de origen vegetal más utilizados para producir biocarbón son: residuos forestales, agroindustriales y estiércol. Dentro de las características más importantes que influyen sobre la calidad del BC se encuentran: el tamaño y la densidad de la partícula pirolizada, la concentración de compuestos orgánicos como la celulosa, la lignina, y la hemicelulosa, e inorgánicos (contenido de cenizas, Ca, Mg, carbonatos inorgánicos) (Lehmann y Joseph, 2009). Asimismo, las características físicas, químicas y la calidad del BC dependerán del tipo de residuo o material vegetal para la producción y la temperatura de pirólisis (Keiluweit *et al.*, 2010). En general, se han reportado diferencias entre las características de los BC obtenidos a partir de residuos de cereales como el trigo (Kloss *et al.*, 2012), arroz (Liu *et al.*, 2012) y canola (Tong *et al.*, 2011) con respecto a los reportados en el maíz (Mullen *et al.*, 2010) o piña (Ch'ng *et al.*, 2015).

### 1.5.2 El suelo en respuesta a la aplicación de biocarbón

En la **Tabla 1** se presentan los principales efectos benéficos identificados en las propiedades físicas y químicas del suelo con el suministro de biocarbón. Estudios han mostrado que la incorporación de BC al suelo puede modificar las propiedades físicas, incrementando el volumen de poros y la retención de agua, resultando en la reducción de la densidad aparente del suelo debido a la porosidad y alta superficie específica del BC (Rajapaksha *et al.*, 2016). Otra propiedad física importante que es afectada por la aplicación del biocarbón de residuos de podas de plantas de olivo es la compactación del

suelo, la cual se vio reducida y permitió una mayor proliferación de raíces (Olmo *et al.*, 2014).

El BC también puede modificar las características químicas del suelo, aumentando la capacidad de intercambio catiónico, mejorando la fertilidad de los suelos mediante la disponibilidad de nutrientes esenciales y benéficos para la planta (Liang *et al.*, 2006). Van Zwieten *et al.* (2010) han reportado que el uso de BC mejoró la fertilidad del suelo mediante el incremento del pH y la CIC cuando los suelos fueron tratados con 10 t ha<sup>-1</sup> BC. Karhu *et al.* (2011) mostraron que la incorporación de 9 t ha<sup>-1</sup> de BC en un suelo con vocación agrícola, aumentó cerca del 96% la captación media de CH<sub>4</sub> y la capacidad de retención de agua. Por otro lado, se ha reportado que el biocarbón puede incrementar la conductividad eléctrica (Oguntunde *et al.*, 2004) y reducir la acidez intercambiable (Ch'ng *et al.* 2015), lo cual indica que los nutrientes pueden estar más disponibles en la solución del suelo.

Con respecto a variables microbiológicas del suelo, Anderson *et al.* (2011) indican que la aplicación de biocarbón promueve a las bacterias solubilizadoras de fosfato, las cuales alteran el flujo de carbono en el suelo e incrementa la abundancia de bacterias que pueden degradar más compuestos de carbono recalcitrantes y potencialmente reduce las bacterias patógenas de plantas. Por otro lado, numerosos estudios han encontrado que la aplicación de biocarbón incrementa la biomasa y modifica significativamente la composición de las comunidades microbiana, lo que explicaría los efectos biogeoquímicos del BC sobre el ciclo de nutrientes, los cambios en la presencia de organismos fitopatógenos y el crecimiento de los cultivos (Spokas *et al.* 2009; Elad *et al.* 2010).

**Tabla 1.** Principales respuestas de la aplicación de biocarbón sobre propiedades físicas y químicas del suelo (adaptado de Sánchez-Reinoso *et al.*, 2020).

Fuente	Propiedad afectada	Efecto
Kuzyakov (2009)	Densidad aparente	Reducción de la densidad aparente por la porosidad del biocarbón.
Vacari <i>et al.</i> (2011)	Color.	Cambios en el color del suelo superficial visibles después de la aplicación del biocarbón.
Kuzyakov (2009)	Retención de agua	Incremento de la retención de agua debido a la porosidad del biocarbón y alta superficie específica.
Busscher <i>et al.</i> (2010)	Infiltración	Reducción de la infiltración del suelo
Olmo <i>et al.</i> (2014)	Compactación	Reduce la compactación del suelo
Busscher <i>et al.</i> (2010)	Resistencia a la penetración	Decrece la resistencia a la penetración con la aplicación de biocarbón
Vacari <i>et al.</i> (2011)	Temperatura	Incremento de la temperatura del suelo superficial en etapas iniciales de germinación y crecimiento de cultivos de trigo con aplicación de BC.
Sorrenti <i>et al.</i> (2016)	pH	Alcalinización de los suelos por incremento del pH.
Oguntunde <i>et al.</i> (2004)	Conductividad eléctrica	Incremento de la conductividad eléctrica del suelo en presencia de carbón vegetal, con respecto al suelo con ausencia del biocarbón.
Liang <i>et al.</i> , 2006	CIC	Incremento de la capacidad de intercambio catiónico.
Van Zwieten <i>et al.</i> (2010)	C orgánico total	Incremento del carbono total
Rajapaksha <i>et al.</i> (2016)	Carbono orgánico disuelto (DOC)	Incrementa la cantidad de DOC en el suelo
Ventura <i>et al.</i> (2013)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Reducción del lavado de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en el segundo año en un 75%.
Chan <i>et al.</i> (2008)	Na intercambiable	Incremento del sodio intercambiable
Van Zwieten <i>et al.</i> (2010)	K intercambiable	Incremento de potasio intercambiable
Asai <i>et al.</i> (2009)	K soluble	Incrementa el potasio soluble en suelo
Ch'ng <i>et al.</i> (2015)	P disponible	Incrementa la cantidad de fósforo disponible en suelo
Van Zwieten <i>et al.</i> (2010)	Ca intercambiable	Incremento del calcio intercambiable
Chan <i>et al.</i> (2008)	Mg intercambiable	Incremento del magnesio intercambiable
Van Zwieten <i>et al.</i> (2010)	Al intercambiable	Reduce la disponibilidad de aluminio
Ch'ng <i>et al.</i> (2015)	Acidez intercambiable	Reduce la acidez intercambiable

### 1.5.3 La fisiología de las plantas cultivadas en respuesta a la aplicación de biocarbón

La **Tabla 2** resume los principales reportes de estudios en los que se evaluaron el comportamiento fisiológico de plantas cultivadas en respuesta a la aplicación de biocarbón en el suelo. En este sentido, Chan *et al.* (2008) evaluaron la aplicación de diferentes dosis (0, 10, 50 y 10 t ha<sup>-1</sup>) de BC de residuos de fábrica de papel en presencia y ausencia de fertilización nitrogenada en un suelo compactado, encontrando que aplicaciones mayores a 50 t ha<sup>-1</sup> combinada con fertilizantes de síntesis química favoreció el crecimiento de las plantas de rábano. Por otro lado, Van Zwieten *et al.* (2010) también encontraron efectos benéficos en la germinación de semillas y acumulación de materia seca de rábano bajo aplicaciones de BC de residuos de papel.

El crecimiento del coleóptilo de plántulas de maíz ha sido otro beneficio fisiológico identificado por la incorporación de BC al suelo (Sun *et al.*, 2017), como también el incremento del porcentaje de germinación de semillas de trigo, alcanzando valores cercanos al 100% (Van Zwieten *et al.*, 2010). En este aspecto, se encontró que la aplicación de BC estimuló la formación de raíces finas en plantas de trigo (Olmo *et al.*, 2014) asociada a la reducción de la compactación del suelo y, por ende, una menor resistencia a la penetración de las raíces. En maíz (Ch'ng *et al.*, 2015), la proliferación de raíces finas fue asociado a la reducción de los niveles tóxicos de Al en el suelo y al incremento de la disponibilidad de N, favoreciendo la absorción de agua y nutrientes por parte de la planta.

La actividad sinérgica entre la aplicación de biocarbón y otras fuentes de nutrientes han sido reportados (Seehausen *et al.*, 2017). No obstante, Kishimoto y Sugiura (1985) citado por Chan y Xu (2009) encontraron que la aplicación de 5 y 15,25 t ha<sup>-1</sup> biocarbón (de maderas desconocidas) en un cultivo de soya afectó el rendimiento, reduciendo en un 37% y 71% respectivamente debido al incremento del pH que originó deficiencias nutricionales en las plantas. Respuestas similares fueron encontradas por Asai *et al.* (2009) en la cuantificación de clorofilas SPAD, siendo los valores menores con respecto a los tratamientos sin aplicación de biocarbón, y fue atribuida a la reducción en la disponibilidad de nitrógeno en el suelo.

El incremento de la biomasa también se ha favorecido por una mayor acumulación de la materia seca en soya (Van Zwieten *et al.*, 2010), maíz (Ch'ng *et al.*, 2015) y trigo (Noguera *et al.*, 2010). Lo anterior, se ha relacionado directamente con un incremento en los componentes de rendimiento de estos cultivos. Por otro lado, investigaciones recientes han indicado que el incremento del rendimiento y parámetros de calidad de los cultivos como respuesta a la aplicación de BC es debida principalmente a la mejora de las propiedades del suelo, generando un incremento en la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Saha *et al.*, 2019; Ronga *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020). En este sentido, Waqas *et al.*, 2017 reportan que la calidad del grano de soya ha sido positivamente afectada por la aplicación de BC, ya que la acumulación de ácidos grasos como el palmítico, esteárico, oleico y linoleico fue mayor. Asimismo, Agbede *et al.* (2020) concluyen que aplicaciones de BC (entre 10 y 30 t ha<sup>-1</sup>) fabricado a partir de diferentes maderas (provenientes de *Parkia biglosa*, *Khaya senegalensis*, *Prosopis africana* y *Terminalia glaucescens*) mejoró los parámetros de rendimiento y calidad en plantas de *Xanthosoma sagittifolium* Schott.

Similares tendencias fueron registradas por Zhang *et al.* (2020) en plantas de arándano tratadas con 1,5% y 3,0% (p/p) de BC (obtenido a partir de una mezcla de residuos de madera recolectados de las fábricas de muebles), las cuales incrementaron su rendimiento y calidad nutricional del fruto posiblemente debido a un aumento en la disponibilidad de nutrientes del suelo. Almaroai y Eissa (2020) concluyeron que aplicaciones de BC (entre 5 y 10 t ha<sup>-1</sup>) fabricado a partir de tallos de maíz estimuló el incremento el contenido de licopeno, el contenido de sólidos solubles totales (SST) (4,5 °Brix) y la acidez total (0,40 %) y (16,5 mg g<sup>-1</sup> PF) de frutos de tomate con respecto a plantas sin la incorporación de BC.

Con respecto al estrés por déficit hídrico, se ha documentado que el uso de BC favorece la retención de agua en el suelo debido a su alta superficie específica (Jeffery *et al.*, 2011; Rajapaksha *et al.*, 2016). Karhu *et al.* (2011) observaron que la capacidad de retención de agua del suelo fue mayor con el uso de 9 t ha<sup>-1</sup> de BC. Por otro lado, Saleem-Akhtar *et al.* (2014) encontraron que plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) sembradas en una mezcla de suelo con BC (5% p/p) en condiciones de sequía registraron una mayor conductancia estomática en comparación a las plantas estresadas sin BC. Finalmente, Zoghi *et al.*, (2019) observaron que al tratar plantas de *Quercus castaneifolia* con 30 g kg<sup>-1</sup> BC en condiciones de reducción del riego del 40% de capacidad de campo, registraron un incremento del 38% de la fotosíntesis y del 39% de la conductancia estomática.

**Tabla 2.** Efectos de la aplicación de biocarbón al suelo sobre variables fisiológicas de plantas cultivadas (adaptado de Sánchez-Reinoso *et al.*, 2020).

Fuente	Especie	Tipo de biocarbón	Dosis empleada	Respuestas encontradas
Van Zwieten <i>et al.</i> (2010)		Residuos de fábrica de papel	10 t ha <sup>-1</sup>	Incremento de la germinación
Chan <i>et al.</i> (2008)	Rábano	Residuos de podas de hierbas, basura de algodón y podas de plantas	10 - 100 t ha <sup>-1</sup>	Incremento de la acumulación de materia seca
Van Zwieten <i>et al.</i> (2010)		Residuos de fábrica de papel	10 t ha <sup>-1</sup>	Incremento de la acumulación de materia seca
Chan <i>et al.</i> (2008)		Residuos de podas de hierbas, basura de algodón y podas de plantas	10 - 100 t ha <sup>-1</sup>	Incremento del rendimiento
Van Zwieten <i>et al.</i> (2010)		Residuos de fábrica de papel	10 t ha <sup>-1</sup>	Incremento de la acumulación de materia seca
Waqas <i>et al.</i> (2017)	Soya	Residuos de pino	10:90 (p/p)	Mayor acumulación de ácidos grasos
Kishimoto y Sugiura (1985) citado por Chan y Xu (2009)		Madera de árboles desconocidas	0,5 t ha <sup>-1</sup> 5 y 15,25 t ha <sup>-1</sup>	Incremento del rendimiento en un 51% Reducción del rendimiento en un 37% y 71% respectivamente por deficiencias nutricionales asociadas al incremento del pH
Noguera <i>et al.</i> (2010)			45 g kg <sup>-1</sup>	Mayor acumulación de materia seca foliar y total
Noguera <i>et al.</i> (2010)	Arroz	Troncos de eucalipto	45 g kg <sup>-1</sup>	Incremento significativo del peso de los granos
Noguera <i>et al.</i> (2010)			45 g kg <sup>-1</sup>	Reducción en la relación C/N en la planta
Asai <i>et al.</i> (2009)		Residuos de rosa y teca	0 - 16 t ha <sup>-1</sup>	Incrementa el flujo de sabia en el xilema de las plantas de arroz, se presenta reducción significativa de los valores de clorofilas SPAD relacionada con la disminución en la disponibilidad de N

Fuente	Especie	Tipo de biocarbón	Dosis empleada	Respuestas encontradas
Van Zwieten <i>et al.</i> (2010)	Trigo	Residuos de fábrica de papel	10 t ha <sup>-1</sup>	Incremento de la germinación
Collins (2008)		Cáscara de maní; Corteza de abeto	0, 12,5, 25 y 50 t ha <sup>-1</sup>	La proporción de raíces y brotes de trigo disminuyó en todas las tasas de aplicación de biocarbón.
Vacari <i>et al.</i> (2011)		BC comercial de bosques de roble, haya, avellana	30 y 60 t ha <sup>-1</sup>	Incremento del rendimiento en el primer año del 32.1% y 23.6% respectivamente.
Olmo <i>et al.</i> (2014)		Residuos de poda de olivo	40 Mg ha <sup>-1</sup>	Se reduce la resistencia a la penetración, mayor toma de agua y nutrientes, incrementa la proliferación de raíces finas, acumulación de materia seca y rendimiento.
Batool <i>et al.</i> (2015)	<i>Abelmoschus esculentus</i> (L.) Moenc	Tallos de <i>Lantana camara</i>	0, 10 y 30 g kg <sup>-1</sup>	BC promueve la tasa de infiltración y mejora la retención de agua en el suelo, incrementando la fotosíntesis, el uso eficiente del agua y el rendimiento.
Sun <i>et al.</i> (2017)	Maíz	Residuos de maíz y trigo	-	Incremento de la longitud de coleóptilo.
Ch'ng <i>et al.</i> (2015)		Estiércol de aves de corral	8 t ha <sup>-1</sup>	Incremento de la disponibilidad en el suelo de N, P, K, Ca y Mg. Mayor absorción de nutrientes por parte de la planta.
Ch'ng <i>et al.</i> (2015)		Estiércol de aves de corral	8 t ha <sup>-1</sup>	Incremento de la acumulación de materia seca en hojas, tallos y raíces.
Major <i>et al.</i> (2010)		Biocarbón comercial de madera (fuentes y condiciones no disponibles)	8 - 20 t ha <sup>-1</sup>	Mejora del rendimiento del grano de maíz
Sorrenti <i>et al.</i> (2016)	Kiwi	Residuos de poda de melocotón y vid	20 g kg <sup>-1</sup>	Incremento del Fe intercambiable en el suelo, mayor absorción de nutrientes por las plantas.
Steiner (2006)	Banano	Madera	11,25 t ha <sup>-1</sup>	Incrementa la absorción de potasio
Ventura <i>et al.</i> (2013)	Manzana	Residuos de poda de melocotón y vid	10 t ha <sup>-1</sup>	Reducción en el lavado de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en el segundo año en 75% con respecto al control.

## 1.6 Bibliografía

- Agbede, T. M., Adekiya, A. O., Odoja, A. S., Bayode, L. N., Omotehinse, P. O., & Adepehin, I. (2020). Effects of biochar and poultry manure on soil properties, growth, quality, and yield of cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium* Schott) in degraded tropical sandy soil. *Experimental Agriculture*, 56(4), 528-543.
- Ahmad, M., S.S. Lee, X. Dou, D. Mohan, J.K. Sung, J.E. Yang y Y.S. Ok. 2012. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresour. Technol.* 118, 536–544.
- Almaroai, Y. A., & Eissa, M. A. (2020). Effect of biochar on yield and quality of tomato grown on a metal-contaminated soil. *Scientia Horticulturae*, 265, 109210.
- Alvarado-Alvarado, G., H.E. Posada-Suárez y H.A. Cortina-Guerrero. 2005. Castillo: Nueva variedad de café resistente a la roya. Chinchiná: CENICAFÉ. *Avances Técnicos* No 337. 8p.
- Anderson, C.R., L.M. Condrón, T.J. Clough, M. Fiers, A. Stewart, R.A. Hill y R.R. Sherlock. 2011. Biochar induced soil microbial community change: implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. *Pedobiologia*, 54(5), 309-320.
- Arcila, J. y A. Jaramillo. 2003. Relación entre la humedad del suelo, la floración y el desarrollo del fruto del cafeto. Chinchiná. CENICAFÉ. *Avances Técnicos* No 311. 8 p.
- Arcila-Pulgarín, J., Buhr, L., Bleiholder, H., Hack, H., Meier, U., & Wicke, H. (2002). Application of the extended BBCH scale for the description of the growth stages of coffee (*Coffea* spp.). *Ann App Biol*, 141, 19-27.
- Arcila-Pulgarín, J., F.F. Farfán, A.M. Moreno, L.F. Salazar y E. Hincapié. 2007. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná. CENICAFÉ. 309 p.
- Asai, H., B.K. Samson, H.M. Stephan, K. Songyikhangsuthor, K. Homma, Y. Kiyono, Y. Inoue, T. Shiraiwa y T. Horie. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research*, 111(1), 81-84.
- Atkinson, C.J., J.D. Fitzgerald y N.A. Higgs. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil*, 337(1-2), 1-18.

- Bagyaraj, D.J., G. Thilagar, C. Ravisha, C.G. Kushalappa, K.N. Krishnamurthy y P. Vaast. 2015. Below ground microbial diversity as influenced by coffee agroforestry systems in the Western Ghats, India. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 202, 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.01.015>
- Batool, A., S. Taj, A. Rashid, A. Khalid, S. Qadeer, A.R. Saleem y M.A. Ghufuran. 2015. Potential of soil amendments (Biochar and Gypsum) in increasing water use efficiency of *Abelmoschus esculentus* L. Moench. *Frontiers in plant science*, 6.
- Bedoya Cardoso, M. y R. Salazar Moreno. 2014. Optimización del uso de fertilizantes para el cultivo de café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8, 1433–1439.
- Biederman, L.A. y W.S. Harpole. 2013. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB bioenergy*, 5(2), 202-214.
- Bommaraju, B.K. 2016. Use of biochar and compost as substrate alternatives in coffee plant production. *Alma Mater Studiorum - Università Di Bologna. Studiorum - Università di Bologna*.
- Bridson, D.M. 1987. Nomenclatural notes on *Psilanthus*, including *Coffea* sect. *Paracoffea* (*Rubiaceae* tribe *Coffeae*). *Kew Bulletin*, 42, 453-460.
- Brown, R. 2009. Biochar production technology. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management Science and Technology*. Earthscans, UK, pp. 127–146
- Busscher W.J., J.M. Novak, D.E. Evans, D.W. Watts, M.A.A. Niandou y M. Ahmedna. 2010. Influence of biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand. *Soil Science*, 175:10–14.
- Capa, D., J. Pérez-Esteban y A. Masaguer. 2015. Unsustainability of recommended fertilization rates for coffee monoculture due to high N<sub>2</sub>O emissions. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1551–1559. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0316-z>
- Castillo-Zapata, J. y G. Moreno-Ruiz. 1988. La variedad Colombia: selección de un cultivar compuesto resistente a la roya del cafeto (No. Doc. 10283)\* CO-BAC, Santafé de Bogotá).
- Ch'ng, H.Y., O.H. Ahmed y N.M. Majid. 2016. Improving phosphorus availability, nutrient uptake and dry matter production of *Zea Mays* L. on a tropical acid soil using poultry manure biochar and pineapple leaves compost. *Experimental Agriculture*, 52(3), 447–465. <https://doi.org/10.1017/S0014479715000204>

- 
- Chan K.Y., Z. Xu. 2009. Biochar: nutrient properties and their enhancement. J. Lehmann, S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, Earthscan Publications Ltd., United Kingdom, pp. 67–81
- Chan, K.Y., L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie y S. Joseph. 2008. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 45(8), 629-634.
- Chaves, A.R.M., S.C.V. Martins, K.D. Batista, E.F. Celin y F.M. DaMatta. 2012. Varying leaf-to-fruit ratios affect branch growth and dieback, with little to no effect on photosynthesis, carbohydrate or mineral pools, in different canopy positions of field-grown coffee trees. *Environmental and Experimental Botany*, 77, 207–218. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2011.11.011>
- Chen, B. y Z. Chen. 2009. Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures. *Chemosphere* 76, 127–133.
- Chen, B., D. Zhou y L. Zhu. 2008. Transitional adsorption and partition on nonpolar and polar aromatic contaminants by biochars of pine needles with different pyrolytic temperatures. *Environ. Sci. Technol.* 42, 5137–5143.
- Collins, H. 2008. Use of biochar from the pyrolysis of waste organic material as a soil amendment: laboratory and greenhouse analyses. A Quarterly Progress Report Prepared for the Biochar Project.
- Colodetti, T.V., W.N. Rodrigues, L.D. Martins y M.A. Tomaz. 2014. Differential tolerance between genotypes of conilon coffee (*Coffea canephora*) to low availability of nitrogen in the soil. *Australian Journal of Crop Science*, 8(12), 1648–1657.
- Colodetti, T.V., W.N. Rodrigues, L.D. Martins, S.V.B. Brinate, M.A. Tomaz, J.F.T. Amaral y A.C. Verdin-Filho. 2015. Nitrogen availability modulating the growth of improved genotypes of *Coffea canephora*. *African Journal of Agricultural Research*, 10(32), 3150–3156. <https://doi.org/10.5897/AJAR2015.9692>
- Cortina-Guerrero, H.A., J.R. Acuña-Zornosa, M.P. Moncada-Botero, J.C. Herrera-Pinilla y D.M. Molina-Vinasco. 2013. Variedades de café: Desarrollo de variedades. En: *Manual del Cafetero Colombiano, Investigación y Tecnología para la Sostenibilidad de la Caficultura- Postcosecha y subproductos del café*. Gast, F., Benavides, P., Sanz, J. R., Herrera, J. C., Ramírez, V. H., Cristancho, M. A., & Marín, S. M. Federación Nacional de Cafeteros, Cenicafé. 326 pp.

- Davis, A.P., R. Govaerts, D.M. Bridson y P. Stoffelen. 2006. An annotated taxonomic conspectus of the genus *Coffea* (*Rubiaceae*). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 152(4), 465-512.
- de Barros Silva, E. B., M.M. de Melo Farnezi, N.A.V. Dessimoni-Pinto y P.H. Graziotti. 2013. DRIS Norms and Critical Nutrients Ranges for Coffee Beverage Quality in High Jequitinhonha Valley, Brazil. *Ejbs*, 6(1), 39–44. [https://doi.org/www.ejarr.com/Volumes/Vol6/EJBS\\_6\\_09.pdf](https://doi.org/www.ejarr.com/Volumes/Vol6/EJBS_6_09.pdf)
- de Beenhouwer, M., M. Van Geel, T. Ceulemans, D. Muleta, B. Lievens y O. Honnay. 2015. Changing soil characteristics alter the arbuscular mycorrhizal fungi communities of Arabica coffee (*Coffea arabica*) in Ethiopia across a management intensity gradient. *Soil Biology and Biochemistry*, 91, 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.08.037>
- de Sousa, S.G.A., M.I. de Araújo y E.V. Wandelli. 2015. Saberes tradicionais dos povos amazônicos no contexto do processo de transição agroecológica. *Revista Ambientalmente sustentável*, 2(20): 1699-1717.
- Debela Bote, A. y V. Jan. 2017. Tree management and environmental conditions affect coffee (*Coffea arabica* L.) bean quality. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, (September). <https://doi.org/10.1016/j.njas.2017.09.002>
- Dispenza, V., C. De Pasquale, G. Fascella, M.M. Mammano y G. Alonzo. 2017. Use of biochar as peat substitute for growing substrates of Euphorbia x lomi potted plants. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(4), 0908.
- Dubberstein, D., F.L. Partelli, J.R.M. Dias y M.C. Espindola. 2016. Concentration and accumulation of macronutrients in leaf of coffee berries in the Amazon, Brazil. *Australian Journal of Crop Science*, 10(5), 701–710. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.05.p7424>
- Elad, Y., D.R. David, Y.M. Harel, M. Borenshtein, H.B. Kalifa, A. Silber y E.R. Graber. 2010. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. *Phytopathology*, 100(9), 913-921.
- FAO. 1999. Guía para el manejo eficiente de la nutrición de las plantas desafíos fuentes de. Revisado en octubre 5, 2021, de <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/gepnms.pdf>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2021a. Aprenda a vender su café. Revisado en octubre 10, 2021, de <https://federaciondecafeteros.org/wp/servicios-al-caficultor/aprenda-a-vender-su-cafe/>

- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2021b. Estadísticas cafeteras. Revisado en octubre de 2021. En: <https://federaciondefcafeteros.org/wp/stadísticas-cafeteras/>.
- Flórez-Ramos, C.P., L.N. Ibarra-Ruales, L.F. Gómez-Gil, C.Y. Carmona-González. A. Castaño-Marín y A. Ortiz. 2013. Estructura y funcionamiento de la planta de café. En: Manual del Cafetero Colombiano, Investigación y Tecnología para la Sostenibilidad de la Caficultura- Postcosecha y subproductos del café. Gast, F., Benavides, P., Sanz, J. R., Herrera, J. C., Ramírez, V. H., Cristancho, M. A., & Marín, S. M. Federación Nacional de Cafeteros, Cenicafé. 326 pp.
- Frois de Andrade, M.A., P.A. Ramos-Cairo y J.L. Santos. 2015. Water relations and photosynthesis of young coffee plants under two water regimes and different N and K doses. *Agrociencia*, 49, 153–161.
- Gómez, L.A., A. Cruz-Dominguez, D. Jiménez-Madrid, A. Ocampo-Duran y S. Parra-González. 2016. Biochar as an amendment in an oxisol and its effect on the growth of corn. *Revista UDCA Actualidad y Difusión Científica*, 19(2), 341-349.
- Grillo Pinto, C., R.J. Guimarães, G. Mendes-Villela y M.S. Scalco. 2013. Critical Ranges of Levels for Primary Leaf Macronutrient. *Coffee Science*, Lavras, 8(4), 530–538.
- Hoseini, M., S. Cocco, C. Casucci, V. Cardelli y G. Corti. 2021. Coffee by-products derived resources. A review. *Biomass and Bioenergy*, 148, 106009.
- Jeffery, S., F.G. Verheijen, C. Kammann y D. Abalos. 2016. Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 101, 251-258.
- Karhu, K., T. Mattila, I. Bergström y K. Regina. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity—results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140(1), 309-313.
- Keiluweit, M., P.S. Nico, M.G. Johnson y M. Kleber. 2010. Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). *Environ. Sci. Technol.* 44, 1247–1253.
- Kloss, S., F. Zehetner, A. Dellantonio, R. Hamid, F. Ottner, V. Liedtke, M. Schwanninger, M.H. Gerzabek y G. Soja. 2012. Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties. *J. Environ. Qual.* 41, 990–1000.
- Kuzyakov Y., I. Subbotina, H. Chen, I. Bogomolova y X. Xu. 2009 Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by <sup>14</sup>C labeling. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 210–219.

- Labouisse, J.P., B. Bellachew, S. Kotecha y B. Bertrand. 2008. Current status of coffee (*Coffea arabica* L.) genetic resources in Ethiopia: implications for conservation. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 55(7), 1079–1093. <https://doi.org/10.1007/s10722-008-9361-7>
- Lashermes, P., M.C. Combes, J. Robert, P. Trouslot, A. D'Hont, F. Anthony y A. Charrier. 1999. Molecular characterization and origin of the *Coffea arabica* L. genome. *Molecular and General Genetics MGG*, 261(2), 259-266.
- Lehmann J. y S. Joseph. 2009. Biochar for environmental management: an introduction. *Biochar for Environmental Management-Science and Technology*, UK, Earthscan.
- Lehmann, J., M.C. Rillig, J. Thies, C.A. Masiello, W.C. Hockaday y D. Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota—a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812-1836.
- Li, Y.C., J.G. Shao, X.H. Wang, Y. Deng, H.P. Yang y H.P. Chen. 2014. Characterization of modified biochars derived from bamboo pyrolysis and their utilization for target component (furfural) adsorption. *Energy Fuels* 28 (8), 5119–5127.
- Liang, B., J. Lehmann, D. Solomon, J. Kinyangi, J. Grossman, B. O'Neill, J.O. Skjemstad, J. Thies, F.J. Luizao, J. Petersen y E.G. Neves. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719-1730.
- Liu, P., W.J. Liu, H. Jiang, J.J. Chen, W.W. Li y H.Q. Yu. 2012. Modification of biochar derived from fast pyrolysis of biomass and its application in removal of tetracycline from aqueous solution. *Bioresour. Technol.* 121, 235–240.
- Machida, M., M. Aikawa y H. Tatsumoto. 2005. Prediction of simultaneous adsorption of Cu(II) and Pb(II) onto activated carbon by conventional Langmuir type equations. *J. Hazard. Mater.* 120 (1–3), 271–275.
- Major, J., M. Rondon, D. Molina, S.J. Riha y J. Lehmann. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant and soil*, 333(1-2), 117-128.
- Maro, G.P., J.P. Mrema, B.M. Msanya, B.H. Janssen y J.M. Teri. 2014. Developing a coffee yield prediction and integrated soil fertility management recommendation model for Northern Tanzania. *International Journal of Plant & Soil Science*, 3(4), 380–396.
- Marschner, P. 2011. *Marschner's Mineral nutrition of higher plants*. (P. Marschner, Ed.) (Third). San Diego, USA: Elsevier Ltd.

- 
- Martins, L.D., L. de Souza-Machado, M.A. Tomaz y J.F. Teixeira-do Amaral. 2015. The nutritional efficiency of *Coffea* spp. A review. *African Journal of Biotechnology*, 14(9), 728–734. <https://doi.org/10.5897/AJB2014.14254>
- Melke, A. y F. Ittana. 2014. Nutritional Requirement and Management of Arabica Coffee (*Coffea arabica* L.) in Ethiopia: National and Global Perspectives. *American Journal of Experimental Agriculture*, 5(5), 400–418. <https://doi.org/10.9734/AJEA/2015/12510>
- Mohan, D., C.U. Pittman y P.H. Steele. 2006. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy Fuels* 20, 848–889.
- Montoya, P. 2006. Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café. Manizales: Universidad de Caldas. 107 p.
- Moreno-Ruíz, L.G. 2002. Tabi: variedad de café de porte alto con resistencia a la roya. Chinchiná: CENICAFÉ. Avances Técnicos No 300. 8p.
- Mullen, C.A., A.A. Boateng, N.M. Goldberg, I.S. Lima, D.A. Laird y K.B. Hicks. 2010. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by pyrolysis. *Biomass Bioenergy* 34, 67–74.
- Muñoz-Belalcázar, J.A., C.A. Benavides-Cardona, T.C. Lagos-Burbano y C.P. Criollo-Velázquez. 2021. Manejo agronómico sobre el rendimiento y la calidad de café (*Coffea arabica*) variedad Castillo en Nariño, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 32(3), 750-763.
- Nesper, M., C. Kueffer, S. Krishnan, C.G. Kushalappa y J. Ghazoul. 2017. Shade tree diversity enhances coffee production and quality in agroforestry systems in the Western Ghats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 247, 172–181. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.024>
- Noguera, D., M. Rondón, K.R. Laossi, V. Hoyos, P. Lavelle, M.H.C. de Carvalho y S. Barot. 2010. Contrasted effect of biochar and earthworms on rice growth and resource allocation in different soils. *Soil biology and Biochemistry*, 42(7), 1017-1027.
- Oguntunde, P.G., M. Fosu, A.E. Ajayi y N. Van De Giesen. 2004. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biology and Fertility of Soils*, 39(4), 295-299.
- Olmo, M., J.A. Albuquerque, V. Barrón, M.C. del Campillo, A. Gallardo, M. Fuentes y R. Villar. 2014. Wheat growth and yield responses to biochar addition under

- Mediterranean climate conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 50(8), 1177–1187. <https://doi.org/10.1007/s00374-014-0959-y>
- Pérez-Díaz, A., E. Castañeda-Hidalgo, T. Salvador-Lozano, C.A. Bustamante González, R.A. Rivera-Espinosa, G. Rodríguez-Ortiz y A. Fernández-Turro. 2014. Foliar Analysis as an Estimate on the nutritional state of conilon coffee plantations. *Journal of Life Sciences*, 8(2), 181–187.
- Pineda, J.A., M. Piniero y A. Ramírez. 2019. Coffee production and women's empowerment in Colombia. *Human Organization*, 78(1), 64–74.
- Posada, R.H. y E. Sieverding. 2014. Arbuscular mycorrhiza in Colombian coffee plantations fertilized with coffee pulps as organic manure. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 87, 243–248. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2014.087.034>
- Puerta-Quintero, G. 2016. Calidad física del café de varias regiones de Colombia según altitud, suelos y buenas prácticas de beneficio. *Revista del Centro Nacional de Investigaciones del Café*, 67(1), 7–40.
- Rajapaksha, A.U., S.S. Chen, D.C. Tsang, M. Zhang, M. Vithanage, S. Mandal, B. Gao, N.S. Bolan y Y.S. Ok. 2016. Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: potential and implication of biochar modification. *Chemosphere*, 148(27), 6e291.
- Rezende, F.A., V.A.H. Ferreira-dos Santos, C.M. Branco-de Freitas-Maia y M. Moura-Morales. 2016. Biochar in substrate composition for production of teak seedlings. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 1449–1456. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900043>
- Ribeiro, V.J., F.V. Andrade, R.R. Passos, E.S. Mendonça, L.L. da Silva y A.F. Sartori. 2016. Slow-release stabilized nitrogen fertilizers on initial development and nutrition of coffee plants (*Coffea arabica* L.). *Australian Journal of Crop Science*, 10(4), 497–502. <https://doi.org/10.21475/ajcs.2016.10.04.p7229x>
- Rodríguez, N. 2007. Producción de bioetanol a partir de pulpa y el mucílago del café. In: Informe anual de actividades 2006-2007. Chinchiná (Colombia), Cenifacé. Disciplina de Calidad y Manejo Ambiental. 78 p.
- Rodríguez, V. N. 2009. Estudio de un biosistema integrado para el postratamiento de las aguas residuales del café utilizando macrófitas acuáticas. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería hidráulica y Medio ambiente. Valencia España. 508 p. Esp. (Tesis: Doctor) (Tesis dirigida por Miguel Rodilla Alamá).

- Ronga, D., F. Caradonia, M. Parisi, G. Bezzi, B. Parisi, G. Allesina y E. Francia. 2020. Using digestate and biochar as fertilizers to improve processing tomato production sustainability. *Agronomy*, 10(1), 138.
- Sadeghian-Khalajabadi, S. 2008. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia. (S. M. Marín, Ed.) (32nd ed.). Chinchiná Caldas: Feriva S.A.
- Saha, A., B.B. Basak, N.A. Gajbhiye, K.A. Kalariya y P. Manivel. 2019. Sustainable fertilization through co-application of biochar and chemical fertilizers improves yield, quality of *Andrographis paniculata* and soil health. *Industrial Crops and Products*, 140, 111607.
- Sakai, E., E.A. Agnellos-Barbosa, J.M. de Carvalho-Silveira y R.C. de Matos-Pires. 2015. Coffee productivity and root systems in cultivation schemes with different population arrangements and with and without drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 148, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.020>
- Salamanca-Jimenez, A. 2017. Coffee Crop Fertilization in Colombia: A Mini-. *International Potash Institute*, 50, 22–30.
- Salamanca-Jimenez, A., T.A. Doane y W.R. Horwath. 2017. Nitrogen use efficiency of coffee at the vegetative stage as influenced by fertilizer application method. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1–11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00223>
- Saleem-Akhtar, S., Li, G., Andersen, M. N., & Liu, F. (2014). Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*, 138, 37-44.
- Sánchez-Reinoso, A.D., E.A. Ávila-Pedraza y H. Restrepo-Díaz. 2020. Use of biochar in agricultura. *Acta Biológica Colombiana*, 25, 327-338.
- Schulz, H., G. Dunst y B. Glaser. 2013. Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility. *Agronomy for sustainable development*, 33(4), 817-827.
- Seehausen, M.L., N.V. Gale, S. Dranga, V. Hudson, N. Liu, J. Michener, E. Thurston, C. Williams, S.M. Smith y S.C. Thomas. 2017. Is There a Positive Synergistic Effect of Biochar and Compost Soil Amendments on Plant Growth and Physiological Performance? *Agronomy*, 7(1), 13.
- Silva, B.M., G.C. Oliveira, M.E. Serafim, É.A. Silva, M.M. Ferreira, L.D. Norton y N. Curi. 2015. Critical soil moisture range for a coffee crop in an oxidic latosol as affected by soil management. *Soil and Tillage Research*, 154, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.06.013>

- Sohi, S.P. 2012. Carbon storage with benefits. *Science* 338: 1034–1035.
- Sorrenti, G., C.A. Masiello y M. Toselli. 2016. Biochar interferes with kiwifruit Fe-nutrition in calcareous soil. *Geoderma*, 272, 10-19.
- Spokas, K.A., W.C. Koskinen, J.M. Baker, y D.C. Reicosky. 2009. Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil. *Chemosphere*. 77, 574–581.
- Steiner, C., W.G. Teixeira, J. Lehmann, T. Nehls, J.L. Vasconcelos-de Macêdo, W.E.H. Blum y W. Zech. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant Soil* 291, 275-290.
- Sun, J., M. Drosos, P. Mazzei, D. Savy, D. Todisco, G. Vinci, G. Pan y A. Piccolo. 2017. The molecular properties of biochar carbon released in dilute acidic solution and its effects on maize seed germination. *Science of The Total Environment*, 576, 858-867.
- Tan, X.F., S.B. Liu, Y.G. Liu, Y.L. Gu, G.M. Zeng, X.J. Hu, X. Wang, S.B. Liu y L.H. Jiang. 2016. Biochar as potential sustainable precursors for activated carbon production: multiple applications in environmental protection and energy storage. *Bioresource Technology*.
- Teixeira, W.G.T. 2009. As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Embrapa Amazônia Ocidental.
- Tesfaye, S.G., M.R. Ismail, M.F. Ramlan, M. Marziah y H. Kausar. 2014. Effect of soil drying on rate of stress development, leaf gas exchange and proline accumulation in Robusta coffee (*Coffea Canephora* Pierre Ex Froehner) Clones. *Experimental Agriculture*, 50(3), 458–479. <https://doi.org/10.1017/S001447971300063X>
- Tong, S.J., J.Y. Li, J.H. Yuan y R.K. Xu. 2011. Adsorption of Cu(II) by biochars generated from three crop straws. *Chem. Eng. J.* 172, 828–834.
- Vaccari, F.P., S. Baronti, E. Lugato, L. Genesio, S. Castaldi y Fornasier. 2011. Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *Euro J Agron.* 34(4):231-238. Doi: <https://doi.org/10.1016/j>.
- Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K.Y. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph y A. Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and soil*, 327(1-2), 235-246.
- Ventura, M., G. Sorrenti, P. Panzacchi, E. George y G. Tonon. 2013. Biochar reduces short-term nitrate leaching from a horizon in an apple orchard. *Journal of environmental quality*, 42(1), 76-82.

- Waqas, M., Y.H. Kim, A.L. Khan, R. Shahzad, S. Asaf, M. Hamayun, y I.J. Lee. 2017. Additive effects due to biochar and endophyte application enable soybean to enhance nutrient uptake and modulate nutritional parameters. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, 18(2), 109–124. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1500262>
- White, P.J. y P.H. Brown. 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105, 1073–1080. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq085>
- Zhang, Y., X. Wang, B. Liu, Q. Liu, H. Zheng, X. You y F. Li. 2020. Comparative study of individual and Co-Application of biochar and wood vinegar on blueberry fruit yield and nutritional quality. *Chemosphere*, 246, 125699.
- Zoghi, Z., Hosseini, S. M., Kouchaksaraei, M. T., Kooch, Y., & Guidi, L. (2019). The effect of biochar amendment on the growth, morphology and physiology of *Quercus castaneifolia* seedlings under water-deficit stress. *Eur J For Res*, 138, 967-979.

# Capítulo 2 Respuesta fisiológica de plántulas de café (*Coffea arabica* L. var. Castillo) a la aplicación de biocarbón en condiciones de déficit hídrico.

## Resumen.

La sequía es una de los principales problemas abióticos en cultivos como el café donde el uso de biocarbón ha sido considerado como una alternativa de mitigación. El objetivo fue evaluar el efecto de la aplicación de biocarbón obtenido de la pulpa de café sobre el comportamiento fisiológico de las plántulas de café (*Coffea arabica* L. var. Castillo) en condiciones de déficit hídrico. Plántulas variedad Castillo fueron usadas en dos experimentos separados realizados en macetas y tubos de PVC usando un suelo Franco Limoso. Biocarbón (BC) obtenido de pulpa de café fue aplicado a cuatro dosis diferentes (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>). El déficit hídrico fue impuesto mediante la reducción progresiva de los requerimientos hídricos a través del experimento (25, 50%, 75% y 90% de las necesidades hídricas). Variables tales como: intercambio gaseoso, relación  $F_v/F_m$ , biomasa y estatus hídrico fueron estimadas. Se realizó un análisis de varianza con medidas repetidas. El riego reducido (RR) afectó negativamente relación  $F_v/F_m$ , intercambio gaseoso de la hoja, biomasa total y estatus hídrico. BC a una dosis de 8 t ha<sup>-1</sup> favoreció, especialmente, la fotosíntesis tanto en plantas bien irrigadas (6  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) o con riego reducido (3.5  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) comparado a sus respectivos controles (0 t ha<sup>-1</sup> para RR: 1,8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  y control: 3,9  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Lo anteriores resultados nos permiten sugerir que el uso de BC a una dosis de 8 t ha<sup>-1</sup> de puede ser una alternativa de manejo agronómico interesante para afrontar situaciones de déficit hídrico moderado en el cultivo del café.

**Palabras clave:** limitación estomática, estrés oxidativo, peroxidación lipídica, anegamiento, déficit hídrico.

## Abstract

Drought is one of the main abiotic problems in crops such as coffee and the use of biochar has been considered an alternative to mitigate this kind of stress. The objective was to evaluate the effect of the application of biochar obtained from coffee pulp on the physiological behavior of coffee (*Coffea arabica* L. var. Castillo) seedlings under water deficit conditions. Seedlings of the Castillo variety were used in two separate experiments performed in pots and PVC pipes using silt loam soil. Biochar (BC) obtained from coffee pulp was applied at four different doses (0, 4, 8, and 16 t ha<sup>-1</sup>). Water deficit was imposed through the progressive reduction of evapotranspiration (25%, 50%, 75%, and 90% of water needs). Variables such as gas exchange,  $F_v/F_m$  ratio, biomass, and water status were estimated. An analysis of variance with repeated measures was performed. Reduced irrigation (RI) negatively affected the  $F_v/F_m$ , leaf gas exchange, total biomass, and water status. BC at a dose of 8 t ha<sup>-1</sup> especially favored photosynthesis in both, well-irrigated plants (6  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) or with reduced irrigation (3.5  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) compared to their respective controls (0 t ha<sup>-1</sup> for RI: 1.8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  and control: 3.9  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). The results allow us to suggest that the use of BC at a dose of 8 t ha<sup>-1</sup> can be an interesting agronomic management alternative to face situations of moderate water deficit in coffee crops.

**Keywords:** drought, lipid peroxidation, oxidative stress, stomatal conductance.

## 2.1 Introducción

El café es uno de los cultivos más importantes en Colombia, siendo *Coffea arabica* L. la especie más cultivada en el país ya que en el año 2018 alcanzó una producción de 855,839.97 t en un área sembrada de 742.373,45 ha (Agronet, 2020). En adición, Colombia es considerado el tercer país productor a nivel mundial con cerca de 15 millones de sacos de 60 kg después de Brasil y Vietnam, (Organización Internacional del Café, 2016).

El cultivo de café genera varios subproductos como la pulpa fresca, que se estima en 30,893 toneladas por año (Montoya, 2006). La disponibilidad de estos subproductos en grandes cantidades conduce a un problema de contaminación ambiental (Echeverría y Nuti, 2017). Al ser una gran cantidad de material, deben ser manejados de forma apropiada (Rodríguez-Frómata *et al.*, 2020); ya que se ha documentado la presencia de sustancias fitotóxicas y ácidos orgánicos en los subproductos del café que afectan el suelo, la calidad del agua y restringe el crecimiento del cultivo (Dadi *et al.*, 2019). Esto motiva a la búsqueda de obtener productos de valor agregado a partir de los residuos de café con un enfoque que intente resolver algunos problemas ambientales (Gonçalves *et al.*, 2013). En este

sentido, el uso de pulpa de café fresco para la producción de BC es una alternativa interesante para analizar porque puede ser incorporado al suelo y mejorar sus características físicas, químicas y microbiológicas como también influir sobre los rendimientos de los cultivos (Lehman *et al.*, 2011; Hussain *et al.*, 2017; Jeffery *et al.*, 2017). El biocarbón es un producto rico en carbono que proviene de la pirólisis de biomasa, generalmente de origen vegetal y se obtiene por la descomposición de la materia orgánica expuesta a altas temperaturas en una atmósfera con baja disponibilidad de oxígeno (Sohi, 2012).

El BC puede ser también aplicado en cultivos en forma de enmienda junto a los fertilizantes directamente al suelo (Steiner *et al.*, 2007). Algunos estudios han encontrado que con la aplicación de biocarbón se han visto favorecidas propiedades del suelo como la retención de agua (Amoakwah *et al.*, 2017), el pH (Sorrenti *et al.*, 2016), la conductividad hidráulica y la disponibilidad de nutrientes (Ch'ng *et al.*, 2015; Ahmad *et al.*, 2017). También, se ha reportado que las aplicaciones de BC muestran efectos positivos en variables fisiológica de las plantas como una mayor germinación (Sun *et al.*, 2017), crecimiento de raíces y acumulación de materia seca (Olmo *et al.*, 2014) y tasa de fotosíntesis (Batool *et al.*, 2015).

El café es generalmente sembrado en las vertientes de las cordilleras de los Andes en Colombia (Ocampo-López *et al.*, 2017). La región andina ha venido siendo afectado por la variabilidad climática (Fenómenos ENOS), generando reducciones en los patrones de lluvias y aumentos en la temperatura (Ruiz y Pabón, 2013). En adición, las expectativas acerca de la limitación del agua en la producción de café indican que aumentará en varias regiones cafeteras importantes como consecuencia del cambio climático (Tounekti *et al.*, 2018). En particular, el principal estrés ambiental que afecta negativamente la producción de café es la sequía, alcanzando disminuciones en el rendimiento hasta un 80% en temporadas muy secas (DaMatta *et al.*, 2018); lo que demanda un mayor conocimiento de las estrategias de aclimatación de las plantas a la condición adversa (Mishra *et al.*, 2016).

Las plantas cultivadas muestran efectos adversos en términos de crecimiento y parámetros fisiológicos ante el déficit de agua (Lobell and Gourdjji, 2012). En este sentido, las plantas modifican sus relaciones hídricas para reducir la pérdida de agua mediante procesos como la transpiración, disminución en la eficiencia fotoquímica máxima de PSII ( $F_v/F_m$ ), y una mayor acumulación de biomasa, longitud de raíz y altura de la planta (Anjum *et al.*, 2011;

Marques *et al.*, 2017; Zandalinas *et al.*, 2018). En café, las condiciones severas y prolongadas de sequía generan un impacto negativo en el metabolismo celular, asociado también a un mayor estrés oxidativo (Dubberstein *et al.*, 2018). Como consecuencia, se ha encontrado que se estimula la senescencia temprana de las hojas, resultando en una reducción del área foliar total (DaMatta *et al.*, 2018) y posterior reducción del rendimiento (Dubberstein *et al.*, 2018).

El BC favorece la retención de agua en el suelo debido a su alta superficie específica (Jeffery *et al.*, 2011; Rajapaksha *et al.*, 2016). Karhu *et al.* (2011) observaron que aumentó la capacidad de retención de agua con la incorporación de 9 t ha<sup>-1</sup> de BC en un suelo agrícola. Sin embargo, Keshavarz-Afshar *et al.* (2015) encontraron que la aplicación de BC en concentraciones del 1% y 2 % (p/p en suelo) en plantas de *Silybum Marianum* L. Gaertn bajo condiciones moderadas y severas de estrés por sequía mejoró la capacidad de retención de agua en el suelo; no obstante, la magnitud de tal efecto no fue suficiente para influir en el comportamiento de las plantas, indicando que puede ser necesario aplicar mayores dosis de BC. Por otro lado, Salem-Akhtar *et al.* (2014) encontraron que plantas de *Solanum lycopersicum* L. sembradas en una mezcla de suelo con biocarbón (5% p/p) bajo condiciones de sequía mostraron una mayor conductancia estomática con respecto a las plantas sin biocarbón y estresadas. Zoghi *et al.*, (2019) también encontraron que aplicaciones de 30 g kg<sup>-1</sup> de biocarbón en plantas de *Quercus castaneifolia* en condiciones de reducción del riego del 40% de capacidad de campo incrementaron los valores de fotosíntesis y conductancia estomática en un 38 % y 39 %, causando unos mayores valores de crecimiento en altura y diámetro de la planta como también en acumulación de materia seca. Finalmente, Fischer *et al.*, 2019 señalan que el BC puede aumentar el rendimiento del cultivo de tomate asociado a la mejora de la eficiencia del uso del agua.

La producción del cultivo de café está estrechamente ligada a una adecuada nutrición, buena estructura de suelo y un buen desarrollo radical que se asocia principalmente con un buen estado hídrico de la planta y una cantidad de agua en suelo aprovechable por la planta (Sadeghian & Jaramillo (2016). Actualmente, el cambio climático representa una preocupación dramática para la producción de café, amenazando la supervivencia del cultivo en todo el mundo (Poltronieri y Franca-Rossi, 2016). Estas condiciones afectan los rendimientos y la calidad del grano (Silva *et al.*, 2019); generando la necesidad de modificar

o crear prácticas agronómicas para prevenir los riesgos (Poltronieri y Franca-Rossi, 2016). También, estas estrategias deben ser enfocadas en acciones innovadoras que promuevan el uso eficiente del agua almacenada en el suelo (Silva *et al.*, 2019). En este sentido, esta investigación buscaba evaluar una estrategia de manejo de residuos del café (pulpa) como fuente para la producción de biocarbón y posterior análisis de la aplicación de este material en el suelo sobre el comportamiento fisiológico de plántulas de café bajo estrés por sequía. Por tal motivo, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de biocarbón obtenido de la pulpa de café sobre el comportamiento fisiológico de las plántulas de café (*Coffea arabica* L. var. Castillo) en condiciones de déficit hídrico.

## 2.2 Materiales y métodos

### 2.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento

Dos experimentos separados se realizaron entre marzo y agosto de 2019 en un invernadero de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, Campus de Bogotá a una altura de 2.556 msnm (4°35'56"N y 74°04'51"O). En ambos experimentos, el material vegetal usado eran plántulas de café (*Coffea arabica* L.) de tres meses de edad (estado 14 según escala Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie - BBCH) de la variedad Castillo. En el primer experimento, las plántulas se trasplantaron a materas plásticas de 3 L de capacidad; mientras, en el segundo experimento, estas fueron establecidas en tubos de PVC (Protocol PVC S.A.S., Bogotá, Colombia) de 11 L de capacidad (15 cm de diámetro y 50 cm de altura) para estudiar las respuestas de raíces a los tratamientos (Shashidhar *et al.* 2012).

Todas las plántulas en ambos experimentos usaron un suelo proveniente de un cultivo de café proveniente de la finca Luxemburgo ubicada en el municipio de Chaparral en el Departamento del Tolima (3°49'39.2" N 75°34'07,1" O). Las características físicas y químicas del suelo fueron las siguientes: i) una textura Franco Limoso (20% arena, 54% de limo y 26% de Arcilla); ii) características químicas: Nitrógeno total: 0.49%, Ca: 9.95, K: 0,48, Mg: 2,56, Na: 0,14 meq 100 g<sup>-1</sup>, Cu: 0,81, Fe: 20, Mn: 46, Zn: 4,10, B: 0,07 y P: 8,70 mg kg<sup>-1</sup>; iii) pH 5,56; iv) una Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) 13,1 meq/100g y; v) conductividad eléctrica (CE) 0.16 dS/m.

Las condiciones de crecimiento del invernadero durante las evaluaciones fueron: temperatura de 25/20 °C día/noche, humedad relativa de 60 a 80% y un fotoperiodo natural de 12 h, con una radiación fotosintéticamente activa (PAR) de 800-1.000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  al medio día, dependiendo de las condiciones climáticas. Cinco días después del trasplante (DDT), las plántulas fueron fertilizadas edáficamente con dos fertilizantes a las siguientes dosis: i) 7 g planta<sup>-1</sup> de un fertilizante compuesto de grado 18-46-0 (DAP®, Yara, Colombia) como fuente de nitrógeno y fósforo; ii) 3 gramos de un fertilizante simple como complemento de nitrógeno (UREA®, Yara, Colombia). En Colombia se recomienda aplicar entre los primeros 2 a 4 meses de 7 a 16 g/planta de N, de 6 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 10 g de K<sub>2</sub>O (Salamanca-Jiménez, 2017).

### 2.2.2 Tratamientos de biocarbón y déficit hídrico

Los tratamientos de biocarbón se establecieron en el momento del trasplante de las plántulas de café mediante una mezcla del suelo usado con cuatro diferentes dosis de biocarbón de café en ambos experimentos. Las dosis de biocarbón (BC) utilizadas fueron 0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> (Ensayo en macetas: BC0 = 0 g/planta; BC4 = 5 g/planta; BC8 = 10 g/planta y BC16 = 15 g/planta; mientras, BC0 = 0 g/planta; BC4 = 17 g/planta; BC8 = 34 g/planta y BC16 = 68 g/planta en el ensayo de tubos). Las dosis anteriores se seleccionaron con base a las respuestas agronómicas que se han observado en otras especies cultivadas (Sánchez-Reinoso *et al.*, 2020). El biocarbón utilizado se obtuvo de pulpa de café, la cual tuvo una pirolización media a 500 °C. Finalmente, el BC mostraba las siguientes características: pH: 9,42; conductividad eléctrica 19,4: dS / m; carbono orgánico (OC): 46,4%; polvo 20,8%; N: 2,81%; P: 1,11%; Ca: 0,97%; K: 4,37%; Mg: 0,43%; Cu: 53,5 mg kg<sup>-1</sup>; Fe: 2.795 mg kg<sup>-1</sup>; Zn: 110 mg kg<sup>-1</sup>; B: 99,3 mg kg<sup>-1</sup>; CIC: 103 meq / 100g; CO/N : 16,5.

Al final de un periodo de aclimatación de 20 DDT, dos grupos de plántulas a diferentes condiciones hídricas fueron implementados (C: bien regado; RR: riego reducido), los cuales estaban subdivididos por cada dosis de biocarbón utilizada previamente. El tratamiento de estrés por sequía fue inducido por una disminución progresiva de la cantidad de agua de riego en cuatro periodos de diez días cada uno. La reducción de agua

fue del 25, 50, 75 y 90%, de los requerimientos hídricos de las plántulas de café, lo cuales fueron estimados a través de la pérdida de agua por evapotranspiración de cada plántula en su respectivo recipiente. El volumen de agua aplicada en cada riego durante periodo de estrés por sequía fue la siguiente: *i*) una reducción del 25% entre los 20 y 30 DDT (control macetas: 55 ml/planta vs estrés macetas: 40 ml/planta; mientras control tubos: 110 ml/planta vs estrés tubos: 85 ml/planta); *ii*) reducción del 50% entre los 30 y 40 DDT (control macetas: 55 ml/planta vs estrés macetas: 28 ml/planta; mientras, control tubos: 110 ml/planta vs estrés tubos: 55 ml/planta); *iii*) reducción del 75% entre los 40 y 50 DDT (control macetas: 55 ml/planta vs estrés macetas: 15 ml/planta; control tubos: 110 ml/planta vs estrés tubos: 30 ml/planta); y *iv*) reducción del 90% entre los 50 y 60 DDT (control macetas: 55 ml/planta vs estrés macetas: 6 ml/planta; control tubos: 110 ml/planta vs estrés tubos: 12 ml/planta). La aplicación de riego se realizaba en el día 0 y día 5 de iniciado cada periodo de estrés. Los experimentos contaron con una duración 60 días desde el trasplante. Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño completamente al azar en arreglo factorial donde el primer factor fue la condición de estrés por déficit hídrico (C: control; S: estrés) y el segundo factor fueron las cuatro dosis de biocarbón evaluadas (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) para un total de 8 tratamientos. El ensayo realizado en macetas contó con 4 plántulas por tratamiento para un total de 32 plántulas; mientras que el ensayo realizado en tubos de PVC tuvo 3 plántulas por tratamiento para un total de 24 plántulas.

### 2.2.3 Parámetros de intercambio gaseoso de la hoja

La conductancia estomática ( $g_s$ ) (estimada en los dos experimentos) al final de cada período de sequía (30, 40, 50 y 60 DDT). La cuantificación de  $g_s$  se realizó en la segunda hoja completamente expandida de la parte superior de la copa usando un porómetro de estado estacionario (SC-1; Decagon Devices Inc., Pullman, WA). Por otro lado, la transpiración total de la planta se estimó en las mismas fechas de  $g_s$  utilizando la técnica gravimétrica descrita por Díaz-Leguizamón *et al.* (2016) solamente para el experimento en macetas, la cual consiste en medir la diferencia en el peso de las plantas en sus macetas cada 24 h.

### 2.2.4 Área foliar y acumulación de materia seca

El área foliar, la materia seca de los órganos y total de la plántula fueron cuantificadas para los dos experimentos mediante la recolección de cada uno de los órganos a los 60 DDT para ambos experimentos. El área de la hoja se calculó a partir de las imágenes digitales obtenidas mediante cámara fotográfica (D3300, Nikon, Tailandia) y posteriormente, las fotos fueron analizadas utilizando un software de procesamiento de imágenes Java (Image J; Instituto Nacional de Salud Mental, Bethesda, MD). También, se estimó la Unidad de Eficiencia de Área (UAE), la cual se expresa como la cantidad de rendimiento producida sobre un área de tierra unitaria durante un período específico de crecimiento del cultivo así:  $UAE = (\text{rendimiento en peso seco/área del suelo}) \times (1/\text{duración del cultivo})$ . Finalmente, las plantas se secaron en una estufa de aire seco comprimido (ThelcoMod 27, Chicago, USA) a 80 °C durante 48 horas con el propósito de obtener el peso seco total de la planta.

### 2.2.5 Clorofilas y eficiencia de la clorofila a

El contenido relativo de clorofila (unidades At-leaf) y la eficiencia fotoquímica máxima de PSII ( $F_v/F_m$ ) se midieron en la segunda hoja completamente expandida de la parte superior de la plántula al final de cada período de sequía para los dos experimentos. El contenido de At-leaf se determinó con un clorofilómetro (At-leaf, FT Green, Wilmington, DE, US). Mientras, la relación  $F_v/F_m$  se evaluó utilizando un fluorómetro de excitación continua (Handy PEA, Hansatech Instruments, Kings Lynn, Reino Unido) utilizando clips de adaptación a la oscuridad durante 30 min. Después de la adaptación a oscuridad, se determinaron variables como la fluorescencia mínima ( $F_0$ ), fluorescencia máxima ( $F_m$ ) y la eficiencia máxima en el quantum del PSII ( $F_v/F_m$ ). La  $F_0$  se registró con luz de baja intensidad modulada ( $<0,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) sin afectar la fluorescencia variable. La  $F_m$  se estimó mediante un pulso de luz saturante de 0.8 s de largo ( $3.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). La fluorescencia variable se calculó por la diferencia entre  $F_0$  y  $F_m$ . La relación  $F_v/F_m$  se obtuvo de  $F_v$  y  $F_m$  y representa el rendimiento cuántico máximo potencial de PSII. Adicionalmente, se estimó el decrecimiento de la  $F_v/F_m$  designado como DQE acorde a la metodología descrita por de Oliveira *et al.* (2020) de manera que  $DQE (\%) = [(\text{control } F_v/F_m - \text{déficit$

hídrico  $F_v/F_m$ ) / (control  $F_v/F_m$ )  $\times 100$ ]. Los tratamientos se clasificaron en cuatro categorías DQE  $\leq 25$ , buena tolerancia;  $26 \geq DQE \leq 41$ , tolerancia moderada;  $42 \geq DQE \leq 55$ , baja tolerancia; y DQE  $\geq 56$ , sensible.

### 2.2.6 Conductividad hidráulica de la raíz y variables de raíz

La cuantificación de la conductividad hidráulica de la raíz y las variables de raíz se hicieron solamente en las plántulas del experimento realizado con tubos de PVC al finalizar el último periodo de estrés por sequía (60 DDT). La conductancia hidráulica se estimó entre las 800 a las 1100 h, utilizando un medidor de flujo de conductancia hidráulica HCFM (Gen 3; Dynamax, Houston, TX). Las lecturas de esta variable se realizaron mediante un corte en el tallo de las plántulas a una altura de 5 cm sobre el suelo, conservando las raíces dentro de los cilindros. El diámetro del tallo fue aproximadamente entre 4.0 a 5.0 mm y se adaptó el aditamento del equipo para este diámetro para poder registrar las mediciones en la parte superior de las raíces. La conductancia hidráulica de los tallos se midió con el modo de medición transitoria, que aumentó rápidamente la presión aplicada y midió simultáneamente el flujo correspondiente (Tyree *et al.*, 1995). El agua desionizada desgasificada se forzó a través del tallo de la raíz bajo presión creciente hasta que la presión alcanzó 300 kPa. El flujo instantáneo y la presión se registraron cada 2 s. La conductancia hidráulica ( $\text{kg s}^{-1} \text{kPa}^{-1}$ ) se calculó a partir de la pendiente de regresión lineal entre la presión y el flujo. Finalmente, la determinación del volumen de raíces se realizó según el método de desplazamiento de agua; mientras que la longitud de la raíz se determinó desde la corona a la punta de la raíz y se expresó en cm según las técnicas descritas por Shashidhar *et al.* (2012).

### 2.2.7 Análisis de datos

Se realizó un análisis de varianza con medidas repetidas. Posteriormente, cuando se presentaron diferencias significativas, se empleó la prueba comparativa de medias de Tukey a  $P \leq 0,05$ . Los Datos se analizaron usando el programa Statistix v 9,0 (software

analítico, Tallahassee, FL, US). Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales utilizando el programa InfoStat 2016 (Di Rienzo *et al.*, 2016).

## 2.3 Resultados

### 2.3.1 Parámetros de intercambio gaseoso de la hoja y estatus hídrico de la planta.

La **Tabla 3** resume el análisis de varianza que muestra el efecto de las dosis de biocarbón, niveles de riego y fechas de muestreo sobre la conductancia estomática ( $g_s$ ), transpiración ( $E$ ), contenido relativo de clorofila ( $At$ -leaf), y la eficiencia máxima del fotosistema del PSII ( $F_v/F_m$ ) de plántulas de café en los experimentos desarrollados en macetas y tubos. Por otro lado, la **Tabla 4** también muestra el efecto de los tratamientos de biocarbón, niveles de riego y su interacción sobre la conductancia hidráulica de la raíz ( $K$ ), fotosíntesis ( $F_n$ ), eficiencia de carboxilación ( $F_n/C_i$ ), peso seco tota (PST), peso seco de la raíz (PSR), peso seco parte aérea (PSSh), uso eficiente del agua (UEA), volumen de raíz y la unidad de eficiencia aérea (UAE) de las plántulas de café en un solo punto de muestro en ambos experimentos (a los 60 DDT).

La conductancia estomática ( $g_s$ ) para los cuatro momentos de evaluación es mostrada en la **Figura 1**. En general, se encontraron diferencias desde los 50 hasta 60 DDT en ambos experimentos (macetas y tubos). A los 50 DDT, las plantas con riego reducido (RR) evidenciaron una notoria disminución en  $g_s$ , especialmente con dosis de 0 y 4 t ha<sup>-1</sup> BC (56 y 68 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) con respecto a plantas en condiciones control (100% evapotranspiración (ET): 88 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) en el ensayo de macetas (**Figura 1A**). También, una reducción cercana al 53 y 21% para estos tratamientos con riego reducido (65 y 110 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> para 0 y 4 t ha<sup>-1</sup> BC, respectivamente) fue encontrada en comparación a plantas con buen riego (140 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> en plantas control) en el ensayo establecido en tubos (**Figura 1B**). Por otro lado, la aplicación de 8 t ha<sup>-1</sup> BC en plantas con riego reducido causó un incremento sobre la  $g_s$ , registrándose valores cercanos a las plantas bien irrigadas y no tratadas con BC en ambos ensayos (macetas: 59 vs 88 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>; tubos: 136 vs 120

mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respectivamente) a los 60 DDT. Finalmente, las diferentes dosis de BC no causaron una variación significativa sobre  $g_s$  en plantas bien irrigadas en los diferentes puntos de muestreo en ambos experimentos.

**Tabla 3.** Resumen del análisis de varianza entre diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>), niveles de riego (100% evapotranspiración vs riego reducido) y fechas de muestreo (30, 40, 50 y 60 días después de trasplante) sobre las variables fisiológicas de las plántulas de café.

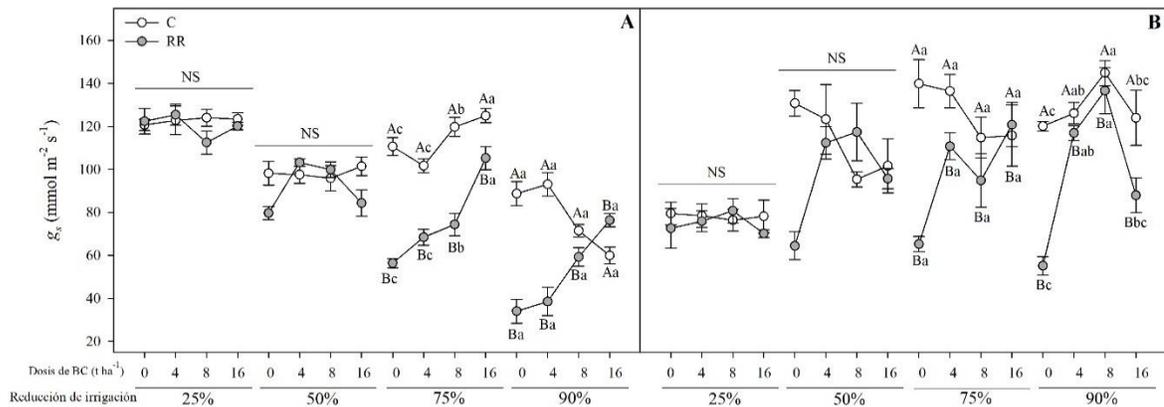
Ensayo en macetas					
Fuente de variación	df	$g_s$	$E$	Lecturas At-leaf	Relación $F_v/F_m$
Biocarbón (BC)	3	***	NS	***	*
Estrés (E)	1	***	***	***	***
BC*E	3	***	***	***	**
Tiempo	3	***	***	***	***
Tiempo*B	9	***	NS	**	**
Tiempo*E	3	***	NS	***	***
Tiempo*B*E	9	***	**	***	**
C.V. (%) <sup>1</sup>		10.14	21.82	5.60	9.96
Ensayo en tubos					
Fuente de variación	df	$g_s$		Lecturas At-leaf	Relación $F_v/F_m$
Biocarbón (BC)	3	***		**	*
Estrés (E)	1	NS		NS	***
BC*E	3	***		***	**
Tiempo	3	***		***	***
Tiempo*B	9	*		**	**
Tiempo*E	3	*		NS	***
Tiempo*B*E	9	NS		***	NS
C.V. (%) <sup>1</sup>		16.77		5.65	9.52

$g_s$ , conductancia estomática; E, transpiración; At-leaf, contenido de clorofilas en unidades At-leaf;  $F_v/F_m$ , la eficiencia máxima del fotosistema (PSII). <sup>1</sup> C.V.: coeficiente de variación.

**Tabla 4.** Resumen del análisis de la varianza del efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de riego (100% evapotranspiración vs riego reducido) sobre variables fisiológicas a los 60 días después del trasplante en los ensayos establecidos en macetas y en tubos.

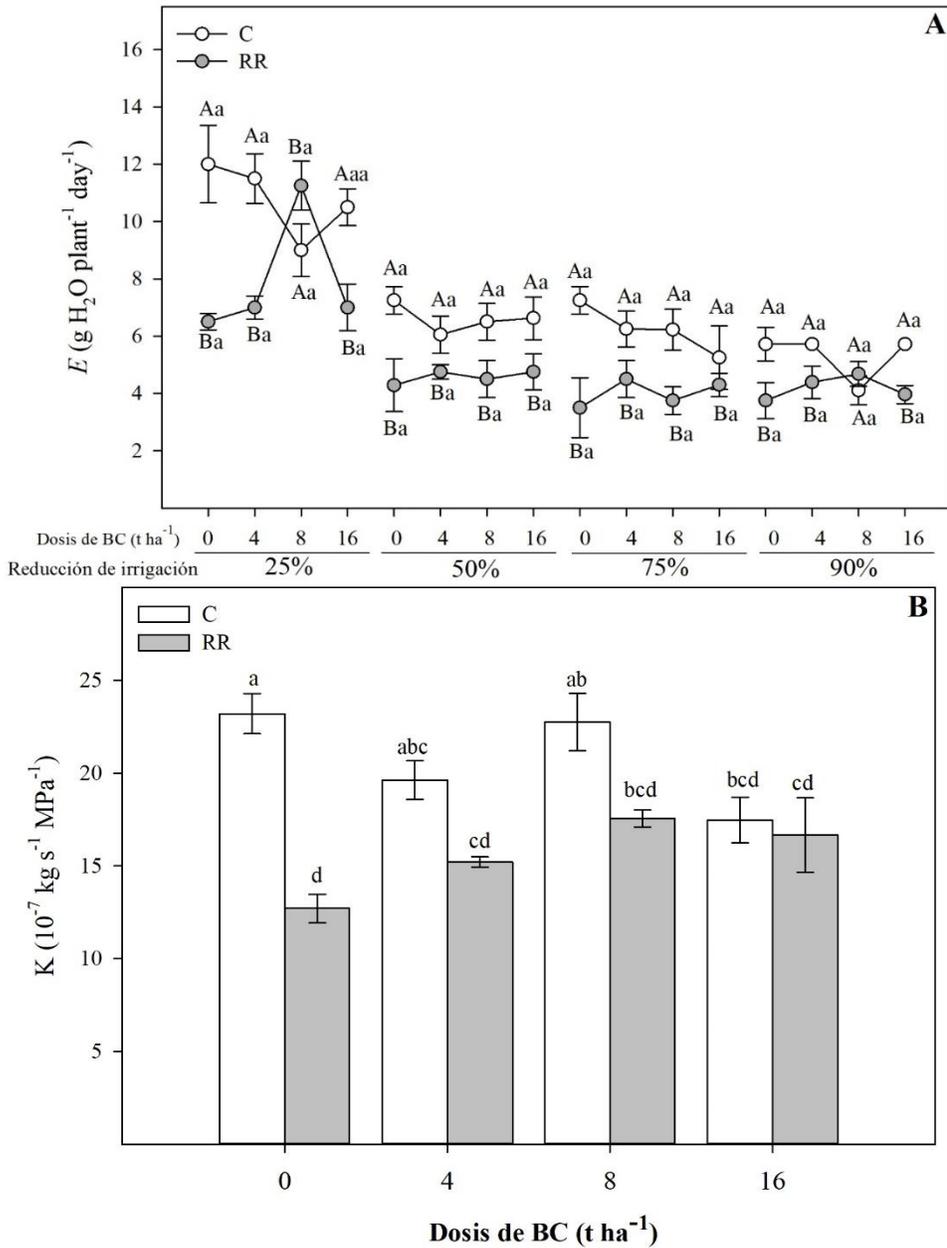
Ensayo en macetas				
Variable	Abreviación	Fuente de variación		
		Biocarbó n	Estrés hídrico	Biocarbón x Estrés hídrico
Conductancia hidráulica de la raíz	K	NS	***	**
Peso seco total	PST	**	***	NS
Peso seco raíz	PSR	***	*	**
Peso seco shoot	PSSh	NS	**	**
Uso eficiente del agua	UEA	**	***	*
Unidad de eficiencia de área	UAE	**	***	*
Ensayo en tubos				
Variable	Abreviación	Fuente de variación		
		Biocarbó n	Estrés hídrico	Biocarbón x Estrés hídrico
Fotosíntesis	$F_n$	***	***	*
Eficiencia de carboxilación	$F_n/C_i$	***	***	**
Peso seco total	PST	**	**	*
Peso seco raíz	PSR	***	***	NS
Peso seco shoot	PSSh	***	***	**
Uso eficiente del agua	UEA	**	***	**
Volumen de raíz		*	***	*
Unidad de eficiencia de área	UAE	**	**	**

z \*, \*\* y \*\*\* son significativamente diferentes en los niveles de probabilidad 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente.



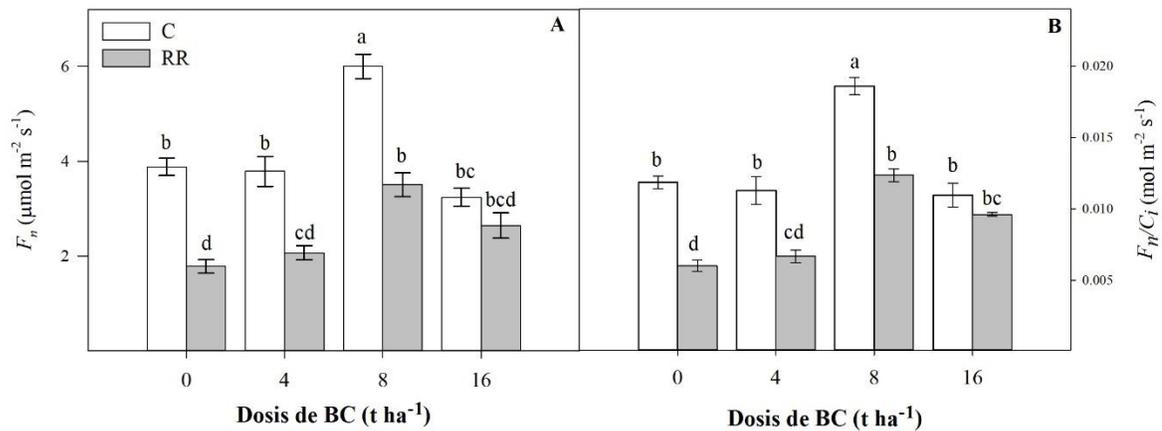
**Figura 1.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16  $\text{t ha}^{-1}$ ) y riego reducido (25, 50, 75 y 90% de las necesidades de evapotranspiración) sobre la conductancia estomática ( $g_s$ ) en hojas de plántulas de café establecidas en macetas (A) y tubos (B) en cuatro puntos de muestreo (30, 40, 50 y 60 días después de trasplante (DAT)). Las barras representan  $\pm$  error estándar (macetas  $n = 4$ ; tubos  $n = 3$ ). Letras mayúsculas se refieren a diferencias entre la condición de estrés bajo cada periodo de reducción del riego. Letras minúsculas se refieren a diferencias entre dosis de biocarbón bajo cada periodo de reducción del riego. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$

Tendencias similares a las registradas sobre  $g_s$  fueron también obtenidas en transpiración total de la planta ( $E$ ) desde los 30 hasta 60 DDT en el ensayo de materas (**Figura 2A**). En general, las plantas sin riego reducido (RR) no mostraron variaciones sobre la transpiración en las cuatro dosis de BC a través del experimento. Al final del experimento (60 DDT), plantas con riego reducido y sin BC (0  $\text{t ha}^{-1}$ ) mostraron a una reducción en la  $E$  del 34 % con respecto a plantas bien irrigadas con la misma dosis de BC (3,75 vs 5,71  $\text{g H}_2\text{O plant}^{-1} \text{ day}^{-1}$ , respectivamente). También, se observó que la aplicación de 8  $\text{t ha}^{-1}$  de BC en plántulas de café con RR favoreció  $E$  al final del ensayo (60 DDT). Con respecto a la conductividad hidráulica de la raíz ( $K$ ), plantas de café con riego reducido y 0  $\text{t ha}^{-1}$  BC también registraron una reducción del 45% ( $12,71 \times 10^{-7} \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ ) con respecto a plantas bien irrigadas y misma dosis de biocarbón ( $23,21 \times 10^{-7} \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ ). En adición, se evidenció que el incremento de las dosis de BC causó un favorecimiento sobre  $K$  en plantas con riego reducido a los 60 DDT, obteniéndose un mayor valor con 8  $\text{t ha}^{-1}$  de BC ( $17,56 \times 10^{-7} \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ ). Finalmente, la conductividad hidráulica de la raíz, en general, no mostró variaciones en las plantas con riego completo (control) a excepción de las plantas tratadas con 16  $\text{t ha}^{-1}$  BC que presentaron una pequeña caída (**Figura 2B**).



**Figura 2.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y riego reducido (90% de las necesidades de evapotranspiración) sobre la transpiración total a través del experimento (A) y conductancia hidráulica de raíz en plántulas de café a los 60 DAT (B). Los puntos o barras representan la media de cuatro plantas del ensayo de macetas  $\pm$  error estándar. En la Figura A, las letras mayúsculas se refieren a diferencias entre la condición de estrés bajo cada periodo de reducción del riego; mientras, las letras minúsculas indican diferencias entre dosis de biocarbón bajo cada periodo de reducción del riego. En la Figura B, las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$ .

La **Figura 3** resume las diferencias encontradas sobre fotosíntesis ( $F_n$ ) y eficiencia de la carboxilación ( $F_n/C_i$ ) de las plántulas de café tratadas con diferentes dosis de BC y regímenes de riego solamente en el ensayo de tubos a los 60 DDT. En general, plantas de café con riego reducido (disminución del 90% del riego) presentaron los valores más bajos en  $F_n$  y  $F_n/C_i$  independientemente de la dosis evaluada. Plantas tratadas con 0 t ha<sup>-1</sup> de BC y sometidas a riego reducido obtuvieron los valores más bajos en estos parámetros ( $F_n$ : 1,8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ;  $F_n/C_i$ : 0.006  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente). Sin embargo, la utilización de BC favoreció, especialmente, la tasa fotosintética tanto en plantas bien irrigadas (6,0  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) o con riego reducido (3,5  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) comparado a sus respectivos controles (0 t ha<sup>-1</sup> para RR: 1,8  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  y control: 3,9  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) a una dosis de 8 t ha<sup>-1</sup> (**Figura 3A**). Una tendencia similar se observó sobre la eficiencia de carboxilación para todos los tratamientos evaluados (**Figura 3B**).



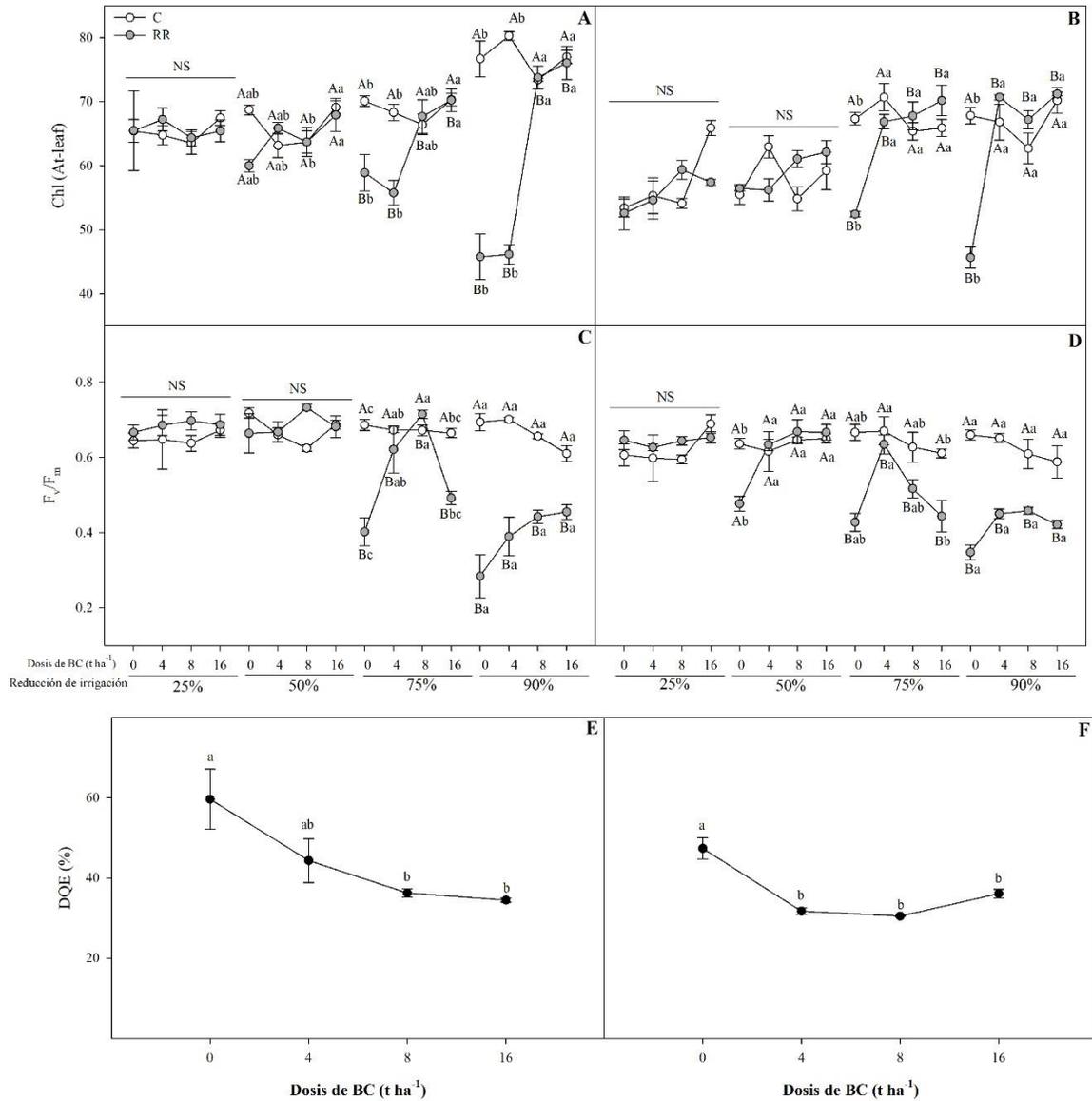
**Figura 3.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y riego reducido (90% disminución del riego) sobre la Fotosíntesis neta ( $F_n$ ) (A) y Eficiencia de la carboxilación ( $F_n/C_i$ ) (B) en plántulas de café del experimento establecidos en tubos de PVC a los 60 DAT. Las barras representan la media de tres plantas  $\pm$  error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$ .

### 2.3.2 Contenido relativo de clorofilas y fluorescencia de la clorofila a

La **Tabla 3** también muestra que diferencias fueron observadas entre los tratamientos de biocarbón, estrés hídrico y el tiempo de muestreo sobre lecturas At-leaf ( $p \leq 0,001$ ) para ambos experimentos (macetas vs tubos) y la relación  $F_v/F_m$  ( $p \leq 0,01$ ) solamente en macetas. Se observó una reducción progresiva sobre el contenido relativo de clorofila en

relación con la reducción del volumen de riego, principalmente, en las plantas sin BC en ambos ensayos (**Figura 4 y 4B**). Plantas con riego reducido y una dosis de 0 t ha<sup>-1</sup> de BC mostraron los valores más bajos en el contenido relativo de clorofila, alcanzando una reducción aproximada al 37% en los dos experimentos a los 60 DDT. Sin embargo, las mayores dosis de BC (8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) usadas causaron un incremento notorio sobre el contenido relativo de clorofila en plantas con riego reducido, registrándose valores similares a los presentados en plantas bien regadas en las diferentes dosis de BC al final de los experimentos (60 DDT) (macetas: 73,8 y 76,1 lecturas At-leaf; tubos: 67,2 y 71,2 lecturas At-leaf de 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Asimismo, el contenido relativo de clorofila, en general, no sufrió variaciones en las plantas control entre las diferentes dosis de BC a través de ambos experimentos.

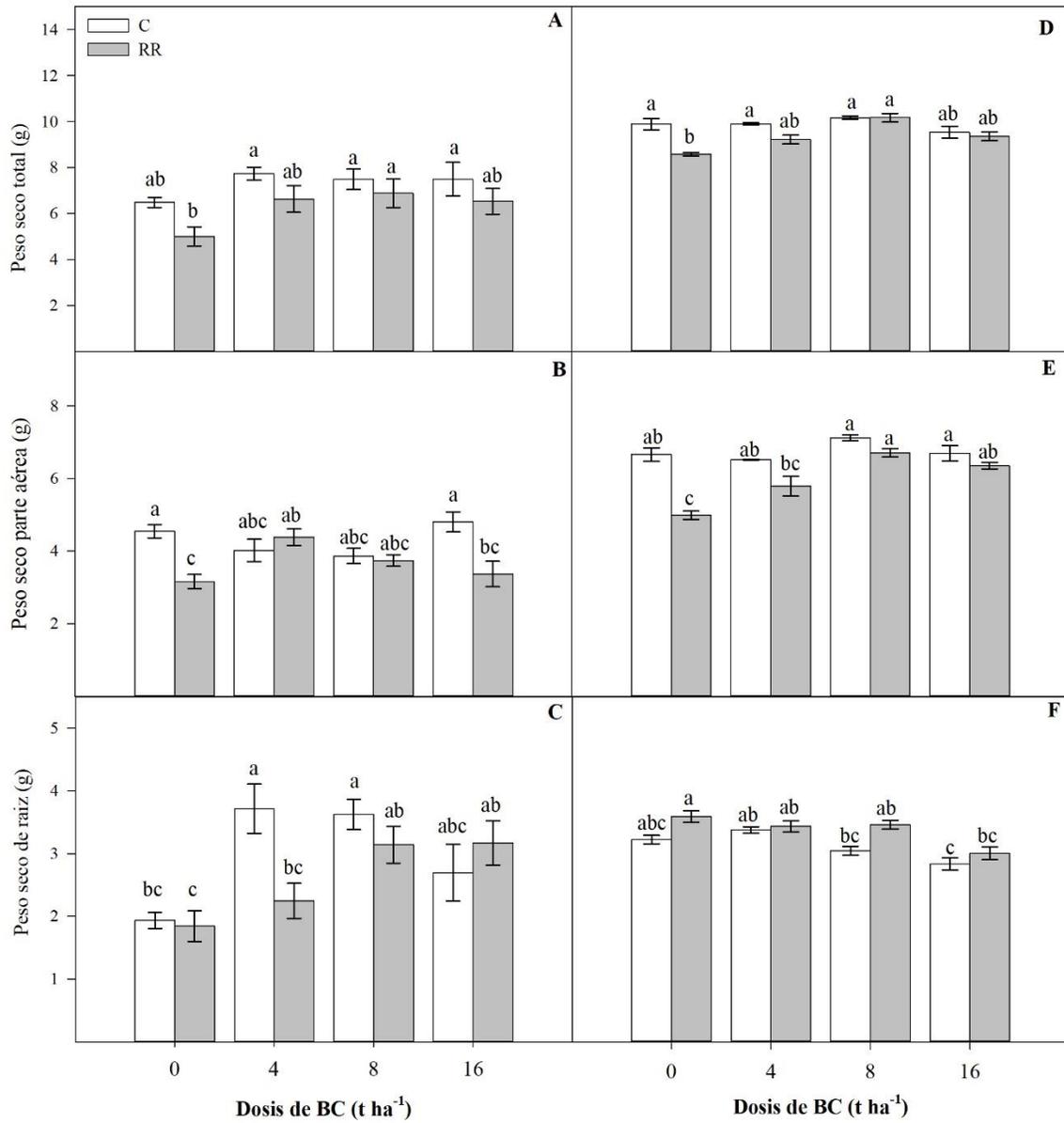
Diferencias se comenzaron a observar entre los diferentes grupos de tratamientos sobre la relación  $F_v/F_m$  a partir de los 50 DDT en macetas y 40 DDT en tubos (**Figura 4C y 4D**). Al final del ensayo, plantas con riego reducido y 0 t ha<sup>-1</sup> BC registraron una reducción de 59 % ( $F_v/F_m$ : 0,28) y 47% ( $F_v/F_m$ : 0,35) para los ensayos en macetas y tubos de PVC, respectivamente. Asimismo, la adición progresiva de dosis de BC en plantas con RR causó un ligero incremento sobre esta relación en este punto de muestreo. Por otro lado, la eficiencia máxima del quantum del PSII (relación  $F_v/F_m$ ) en plantas bien irrigadas y tratadas con diferentes dosis de BC fue alrededor de ~0,65 a través los dos experimentos. Finalmente, los tratamientos se clasificaron en cuatro categorías según el decrecimiento de la  $F_v/F_m$  (DQE) bajo condiciones de riego reducido donde:  $DQE \leq 25$ , buena tolerancia;  $26 \geq DQE \leq 41$ , tolerancia moderada;  $42 \geq DQE \leq 55$ , baja tolerancia; y  $DQE \geq 56$ , sensible. En este sentido, plantas de café del ensayo en macetas con 0 t ha<sup>-1</sup> BC alcanzaron valores cercanos al 60% (sensibilidad a la sequía); 4 t ha<sup>-1</sup> BC registró un DQE de 44% (baja tolerancia a la sequía) y 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC fue en promedio de 35% (tolerancia moderada) (**Figura 4E**). En cuanto a las plantas del ensayo realizado en tubos, el decrecimiento para la dosis de 0 t ha<sup>-1</sup> BC fue significativamente mayor con respecto a las demás dosis (~47% vs ~35%) (**Figura 4F**).



**Figura 4.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y riego reducido (25, 50, 75 y 90% de las necesidades de evapotranspiración) sobre el contenido relativo de clorofila expresado como unidades At-leaf (A y B), la eficiencia máxima del quantum en el PSII (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) (C y D) y el decrecimiento de la F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> (DQE) a los 60 DAT (90% disminución del riego) (E y F). Las figuras A, C y E representan el ensayo en macetas; mientras, las figuras B, D y F son el ensayo en tubos. Los puntos o barras representan la media de cuatro plantas del ensayo de macetas y de tres plantas del ensayo de tubos ± error estándar. En las figuras A, B, C y D las letras mayúsculas se refieren a diferencias entre la condición de estrés bajo cada periodo de reducción del riego; mientras, las letras minúsculas indican diferencias entre dosis de biocarbón bajo cada periodo de reducción del riego. En la Figura E y F, las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$

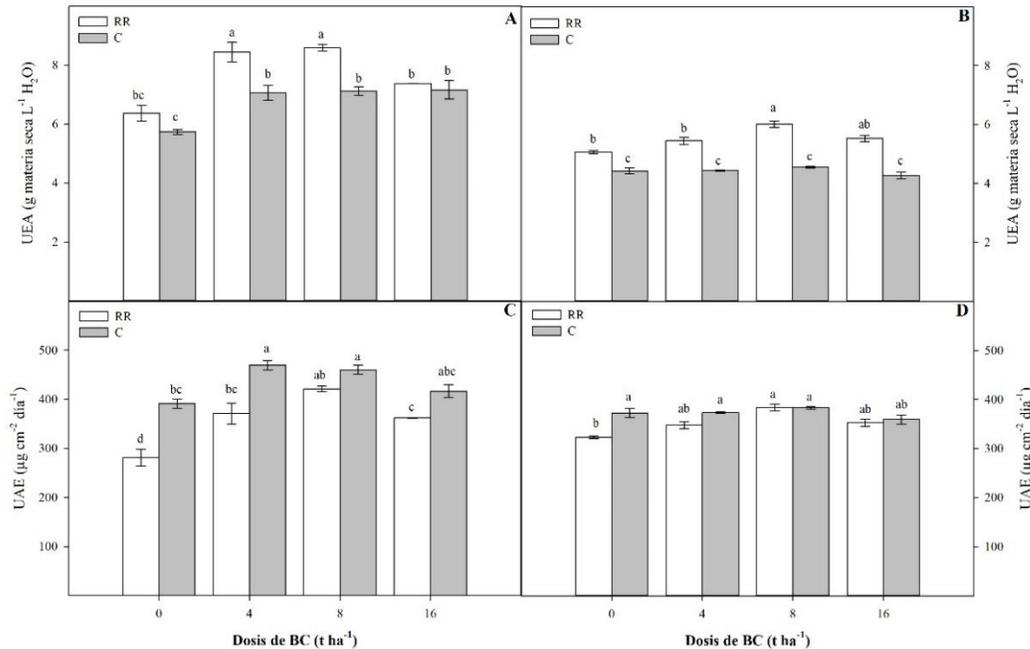
### 2.3.3 Acumulación de materia seca y eficiencia del área unitaria

Diferencias fueron encontradas entre los tratamientos de biocarbón, riego reducido y su interacción sobre la acumulación de materia seca en la raíz, parte aérea y total y uso eficiente del agua (**Tabla 4**). En general, plantas con riego reducido y sin BC presentaron menor acumulación de materia seca total en relación con las bien irrigadas en ambos experimentos. Las plantas sin BC (dosis 0 t ha<sup>-1</sup>) y con riego reducido mostraron una menor materia seca total comparado a sus controles (macetas: 5,0 g vs 6,5 g; tubos 8,6 g vs 9,9 g, respectivamente). Sin embargo, el incremento de las dosis de BC favorecieron una acumulación de biomasa en las plantas sometidas a un riego reducido, alcanzándose valores similares a las plantas control de cada dosis. Asimismo, diferencias no fueron encontradas entre las diferentes dosis de BC en las plantas bien irrigadas en ambas pruebas (**Figura 5A** y **5D**). También, la acumulación de materia seca en la parte aérea de plantas de café mostró tendencias similares a las observadas en la biomasa total donde plantas con riego reducido y 0 t ha<sup>-1</sup> BC tuvieron un menor peso con respecto a plantas bien irrigadas con la misma dosis de biocarbón para ambos ensayos (macetas: 3,2 g vs 4,6 g; tubos: 5,0 g vs 6,7 g). En esta variable, se pudo observar que las diferentes dosis de BC también causaron un incremento positivo de la materia seca de la parte aérea en plantas con riego reducido; mientras, las plantas bien regadas no mostraron variaciones (**Figura 5B** y **5E**). Finalmente, los pesos secos de raíz mostraron comportamientos diferentes entre ensayos. En el ensayo de macetas, plantas bien irrigadas con aplicación principalmente de 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC registraron un incremento cercano al 90% en la materia seca de la raíz con respecto a plantas sin aplicación de biocarbón (3,7 y 3,6 g vs 1,9 g, respectivamente) (**Figura 5C**). Con respecto a plantas con riego reducido, una mayor acumulación de materia seca a nivel de raíz se observó con 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC donde no se apreciaron diferencias entre plantas control y estrés. Por otro lado, la aplicación de 16 t ha<sup>-1</sup> BC evidenciaron los valores más bajos de materia seca en la raíz en plantas bien irrigadas y riego reducido en comparación a plantas sin biocarbón en ambas condiciones de riego en el ensayo de tubos (16 t ha<sup>-1</sup> 2,8 g y RR 3,0 g vs 0 t ha<sup>-1</sup> BC 3,2 g y RR 3,5 g, respectivamente) (**Figura 5F**).



**Figura 5.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y riego reducido sobre la acumulación de materia seca en diferentes órganos en plántulas de café a los 60 DAT (90% disminución del riego): A y D) Peso seco total; B y E) Peso seco de la parte aérea; C y F) Peso seco de la raíz. Las figuras A, C y E representan el ensayo en macetas; mientras, las figuras B, D y F son el ensayo en tubos. Las barras representan la media de cuatro plantas del ensayo de macetas y de tres plantas del ensayo de tubos ± error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$

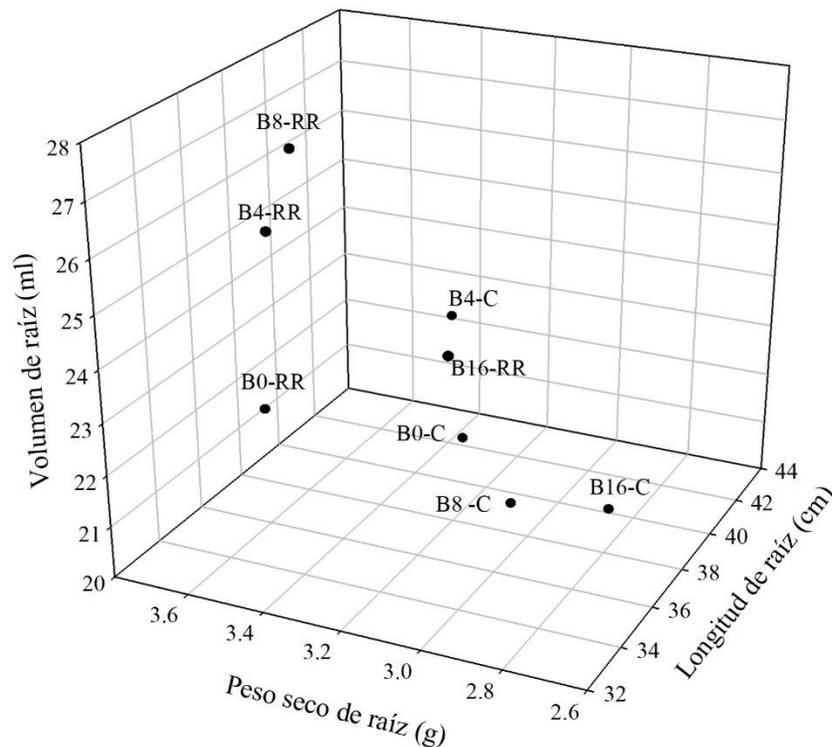
En cuanto al uso eficiente del agua (UEA), plantas con RR mostraron valores más altos en comparación a las plántulas bien irrigadas a los 60 DDT para ambos experimentos. Sin embargo, la aplicación de 8 t ha<sup>-1</sup> BC bajo déficit hídrico indujo un incremento del 50% sobre UEA en las plántulas del ensayo realizado en macetas (8,6 vs 5,7 g materia seca L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O) y del 36% en el ensayo realizado en tubos de PVC (6,0 vs 4,4 g materia seca L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O) (**Figura 6A** y **6B**). Asimismo, el riego reducido generó una disminución en la Unidad de Eficiencia de Área (UAE) en plantas sin aplicación de biocarbón (macetas 281 vs 391 µg cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>; tubos 324 vs 373 µg cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, respectivamente). Sin embargo, la aplicación de 8 t ha<sup>-1</sup> BC causó también una mayor UAE en plantas de café con riego reducido de ambos experimentos con respecto plantas con 0 t ha<sup>-1</sup> BC bajo estrés (macetas: 420 µg cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>; tubos: 383 µg cm<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, respectivamente) (**Figura 6C** y **6D**).



**Figura 6.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y riego reducido (25, 50, 75 y 90% de las necesidades de evapotranspiración) sobre el Uso eficiente del agua (WUE) (A y B) y la Unidad de Eficiencia del Área (UAE) (C y D) en plantas de plántulas de café a los 60 DAT (90% disminución del riego). Las figuras A y C representan el ensayo en macetas; mientras, las figuras B y D son el ensayo en tubos. Las barras representan la media de cuatro plantas del ensayo de macetas y de tres plantas del ensayo de tubos ± error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$

### 2.3.4 Variables de raíz

La **Figura 7** resume los efectos de los tratamientos de biocarbón y riego reducido sobre la longitud (RL), volumen (RV) y peso seco de la raíz (PSR) de plántulas de café. En general, las raíces de plantas bien irrigadas y sin aplicación de biocarbón mostraron una biomasa de 3,2 g, longitud de 39 cm y volumen de 21,3 mL. En contraste, se observó que las plántulas con 0 t ha<sup>-1</sup> BC y riego reducido presentaron raíces más cortas, menor volumen, pero un mayor peso seco en comparación a las plántulas bien irrigadas (RL: 35,8 cm; RV: 22,4 y PSR: 3,6 g). Por otro lado, una aplicación de 8 t ha<sup>-1</sup> BC en la condición de periodos de riego reducido estimuló positivamente el volumen y peso de raíces, alcanzando los valores más altos entre los tratamientos de las plántulas estresadas (V: 27,6 ml y RL: 35 cm).



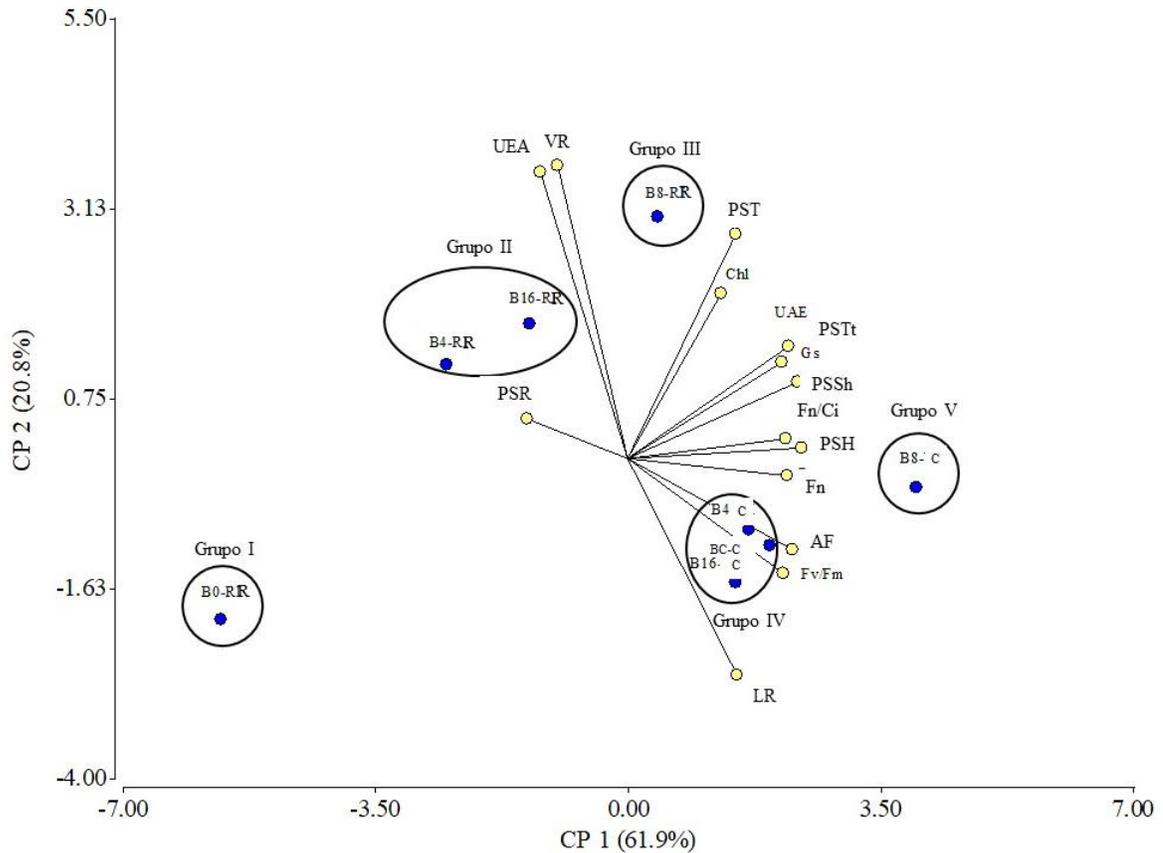
**Figura 7.** Gráfica tridimensional (longitud de raíz, peso seco de la raíz y volumen de raíz) para plántulas de café (*Coffea arabica* L.) en condiciones de déficit hídrico del experimento realizado en tubos de PVC a los 60 DAT (90% disminución del riego). B: dosis de biocarbón; C: Control; S: Estrés por riego reducido. Los datos corresponden a la media de tres puntos de datos.

Finalmente, la **Figura 8** muestra el análisis de componentes principales (Biplot) para las variables evaluadas en el experimento establecido en tubos de PVC a los 60 DDT (reducción del 90% del riego). Los tratamientos son identificados por puntos, mientras que las variables fueron representadas por vectores. En este sentido, se encontró que el PCA1 y PCA2 representaron el 61.9 y 20.8 % de la variación de los diferentes atributos estudiados, respectivamente. Basado en lo anterior, los vectores de UAE, PST,  $G_s$ , PSSh,  $F_n$ ,  $F_n/C_i$ , LDW, LA y  $F_v/F_m$  tienen ángulos cercanos al origen, indicando que hay una alta correlación entre el comportamiento fisiológico de las plantas de café con respecto a estas variables. Se identificó que la aplicación de 8 t ha<sup>-1</sup> BC en plantas bien irrigadas formaron un grupo único (V). Por lo contrario, plantas con riego reducido y sin aplicación de biocarbón (grupo I) se ubicaron en el sector opuesto al grupo V, indicando un efecto negativo del riego reducido sobre las variables fisiológicas. En adición, tres efectos diferenciales fueron observados en la aplicación de biocarbón para las dos condiciones de irrigación de las plantas de café: i) 4 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC con riego reducido se comportaron con la misma tendencia al grupo I; ii) 8 t ha<sup>-1</sup> BC con riego reducido (grupo III) tuvo un menor efecto positivo sobre las variables fisiológicas evaluadas; finalmente, iii) plantas bien irrigadas con 0, 4 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC (grupo IV) representaron la mejor respuesta fisiológica mostrando un comportamiento similar al grupo V.

## 2.4 Discusión

Biocarbón (BC) ha sido reportado como una alternativa para el alivio de estreses abióticos en plantas (Ali *et al.*, 2017; Riaz *et al.*, 2019). Sin embargo, el conocimiento sobre el efecto de aplicación de biocarbón sobre el comportamiento fisiológico en plantas de café a condiciones de déficit hídrico es aún poco conocido. En el presente trabajo, la aplicación de diferentes dosis de BC (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) en plántulas de esta especie fue evaluado bajo condiciones de déficit hídrico, encontrándose que aplicaciones de 8 t ha<sup>-1</sup> BC causaron un favorecimiento sobre algunos parámetros fisiológicos tales como: fotosíntesis, conductancia estomática, uso eficiente del agua y contenido de pigmentos fotosintéticos en condiciones de riego reducido. Estudios recientes han mostrado que aplicaciones de biocarbón mitigaron los efectos del déficit hídrico en cultivos como maíz (Romdhane *et al.*,

2019), trigo (Abbas *et al.*, 2018) y soya (Hafeez *et al.*, 2017) donde estos autores observaron que el BC mejoró el crecimiento, la fotosíntesis y el rendimiento; así como también redujo el estrés oxidativo posiblemente debido a las mejoras en las características fisicoquímicas (pH, conductividad eléctrica y nutrientes en el suelo) y el contenido de agua de los suelos tratados).



**Figura 8.** Biplot de Análisis de Componente Principal (PCA) de diferentes variables fisiológicas en plántulas de café (*Coffea arabica* L.) bajo condiciones de estrés por déficit hídrico del experimento realizado en tubos de PVC. RDW: peso seco de la raíz; RV: volumen de raíz; RL: longitud de raíz; Chl: Contenido de clorofilas At-leaf; SDW: peso seco del tallo; TDW: peso seco total; ShDW: peso seco de la parte aérea; Gs: conductancia estomática; UAE: eficiencia del área unitaria; PSH: peso seco de las hojas; Fn: fotosíntesis neta; Fn/Ci: Eficiencia de carboxilación; AF: área foliar; Fv/Fm: eficiencia máxima en el quantum del PSII. C: Control; S: Estrés por déficit hídrico. B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>.

La reducción en la asimilación de CO<sub>2</sub> por sequía puede ser debida a limitaciones estomáticas (Fracasso *et al.*, 2016). También, se registran limitaciones de tipo no estomáticas en forma de daños a nivel bioquímico y estructural en condiciones de sequía

severas (Keshavarz Afshar *et al.*, 2015). En el presente estudio, se evidenció un impacto negativo del riego reducido sobre las propiedades de intercambio gaseoso ( $F_n$ ,  $g_s$  y  $E$ ) cuando las aplicaciones de biocarbón fueron bajas (0 y 4 t ha<sup>-1</sup>). Sin embargo, se ha comprobado que aplicaciones de biocarbón pueden ayudar a mitigar los daños asociados al déficit hídrico en plantas (Abiddet *et al.*, 2020; Abbas *et al.*, 2018). Esto es debido a que el BC ayuda a retener mayor cantidad de agua en el suelo (Kuzyakov, 2009), disminuye la resistencia a la penetración de las raíces (Busscher *et al.*, 2010) y puede mejorar la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Liang *et al.*, 2006). En este contexto, los resultados mostraron que aplicaciones de 8 t ha<sup>-1</sup> BC ayudaron a mitigar los efectos negativos del riego reducido en plantas de café e incluso estimularon la fotosíntesis en plantas bien irrigadas (**Figura 3**). Lo anterior concuerda con lo reportado por Lyu *et al.* (2016) donde ellos observaron que una aplicación de 9 t ha<sup>-1</sup> de BC mejoró el contenido de agua en el suelo, generando un efecto positivo en el potencial hídrico y fotosíntesis en plantas de *Pyrus ussuriensis*. Abbidet *et al.* (2019) también reportaron que una ventaja de las aplicaciones de BC es la mayor disponibilidad de agua en el suelo, permitiendo un incremento moderado de  $g_s$  y un incremento de  $F_n$ .

Los valores de contenido relativo de clorofila (lecturas At-leaf) y relación  $F_v/F_m$  fueron considerablemente reducidos por el riego reducido en plantas de café, especialmente, en aquellas plantas que no contaron con aplicación de biocarbón. No obstante, aumentos en el contenido de pigmentos fotosintéticos y  $F_v/F_m$  fueron registrados con el incremento de las dosis de BC, indicando un efecto positivo sobre la mitigación del impacto del déficit hídrico. Keshavarz-Afshar *et al.* (2016) observaron que aplicaciones edáficas de 1 y 2 % (p/p) de biocarbón mejoraron la síntesis de pigmentos de clorofila mediante una mayor retención de agua del suelo en plantas de *Silybum marianum* bajo sequía. Por otro lado, Lyu *et al.* (2016) encontraron que la cinética de la fluorescencia de la clorofila en plantas estresadas por sequía de *Pyrus ussuriensis* y tratadas con biocarbón fue afectada en menor medida. Estos autores también sugieren un mejor comportamiento de las plantas con BC es debido a una menor tasa de disminución del nivel de agua del suelo causado por el biocarbón, generando un efecto positivo en el potencial hídrico de las hojas. En adición, Gavili *et al.* (2019) reportan que un mayor nivel de pigmentos fotosintéticos en las

plantas de soya tratadas con biocarbón estuvo relacionado con una mayor concentración de N foliar con respecto a plantas sin aplicación de BC.

Se observó una menor acumulación de materia seca en plantas de café con riego reducido y sin aplicación de BC (**Figura 5**). Estudios desarrollados por Pranata-Erdiansyah *et al.* (2019) también observaron una reducción en la biomasa en plántulas de café robusta bajo condiciones de reducción del riego a un nivel del 66% de la capacidad de campo. No obstante, los resultados obtenidos en este trabajo registraron que aplicaciones altas de BC (superiores a 8 t ha<sup>-1</sup>) favorecieron la acumulación de materia seca bajo condiciones de déficit hídrico. Tendencias similares fueron también encontradas por Gavili *et al.* (2019), quienes reportaron que una aplicación edáfica al 1,25% (p/p) de BC aumentó significativamente el rendimiento de materia seca (35%) y fresca (27%) en relación con el control (0% de biocarbón) en plantas de soya en plantas con y sin estrés hídrico. Deng *et al.* (2019) también concluyeron que los beneficios del biocarbón sobre el crecimiento de las plantas en ambientes con estrés hídrico son debido a un aumento en la capacidad de retención de agua del suelo y al incremento en el contenido de carbono del suelo resultante de la dosis de biocarbón utilizada.

El UEA y *K* mostraron también un incremento en plantas con 8 t ha<sup>-1</sup> BC y riego reducido (**Figura 5B** y **Figura 6**). *K* puede estar influenciada por factores como la anatomía y arquitectura de la raíz (Yin *et al.* 2014). En este estudio, la aplicación de BC (8 t ha<sup>-1</sup>) incrementaron el volumen, longitud y materia seca de las raíces en riego reducido. Romdhane *et al.* (2019) y Abideen *et al.* (2020) también observaron un mayor crecimiento de raíces en plantas de maíz y *Phragmites karka* tratadas con BC y sequía de plantas. Estos autores concluyeron que el BC causa una mejor acumulación de materia en raíces porque puede favorecer la absorción de agua y nutrientes. Finalmente, esta mayor absorción de agua y nutrientes debido al BC en condiciones de déficit hídrico puede también explicar porque plantas de café con riego reducido y tratadas con 8 t ha<sup>-1</sup> presentaron un mayor UEA, ya que Uzoma *et al.* (2011) también registraron un mejor UEA en plantas de maíz tratadas con biocarbón de estiércol de ganado.

Los resultados obtenidos de este estudio son importantes para el sector cafetero porque muestran una serie de ventajas desde el enfoque fisiológico y manejo del cultivo del uso de BC. Es importante señalar que la incorporación de biocarbón al suelo es una estrategia inmediata y eficiente para reducir los efectos negativos de períodos de déficit hídrico en café como se ha concluido en otras especies (Abidden *et al.*, 2020; Gavili *et al.*, 2019; Hafeez *et al.*, 2017; Lyu *et al.*, 2016). Otra ventaja de este estudio es que el análisis de respuestas fisiológicas como intercambio gaseoso de las hojas, uso eficiente del agua, pigmentos fotosintéticos, eficiencia máxima del quantum en el PSII, conductancia hidráulica de la raíz y parámetros de la raíz ayudaron a comprender la relación entre los mecanismos de aclimatación de las plantas de café a la sequía y los efectos de las diferentes dosis de BC aplicadas. Los resultados obtenidos han proporcionado información para recomendar el aprovechamiento de residuos del grano de café mediante la transformación en biocarbón, lo cual ayuda a la sostenibilidad del sistema productivo porque esta enmienda muestra un impacto positivo para la relación planta-suelo, especialmente, en condiciones de estrés hídrico (Lehman *et al.*, 2011; Jeffery *et al.*, 2017),

En conclusión, el riego reducido afectó negativamente diferentes procesos fisiológicos como la fluorescencia de la clorofila  $\alpha$ , intercambio gaseoso de la hoja, acumulación de materia seca y estatus hídrico de la planta, indicando que la planta de café muestra susceptibilidad moderada al déficit hídrico, como fue evidenciado en los valores de DQE. Adicionalmente, aplicaciones de  $8 \text{ t ha}^{-1}$  de biocarbón fabricado a partir de pulpa de café causaron un efecto positivo sobre el comportamiento fisiológico, lo cual fue evidenciado principalmente en una estimulación de la fotosíntesis y un mejor sistema de raíces destinado generando un uso eficiente del agua en plantas de café Castillo bien irrigadas y con riego reducido. Lo anteriores resultados nos permiten sugerir que el uso de BC puede ser una alternativa de manejo agronómico interesante para manejar situaciones de déficit hídrico moderado en el cultivo del café.

## 2.5 Bibliografía

Abbas, T., Rizwan, M., Ali, S., Adrees, M., Mahmood, A., Zia-ur-Rehman, M., Ibrahim, M., Arshad, M., & Qayyum, M. F. (2018). Biochar application increased the growth and

- yield and reduced cadmium in drought stressed wheat grown in an aged contaminated soil. *Ecotox Environ safe*, 148, 825-833.
- Abideen, Z., Koyro, H. W., Huchzermeyer, B., Ansari, R., Zulfiqar, F., & Gul, B. (2020). Ameliorating effects of biochar on photosynthetic efficiency and antioxidant defence of *Phragmites karka* under drought stress. *Plant Biology*, 22, 259-266.
- Ahmad, M., Lee, S. S., Lee, S. E., Al-Wabel, M. I., Tsang, D. C., & Ok, Y. S. (2017). Biochar-induced changes in soil properties affected immobilization/mobilization of metals/metalloids in contaminated soils. *J Soils Sediments*, 17, 717-730.
- Ali, S., Rizwan, M., Qayyum, M. F., Ok, Y. S., Ibrahim, M., Riaz, M., Salem-Arif, M., Hafeez, F., Añ-Wabel, M. & Shahzad, A. N. (2017). Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review. *Environ Sci Pollut R*, 24, 12700-12712.
- Alvarado-Sanabria, O., Garcés-Varón, G., & Restrepo-Díaz, H. (2017). Physiological response of rice plants (*Oryza sativa* L.) subjected to different periods of two night temperatures. *J Stress Physiol Biochem*, 13, 35-43.
- Amoakwah, E., Frimpong, K. A., Okae-Anti, D., & Arthur, E. (2017). Soil water retention, air flow and pore structure characteristics after corn cob biochar application to a tropical sandy loam. *Geoderma*, 307, 189-197.
- Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *Afr J Agric Res*, 6, 2026-2032.
- Arcila-Pulgarín, J., Buhr, L., Bleiholder, H., Hack, H., Meier, U., & Wicke, H. (2002). Application of the extended BBCH scale for the description of the growth stages of coffee (*Coffea* spp.). *Ann App Biol*, 141, 19-27.
- Batool A., Taj, S., Rashid, A., Khalid, A., Qadeer S., Saleem, A., & Ghufraan, M. (2015). Potential of soil amendments (Biochar and Gypsum) in increasing water use efficiency of *Abelmoschus esculentus* L. Moench. *Front. Plant Sci*, 6:733. doi:10.3389/fpls.2015.00733.
- Beebe, S. E., Rao, I. M., Blair, M. W., & Acosta-Gallegos, J. A. (2013): Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Frontiers in physiology*, 4.
- Bunn, C., Läderach, P., Rivera, O. O., & Kirschke, D. (2015). A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*, 129, 89-101.

- Busscher, W. J., Novak, J. M., Evans, D. E., Watts, D. W., Niandou, M. A. A., & Ahmedna, M. (2010). Influence of biochar on physical properties of a Norfolk loamy sand. *Soil Sci*, 175, 10–14.
- Chaudhary, S., Kusakabe, A., & Melgar, J. C. (2016). Phytophthora infection in flooded citrus trees reduces root hydraulic conductance more than under non-flooded condition. *Scientia Horticulturae*, 202, 107-110.
- Chang, K. Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., & Joseph, S. (2008). Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 45, 629-634.
- Ch'ng, H. Y., Ahmed, O. H., & Majid, N. M. A. (2015). Improving phosphorus availability, nutrient uptake and dry matter production of *Zea mays* L. on a tropical acid soil using poultry manure biochar and pineapple leaves compost. *Exp Agric*, 52, 447-465.
- Dadi, D., Daba, G., Beyene, A., Luis, P., & Van der Bruggen, B. (2019). Composting and co-composting of coffee husk and pulp with source-separated municipal solid waste: a breakthrough in valorization of coffee waste. *Int J Recycl Org Waste Agricult*, 8, 263–277 <https://doi.org/10.1007/s40093-019-0256-8>
- DaMatta, F. M., Avila, R. T., Cardoso, A. A., Martins, S. C., & Ramalho, J. C. (2018). Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: A review. *J Agr Food Chem*, 66, 5264-5274.
- Deng, B., Bada, B., Tammeorg, P., Helenius, J., Luukkanen, O., & Starr, M. (2019). Drought stress and Acacia seyal biochar effects on sorghum gas exchange and yield: A greenhouse experiment. *Agr Nat Resour*, 53, 573-580.
- de Oliveira, M. M. T., Shuhua, L., Kumbha, D. S., Zurgil, U., Raveh, E., & Tel-Zur, N. (2020). Performance of *Hylocereus* (Cactaceae) species and interspecific hybrids under high-temperature stress. *Plant Physiol Bioch*, 153, 30-39.
- Díaz-Leguizamón, J. J., Chingaté-Cruz, O. F., Sánchez-Reinoso, A. D., & Restrepo-Díaz, H. (2016). The effect of foliar applications of a bio-stimulant derived from algae extract on the physiological behavior of lulo seedlings (*Solanum quitoense* cv. Septentrionale). *Ciencia Investig Agrar*, 43, 25-37.
- Di Rienzo J. A., Casanoves F., Balzarini M. G., Gonzalez L., Tablada M., & Robledo C. W. (2016). InfoStatversion 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Drake, J. E., Power, S. A., Duursma, R. A., Medlyn, B. E., Aspinwall, M. J., Choat, B., Creek, D., Eamus, D., Maier, C., Pfautsch, S., Smith, R. A., & Tissue, D. T. (2017).

- Stomatal and non-stomatal limitations of photosynthesis for four tree species under drought: A comparison of model formulations. *Agr Forest Meteorol*, 247, 454-466.
- Dubberstein, D., Rodrigues, W. P., Semedo, J. N., Rodrigues, A. P., Pais, I. P., Leitão, A. E., Partelli, F. L., Campostrini, E., Reboredo, F., Scotti-Campos, P., Lidon, F. C., Ribeiro-Barros, A. I., DaMatta, F. M., & Ramalho, J. C. (2017). Mitigation of the negative impact of warming on the Coffee crop: The Role of Increased Air [CO<sub>2</sub>] and Management Strategies. In Climate Resilient Agriculture-Strategies and Perspectives. In: Shanker A (ed) Climate resilient agriculture, strategies and perspectives. Chapter 4., *IntechOpen, London*, pp 57–85.
- Echeverria, M. C., & Nuti, M. (2017). Valorisation of the residues of coffee agro-industry: perspectives and limitations. *The Open Waste Management Journal*, 10(1).
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2020). Estadísticas cafeteras. Retrieved April 16, 2021, from <https://federaciondecafeteros.org/wp/estadisticas-cafeteras/>
- Fischer, B., Manzoni, S., Morillas, L., García, M., Johnson, M., & Lyon, S. (2019). Can biochar improve agricultural water use efficiency? *Geophysical Research Abstracts*, 21, EGU2019-7358. EGU General Assembly.
- Fracasso, A., Trindade, L., & Amaducci, S. (2016). Drought tolerance strategies highlighted by two *Sorghum bicolor* races in a dry-down experiment. *J Plant Physiol*, 190, 1-14.
- Gavili, E., Moosavi, A. A., & Haghghi, A. A. K. (2019). Does biochar mitigate the adverse effects of drought on the agronomic traits and yield components of soybean? *Industrial crops and products*, 128, 445-454.
- Gonçalves, M., Guerreiro, M. C., Ramos, P. H., de Oliveira, L. C. A., & Sapag, K. (2013). Activated carbon prepared from coffee pulp: potential adsorbent of organic contaminants in aqueous solution. *Water Sci Technol*, 68, 1085-1090.
- Hafeez, Y., Iqbal, S., Jabeen, K., Shahzad, S., Jahan, S., & Rasul, F. (2017). Effect of biochar application on seed germination and seedling growth of *Glycine max* (L.) Merr. Under drought stress. *Pak J Bot*, 49, 7-13.
- Hussain, S., Rao, M. J.; Anjum, M. A., Ejaz, S., Zakir, I., Ali, M. A., Ahmad, N., Ahmad, S. (2019). Oxidative stress and antioxidant defense in plants under drought conditions. In: *Hasanuzzaman, M., Hakeem, K., Nahar, K. & Alharby H. (eds) Plant Abiotic Stress Tolerance; Springer. Cham, Switzerland*, pp. 207–219.
- Jeffery, S., Verheijen, F. G., Kammann, C., & Abalos, D. (2016). Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis. *Soil Biol Biochem*, 101, 251-258.

- Karhu, K., Mattila, T., Bergström, I., & Regina, K. (2011). Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity—Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, ecosystems & environment*, *140*, 309-313.
- Keshavarz-Afshar, R., Hashemi, M., DaCosta, M., Spargo, J., & Sadeghpour, A. (2015). Biochar application and drought stress effects on physiological characteristics of *Silybum marianum*. *Commun Soil Sci Plan*, *47*, 743-752.
- Kloss, S., Zehetner, F., Wimmer, B., Buecker, J., Rempt, F., & Soja, G., (2014). Biochar application to temperate soils: effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. *J Plant Nutr Soil Sci*, *177*, 3–15
- Kuzyakov Y, Subbotina I, Chen H, Bogomolova I, & Xu X. (2009). Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by <sup>14</sup>C labeling. *Soil Biol Biochem*, *41*, 210–219.
- Lehman, N. L. (2009). The ubiquitin proteasome system in neuropathology. *Acta neuropathologica*, *118*, 329-347.
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemsad, J. O., Thies, J. Luizão, F. J., Petersen, J., & Neves, E. G. (2006). Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Sci Soc Am J*, *70*, 1719-1730.
- Lobell, D. B., & Gourdji, S. M. (2012). The influence of climate change on global crop productivity. *Plant Physiology*, *160*, 1686-1697.
- Lyu, S., Du, G., Liu, Z., Zhao, L., & Lyu, D. (2016). Effects of biochar on photosystem function and activities of protective enzymes in *Pyrus ussuriensis* Maxim. under drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, *38*, 1-10.
- Merlaen, B., De Keyser, E., Ding, L., Leroux, O., Chaumont, F., & Van Labeke, M. C. (2019). Physiological responses and aquaporin expression upon drought and osmotic stress in a conservative vs. prodigal *Fragaria x ananassa* cultivar. *Plant Physiol Bioch*, *145*, 95-106.
- Marques, M. C., Nascimento, C. W. A., da Silva, A. J., & da Silva Gouveia-Neto, A. (2017). Tolerance of an energy crop (*Jatropha curcas* L.) to zinc and lead assessed by chlorophyll fluorescence and enzyme activity. *S Afr J Bot*, *112*, 275-282
- Montoya, P. (2006). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café. Manizales: Universidad de Caldas. 107 p.
- Morales, F., Ancín, M., Fakhret, D., González-Torralba, J., Gámez, A. L., Seminario, A., Soba, D., Ben-Mariem, S. Garriga, M., & Aranjuelo, I. (2020). Photosynthetic

- metabolism under stressful growth conditions as a bases for crop breeding and yield improvement. *Plants*, *9*, 88.
- Ocampo-López, O. L., Castañeda-Peláez, K., & Vélez-Upegui, J. J. (2017). Caracterización de los ecotopos cafeteros colombianos en el Triángulo del Café. *Perspectiva Geográfica*, *22*, 89-108.
- Olmo, M., Alburquerque, J. A., Barrón, B., Del Campillo, M. C., Gallardo, A., Fuentes, M., & Villar, R. (2014). Wheat growth and yield responses to biochar addition under Mediterranean climate conditions. *Biol Fert Soils*, *50*, 1177-1187. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-014-0959-y>
- Poltronieri, P., & Rossi, F. (2016). Challenges in specialty coffee processing and quality assurance. *Challenges* *7*, 19.
- Pranata-Erdiansyah, N. P., Wachjar, A., Sulistyono, E., & Supijatno, S. (2019). Growth response of seedlings of four Robusta coffee (*Coffea canephora* Pierre. Ex. A. Froehner) clones to drought stress. *Pelita Perkebunan*, *35*, 1-11.
- Rajapaksha, A. U., Chen, S. S., Tsang, D. C., Zhang, M., Vithanage, M., Mandal, S., Gao, B., Bolan, N. S., & Ok, Y. S. (2016). Engineered/designer biochar for contaminant removal/immobilization from soil and water: potential and implication of biochar modification. *Chemosphere*, *148*, 6e291.
- Raviv, M., & Blom, T. J. (2001). The effect of water availability and quality on photosynthesis and productivity of soilless-grown cut roses. *Scientia Horticulturae*, *88*, 257-276.
- Riaz, M., Arif, M. S., Hussain, Q., Khan, S. A., Tauqeer, H. M., Yasmeen, T., Ashraf, M. A., Ali, M. A., Iqbal, M., Shehzad, S. M., Fatima, S., Zia, A., Abbas, N., Siddique, M., Haider, M. S. (2019). 18 Application of biochar for the mitigation of abiotic stress-induced damages in plants. *Plant Tolerance to Environmental Stress: Role of Phytoprotectants*.
- Rodríguez-Frómata, R. A., Sánchez, J. L., & García, J. M. R. (2020). Evaluation of coffee pulp as substrate for polygalacturonase production in solid state fermentation. *Emir J Food Agric*, *32*, 117-124.
- Rodrigues, W. P., Silva, J. R., Ferreira, L. S., Machado Filho, J. A., Figueiredo, F. A., Ferraz, T. M., & Ramalho, J. C. (2018). Stomatal and photochemical limitations of photosynthesis in coffee (*Coffea* spp.) plants subjected to elevated temperatures. *Crop Pasture Sci*, *69*, 317-325.
- Rodríguez, N., & Zambrano, D. (2010). Los subproductos del café: Fuente de energía renovable. *Avances tecnicos Cenicafe*, *393*, 1-8.

- 
- Romdhane, L., Awad, Y. M., Radhouane, L., Dal Cortivo, C., Barion, G., Panozzo, A., & Vamerali, T. (2019). Wood biochar produces different rates of root growth and transpiration in two maize hybrids (*Zea mays* L.) under drought stress. *Arch Agron Soil Sci*, 65, 846-866.
- Ruiz, A. D. C., & Pabón, J. D. (2013). Efecto de los fenómenos de El Niño y La Niña en la precipitación y su impacto en la producción agrícola del departamento del Atlántico (Colombia). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 22, 35-54.
- Sadeghian, S. (2008). Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica. *Boletín técnico No 32*, 44 pp
- Sadeghian S., & Jaramillo A. (2016), Nutrición de los cafetales en Colombia, en escenarios de la niña. Chinchiná, Colombia. *Cenicafé*. 12 p.
- Salamanca-Jimenez, A. (2017). Coffee crop fertilization in Colombia: A mini-review. *International Potash Institute*, 50, 22–30.
- Saleem-Akhtar, S., Li, G., Andersen, M. N., & Liu, F. (2014). Biochar enhances yield and quality of tomato under reduced irrigation. *Agricultural Water Management*, 138, 37-44.
- Sánchez-Reinoso, A. D., Ávila-Pedraza, E. A., & Restrepo-Díaz, H. (2020). Use of biochar in agricultura. *Acta Biológica Colombiana*, 25, 327-338.
- Sharma, D. K., Andersen, S. B., Ottosen, C. O., & Rosenqvist, E. (2015). Wheat cultivars selected for high Fv/Fm under heat stress maintain high photosynthesis, total chlorophyll, stomatal conductance, transpiration and dry matter. *Physiol Plant*, 153, 284–298
- Shashidhar, H. E., Gowda, H. V., Raveendra, G. M., Kundur, P. J., Kumar, G. N., Suprabha, N., Upadhy P., & Sonam, R. (2012). PVC tubes to characterize roots and shoots to complement field plant productivity studies. *Methodologies for root drought studies in rice*, 15.
- Silva, B. M., de Oliveira, G. C., Serafim, M. E., Carducci, C. E., da Silva, É. A., Barbosa, S. M., Batista de Melo, L. B., dos Santos, W. J. R., de Oliveira C. H. C., & Guimarães, P. T. G. (2019). Soil management and water-use efficiency in Brazilian coffee crops. In: *Coffee – Production and Research. IntechOpen*. 1-17
- Steiner, C., Teixeira, G., Lehmann, J., Nehls, T., de Macedo, J., & Blum, W. (2007). Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and

- fertility on a highly weathered Central Amazonian soil. *Plant Soil*, 291, 275–290. doi:10.1007/s11104-007-9193-9
- Sohi, S. (2012). Carbon storage with benefits. *Science*, 338, 1034–1035.
- Sorrenti, G., Masiello, C. A., & Toselli, M. (2016). Biochar interferes with kiwifruit Fe-nutrition in calcareous soil. *Geoderma*, 272, 10-19.
- Sun, J., Drosos, M., Mazzei, P., Savy, D., Todisco, D., Vinci, G., Pan, G., & Piccolo, A. (2017). The molecular properties of biochar carbon released in dilute acidic solution and its effects on maize seed germination. *Sci Total Environ*, 576, 858-867.
- Tayyab, M., Islam, W., Khalil, F., Ziqin, P., Caifang, Z., Arafat, Y., Hui, L., Rizwan, M., Ahmad, K., Waheed, S., Tarin, M. W. K., & Hua, Z. (2018). Biochar: An efficient way to manage low water availability in plants. *Appl Ecol Environ Res*, 16, 2565-2583.
- Tounekti, T., Mahdhi, M., Al-Turki, T. A., & Khemira, H. (2018). Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. *S Afr J Bot*, 117, 17-25.
- Tyree, M. T., Patino, S., Bennink, J., & Alexander, J. (1995). Dynamic measurements of roots hydraulic conductance using a high-pressure flowmeter in the laboratory and field. *J Expt Bot*, 46, 83–94.
- Uzoma, K. C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., & Nishihara, E. (2011). Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use Manag*, 27, 205–212.
- Van Zwieten, L., Kimber, S., Morris, S., Chan, K. Y., Downie, A., Rust, J., Joseph, S., & Cowie, A. (2010). Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, 327, 235-246.
- Yin, J., Bassuk, N. L., Olberg, M. W., & Bauerle, T. L. (2014). Fine root hydraulic conductance is related to post-transplant recovery of two *Quercus* tree species. *J Am Soc Hortic Sci*, 139, 649-656.
- Zandalinas, S. I., Mittler, R., Balfagón, D., Arbona, V., & Gómez-Cadenas, A. (2018). Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. *Physiologia plantarum*, 162, 2-12.
- Zoghi, Z., Hosseini, S. M., Kouchaksaraei, M. T., Kooch, Y., & Guidi, L. (2019). The effect of biochar amendment on the growth, morphology and physiology of *Quercus castaneifolia* seedlings under water-deficit stress. *Eur J For Res*, 138, 967-979.



# Capítulo 3 Respuesta fisiológica de plántulas de café (*Coffea arabica* L. var. Castillo) a diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización.

## Resumen.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de cuatro diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) obtenido de la pulpa de café y cuatro niveles de fertilización (0, 33, 66 y 100 % requerimientos nutricionales) sobre la conductancia estomática ( $g_s$ ), uso eficiente del agua (UEA), conductividad hidráulica de la raíz ( $K$ ), pigmentos fotosintéticos de las hojas (Chl) peso seco total (TDM) en plantas de café (*Coffea arabica* L. var. Castillo el Tambo) bajo condiciones de invernadero. Los resultados muestran que plantas con 0 t ha<sup>-1</sup> y 0% NF registraron valores bajos en los parámetros fisiológicos evaluados ( $g_s = 60,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; UEA = 3,03 g materia seca L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O; Chl = 59,4 At-leaf;  $K = 9,7 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ ; TDM = 9,7 g). Un efecto positivo se encontró cuando las plantas recibieron a 8 t ha<sup>-1</sup> BC en plantas de café Castillo el Tambo ( $K = 11,8 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ ), especialmente en los niveles de fertilización del 66 y 100% ( $g_s = 146,7$  y 167,5 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>; Chl = 72,8 y 66,6 At-leaf; UEA = 4,3 y 5,0 g materia seca L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O; TDM = 13,6 y 16,0 g, respectivamente). En conclusión, el uso de BC fabricado con pulpa de café principalmente a una dosis de 8 t ha<sup>-1</sup> puede ser una alternativa para complementar la nutrición química de las plantas de café.

**Palabras clave:** Conductividad hidráulica de la raíz, nutrición mineral, partición de asimilados.

## Abstract

The objective of this research was to evaluate the effect of the application of four different doses of biochar (BC) (0, 4, 8, and 16 t ha<sup>-1</sup>) obtained from coffee pulp and four fertilization levels (FL) (0, 33, 66 and 100% of the nutritional requirements) on stomatal conductance ( $g_s$ ), water use efficiency (WUE), root hydraulic conductivity ( $K_r$ ), leaf photosynthetic pigments (Chl), and total dry weight (TDW) of coffee (*Coffea arabica* L. var. Castillo el Tambo) plants under greenhouse conditions. The results showed that plants with 0 t ha<sup>-1</sup> and 0% FL registered low values in the physiological parameters evaluated ( $g_s = 60.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; WUE = 3.03 g dry matter L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O; Chl = 59.4 At-leaf readings;  $K_r = 9.7 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ ; TDW = 9.7 g). A positive effect was found when Castillo el Tambo coffee plants received 8 t ha<sup>-1</sup> BC ( $K_r = 11.8 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ ), especially at fertilization levels of 66 and 100% ( $g_s = 146.7$  and  $167.5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ; Chl = 72.8 and 66.6 Chl content; WUE = 4.3 and 5.0 g dry matter L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O; TDW = 13.6 and 16.0 g, respectively). In conclusion, the use of BC manufactured with coffee pulp, mainly at a dose of 8 t ha<sup>-1</sup>, can be an alternative to complement the chemical nutrition of coffee plants.

**Keywords:** Root hydraulic conductivity, mineral nutrition, assimilate partitioning.

## 3.1 Introducción

El café es uno de los cultivos de importancia en el mundo, debido a su popularidad y accesibilidad como bebida para cualquier tipo de población socioeconómica (Vegro y Almeida, 2020). También, es el segundo producto más comercializado a nivel mundial después del petróleo (Bongase, 2017). El café es una de los principales cultivos en Colombia, obteniéndose cerca de 13.890.000 sacos de 60 kg de café verde en 853.700 ha, donde se exportaron de 11.218.000 sacos en 2020 (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2021).

El cultivo de café es responsable de la producción de una gran cantidad de diferentes residuos como la pulpa fresca, ya que 500 kg de pulpa pueden ser obtenidos a partir de una tonelada de café cereza procesada (Reichembach y de Oliveira-Petkowicz, 2020). Estos desechos poseen un alto potencial de contaminación al ambiente como ríos debido a que los residuos líquidos contienen sustancias tóxicas como alcaloides, taninos y polifenoles cuyo proceso de degradación biológico es más difícil, especialmente, al no

realizarse prácticas eficientes y seguras de manejo (Kufa *et al.*, 2008). En adición, la utilización de desechos del cultivo de café para la fabricación de productos de valor agregado puede impulsar el crecimiento económico generando beneficios sociales y apoyando los objetivos ambientales (Duarte *et al.*, 2020). En este sentido, la transformación de residuos agrícolas (el caso de la pulpa de café) mediante el proceso de pirólisis podría ser un enfoque apropiado para su manejo y una alternativa de gran interés como enmienda del suelo, trayendo numerosos beneficios para la agricultura como un complemento en la elaboración sustratos comúnmente utilizados en la etapa de vivero del cultivo de café o disminuir el uso de fertilizantes de síntesis química en el sistema productivo.

La Iniciativa Internacional de Biocarbón (IBI siglas en inglés) define al biocarbón (BC) como un material sólido obtenido de la conversión termoquímica de biomasa en un entorno limitado en oxígeno (Yazhini *et al.*, 2020). El BC es una sustancia heterogénea, cuyas características más importantes son su contenido de carbono en estructuras estables (aromáticos condensados), sustancias lábiles como los compuestos volátiles (alquitranes, entre otros), cenizas (el contenido mineral) y su humedad (Das *et al.*, 2020; Tomczyk *et al.*, 2020). La utilización de biomasa para la obtención de BC ha sido un tema muy estudiado, ya que parece ser una alternativa muy prometedora para el manejo de residuos de manera respetuosa y eficiente, que permite el retorno de los nutrientes que contiene al suelo (Kwoczynski y Čmelík, 2020). Numerosos beneficios de la aplicación de BC al suelo han sido reportados, tales como: i) incremento del pH, Capacidad de Intercambio Catiónico, mayor disponibilidad de nutrientes, reducción de la acidez intercambiable, biorremediación de metales pesados e hidrocarburos en variables químicas (Singh *et al.*, 2019); ii) en características físicas de suelo, mejora la resistencia a la penetración de las raíces, reduce la densidad aparente y aumenta el agua disponible para las plantas (Obia *et al.*, 2017; Razzaghi *et al.*, 2020) y iii) favorece la actividad enzimática de microorganismos, la nodulación de raíces, biomasa y población microbiana en propiedades biológicas del suelo (Singh *et al.*, 2019).

La aplicación de BC puede convertirse en una solución asequible para los agricultores para enmendar la acidez, la sodicidad, salinidad y mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Yazhini *et al.*, 2020). También, se ha encontrado que se puede utilizar como sustrato debido a las características fisicoquímicas de BC son similares otros materiales como la

fibra de coco (Awad *et al.*, 2017). Por otro lado, Asai *et al.*, 2009 han reportado que aplicaciones de 16 t ha<sup>-1</sup> de BC fabricado a partir de residuos de madera de teca (*Tectona grandis* L.) y podas de rosa (*Pterocarpus macrocarpus* Kurz) aumentó la conductividad hidráulica del suelo y el rendimiento en plantas de arroz en condiciones de deficiencia de fósforo. También, ellos observaron que la combinación de BC (entre 4 y 8 t ha<sup>-1</sup>) con fuentes de N favoreció el rendimiento del arroz. Sorrenti *et al.* (2019) obtuvieron similares observaciones donde la aplicación de BC (fabricado con madera de podas de melocotón y vid) mejoró el estado nutricional de los árboles de nectarina, concluyendo que los efectos benéficos del biocarbón son evidenciados a medida que transcurre el tiempo especialmente en condiciones limitantes del suelo como la baja disponibilidad de nutrientes.

La pérdida de tierras fértiles es una amenaza al suministro mundial de alimentos, especialmente; en los centros urbanos (Song *et al.*, 2020). Los agricultores utilizan fertilizantes sintéticos para mejorar la productividad de los cultivos eventualmente en dosis más altas de lo recomendado (Deshmukh y Badgujar, 2017); sin embargo, esto podría contribuir a la contaminación de aguas subterráneas y problemas de salud humana como, por ejemplo, la metahemoglobinemia debido los altos contenidos de nitrógeno (Chen *et al.*, 2017). No obstante, varios componentes orgánicos han sido desarrollados para reducir el uso excesivo de fertilizantes químicos, siendo el biocarbón una alternativa potencial que mejora los parámetros de calidad del suelo y al mismo tiempo la productividad del cultivo (Alam *et al.*, 2020). Sin embargo, el efecto positivo del uso de BC sobre la fisiología de las plantas sigue siendo limitado, especialmente, en cultivos tropicales o subtropicales como el café (Bommaraju, 2016).

La aplicación de biocarbón mejora la capacidad de retención de agua del suelo, la disponibilidad y retención de nitrógeno (N) y estimula el crecimiento de microorganismos benéficos en el suelo donde estos factores pueden estar asociados con una mejor fotosíntesis de plantas (He *et al.*, 2020). En este sentido, Qian *et al.* (2019) concluyeron que la aplicación de biocarbón producido con cascarilla de arroz (1, 5 y 10% p/p) favoreció la tasa de fotosíntesis neta de la hoja, el índice de clorofilas y crecimiento en plantas de soya, ya que incrementó la absorción de nutrientes como el fósforo después de la aplicación del BC, especialmente a una dosis alta (10% p/p). En adición, Zhang *et al.*

(2020a) indicaron que la aplicación de una mezcla de biocarbón de tallos de maíz y estiércol animal mejoró la apertura estomática, la fotosíntesis, síntesis de pigmentos fotosintéticos y actividad del PSII (Fotosistema II) de remolacha azucarera en suelos con condiciones salino-alcálinas. Finalmente, Faloye *et al.* (2019) demostraron que adiciones combinadas de 20 t ha<sup>-1</sup> biocarbón de residuos de mazorcas y 300 kg ha<sup>-1</sup> de fertilizante inorgánico (NPK 15:15:15) mejoró el rendimiento y uso eficiente el agua en el cultivo de maíz bajo condiciones de déficit hídrico, minimizando los efectos negativos de la escasez de agua.

La protección y el manejo sostenible del suelo y los recursos terrestres son de suma importancia dentro del contexto del cambio climático, seguridad alimentaria y pobreza rural (Bado y Bationo, 2018). La agricultura actual necesita manejo integrados en la nutrición mineral de plantas donde el aprovechamiento de los residuos de los sistemas productivos se ha convertido en una alternativa para ayudar la producción del cultivo. La utilización de un subproducto como la pulpa de café como BC puede ser una estrategia agronómica interesante para mejorar la sostenibilidad de este cultivo. Asimismo, el efecto del uso del BC en la fisiología de las plantas ha adquirido importancia en los últimos años (Vijayaraghavan, 2021). Sin embargo, el conocimiento de este tipo de enmiendas sobre la fisiología del café sigue siendo aún muy limitado. En este sentido, el presente estudio buscaba estudiar el potencial de una alternativa de aprovechamiento de residuos del café (pulpa) como fuente para la fabricación de biocarbón y posterior análisis de la incorporación de este BC en el suelo sobre el comportamiento fisiológico de plántulas de café con diferentes dosis de fertilizantes. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de cuatro diferentes dosis de biocarbón obtenido de la pulpa de café y cuatro niveles de fertilización sobre las respuestas fisiológicas de plántulas de café (*Coffea arabica* L. var. Castillo) en variables de intercambio gaseoso, pigmentos fotosintéticos, acumulación y distribución de asimilados.

## 3.2 Materiales y métodos

### 3.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento

El experimento se realizó entre septiembre de 2018 a enero de 2019 en un invernadero de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia, Campus de Bogotá a una altura de 2.556 msnm (4°35'56"N y 74°04'51"O). Las condiciones de crecimiento del invernadero durante la evaluación fueron: humedad relativa de 60 a 80%, temperatura de 25/20 °C día/noche, y un fotoperiodo natural de 12 h y radiación fotosintéticamente activa (PAR) de 800-1000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  al medio día, dependiendo de las condiciones climáticas. Plántulas de café de tres meses de edad (estado 14 acorde a la escala de Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical Industry – BBCH (Arcila-Pulgarín *et al.*, 2002)) del cultivar Castillo fueron trasplantadas a macetas de 2 L de capacidad con un suelo proveniente de un cultivo de café del municipio de Chaparral Tolima, finca Luxemburgo (3°49'39,2" N 75°34'07,1" O). Las características químicas y físicas del suelo fueron las siguientes: i) pH de 5.56; ii) Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) 13,1 meq/100g; iii) Conductividad Eléctrica 0,16 dS/m; iv) Características químicas: Nitrógeno total: 0,49%, Ca: 9,95, K: 0,48, Mg: 2,56, Na: 0,14 meq 100 g<sup>-1</sup>, Cu: 0,81, Fe: 20, Mn: 46, Zn: 4,10, B: 0,07 y P: 8,70 mg kg<sup>-1</sup> y v) textura Franco Limoso (26% de Arcilla, 54% de limo y 20% arena).

### 3.2.2 Tratamientos de biocarbón y niveles de fertilización

Los tratamientos de BC se establecieron en el momento del trasplante de las plántulas de café mediante una mezcla del suelo usado con cuatro diferentes dosis de BC. Las dosis de biocarbón (BC) utilizadas fueron 0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> (BC0 = 0 g/planta; BC4 = 3 g/planta; BC8 = 6 g/planta y BC16 = 12 g/planta). Las dosis anteriores se seleccionaron con base a las respuestas agronómica que se han observado en otras especies cultivadas (Sánchez-Reinoso *et al.*, 2020). El biocarbón utilizado se obtuvo de pulpa de café, la cual tuvo una pirolización media a 500 °C. Finalmente, el BC mostraba las siguientes características: pH: 9,42; conductividad eléctrica 19,4: dS / m; carbono orgánico (OC): 46,4%; polvo 20,8%; N:

2,81%; P: 1,11%; Ca: 0,97%; K: 4,37%; Mg: 0,43%; Cu: 53,5 mg kg<sup>-1</sup>; Fe: 2.795 mg kg<sup>-1</sup>; Zn: 110 mg kg<sup>-1</sup>; B: 99,3 mg kg<sup>-1</sup>; CIC: 103 meq / 100g; CO/N : 16,5.

Los tratamientos de fertilización se desarrollaron a los cinco días después del trasplante (DDT) usando un fertilizante compuesto de grado 18-46-0 (Fosfato Diamónico (DAP), Yara, Colombia) como fuente de nitrógeno y fósforo; y un fertilizante simple como complemento de nitrógeno (UREA®, Yara, Colombia). Los niveles de fertilización empleados fueron 0 (0 kg ha<sup>-1</sup> DAP y 0 kg ha<sup>-1</sup> UREA), 33% (10 kg ha<sup>-1</sup> DAP y 5 kg ha<sup>-1</sup> UREA), 66% (20 kg ha<sup>-1</sup> DAP y 10 kg ha<sup>-1</sup> UREA) y 100% (40 kg ha<sup>-1</sup> DAP y 20 kg ha<sup>-1</sup> UREA) de los requerimientos nutricionales (F0 = 0 g/planta de DAP y 0 g/planta de UREA; F33 = 2 g/planta de DAP y 1 g/planta de UREA; F66 = 4 g/planta de DAP y 2 g/planta de UREA; y F100 = 8 g/planta de DAP y 4 g/planta de UREA). Las dosis anteriores se seleccionaron con base al análisis de físico y químico del suelo y a los requerimientos nutricionales reportados por Salamanca-Jiménez (2017). Asimismo, no se planteó la necesidad de aplicar potasio, ya que los niveles encontrados en el suelo para este elemento fueron valorados como adecuados para el estado de crecimiento en el que se realizó el experimento (Sadeghian, 2008).

El volumen de agua aplicado en cada riego durante el experimento fue el siguiente: i) entre los 0 y 20 DDT se suministró 40 ml/planta; ii) entre los 21 y 50 DDT fueron 50 ml/planta; iii) entre los 51 a los 65 DDT fueron aplicados 60 ml/planta; iv) entre los 66 a los 80 DDT se regó con 75 ml/planta; v) finalmente entre los 81 y 100 DDT se suministró con 100 ml/planta. La aplicación de riego se realizaba cada cinco días. Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño completamente al azar en arreglo factorial, siendo el primer factor las cuatro dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y el segundo factor fueron los cuatro niveles de fertilización (0, 33, 66 y 100% de los requerimientos nutricionales). Cada tratamiento contó con 5 plántulas de café como repeticiones, utilizando un total de 80 plántulas en todo el experimento.

### **3.2.3 Parámetros de intercambio gaseoso de la hoja y conductividad hidráulica de la raíz**

La cuantificación de la conductancia estomática ( $g_s$ ) se estimó en la segunda hoja completamente expandida en la parte superior de plántula usando un porómetro de estado estacionario (SC-1; Decagon Devices Inc., Pullman, WA). Por otro lado, el uso eficiente del agua (UEA) se determinó a través de la metodología descrita por Raviv y Blom (2001), a través de la relación entre el peso seco total de la planta sobre la cantidad total de agua que recibió cada plántula durante el desarrollo del experimento. La  $g_s$  y WUE fueron cuantificadas al final del experimento a los 100 días después del trasplante (DDT).

La cuantificación de la conductividad hidráulica de la raíz ( $K$ ) se determinó entre las 800 a las 1100 h únicamente en las plántulas sin fertilización química (0% requerimientos nutricionales), pero tratadas con todas las dosis de BC. Cada plántula fue cortada a 5 cm por encima de la superficie del suelo; luego se adaptó un aditamento de 5 mm para ajustar la parte superior de las raíces y las lecturas de  $K$  fueron tomadas utilizando un medidor de flujo de alta presión (HCFM Gen 3; Dynamax, Houston, TX) conectado a un tanque de gas de nitrógeno. Se inyectó agua al sistema de radical en la dirección opuesta al flujo normal durante la transpiración. Posteriormente, la conductancia hidráulica ( $\text{kg s}^{-1} \text{kPa}^{-1}$ ) de las raíces se determinó como la pendiente resultante entre el flujo del agua frente a la presión del sistema de raíces de la plántula de café, tomando medidas cada 2 s a  $22,5 \pm 0.5$  °C.

### **3.2.4 Crecimiento de la plántula (altura, tasa relativa de crecimiento, acumulación de materia seca y partición de asimilados**

La altura de la planta en el tiempo 1 se determinó a los 0 DDT; mientras que la altura en el tiempo dos fue hallada a 100 DDT, partiendo de la base del tallo hasta el meristemo apical. En adición, la Tasa Relativa de Crecimiento (TRC) fue estimada según la metodología descrita por Castro-García *et al.* (2017) teniendo en cuenta la ecuación 1:

$$RGR = \frac{[\ln(\text{Altura en tiempo 2}) - \ln(\text{Altura en tiempo1})]}{(\text{Tiempo}_2 - \text{Tiempo}_1)} \quad \text{Ecuación (1)}$$

La materia seca de los órganos y total de la plántula fueron cuantificadas a los 100 DDT. El material vegetal fue secado en una estufa de aire seco comprimido (ThelcoMod 27, Chicago, USA) a 80 °C durante 48 horas con el propósito de obtener el peso seco total de la planta. Finalmente, la eficiencia agronómica (EA) fue calculada como la relación entre la materia seca total del tratamiento sobre la materia seca total de las plantas si fertilización (0 t ha<sup>-1</sup> BC y 0% NF), acorde a la metodología descrita por Xu *et al.* (2014).

### 3.2.5 Clorofilas y eficiencia de la clorofila a

El contenido relativo de clorofila (At-leaf) y la eficiencia fotoquímica máxima de PSII ( $F_v/F_m$ ) fue también medida en la segunda hoja completamente expandida desde la parte superior de la plántula a los 100 DDT. El contenido de At-leaf se determinó con la ayuda de clorofilómetro (At-leaf, FT Green, Wilmington, DE, EE. UU.) La relación  $F_v/F_m$  se evaluó utilizando un fluorómetro de excitación continua (Handy PEA, Hansatech Instruments, Kings Lynn, Reino Unido) utilizando clips de adaptación a la oscuridad durante 30 min. Al finalizar el periodo de adaptación a oscuridad, las variables como la fluorescencia mínima ( $F_0$ ), fluorescencia máxima ( $F_m$ ) y la eficiencia máxima en el quantum del PSII ( $F_v/F_m$ ) fueron determinadas. La  $F_0$  se realizó con luz de baja intensidad modulada (<0.1  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) para no afectar la fluorescencia variable. La  $F_m$  se registró mediante el uso de un pulso de luz saturante (3.000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) durante 0.8 s. La fluorescencia variable ( $F_v$ ) se calculó por la diferencia entre  $F_0$  y  $F_m$ . Finalmente, el rendimiento cuántico máximo potencial de PSII fue hallado mediante la relación entre la  $F_v$  y la  $F_m$ .

### 3.2.6 Diseño experimental y análisis de los datos

Se realizó un diseño en completamente al azar con arreglo factorial donde el primer factor fueron las cuatro dosis de biocarbón utilizada (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y el segundo factor fueron los cuatro niveles de fertilización (0, 33, 66 y 100 % requerimientos nutricionales) para un total de 16 tratamientos con cinco repeticiones. Posteriormente, cuando se presentaron diferencias significativas en el ANAVA, se empleó la prueba comparativa de medias de

Tukey a  $P \leq 0,05$ . Los datos se analizaron usando el programa Statistix v 9,0 (software analítico, Tallahassee, FL, US). Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales utilizando el programa InfoStat 2016 (Di Rienzo *et al.*, 2016).

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Parámetros de intercambio gaseoso de la hoja y estatus hídrico de la planta.

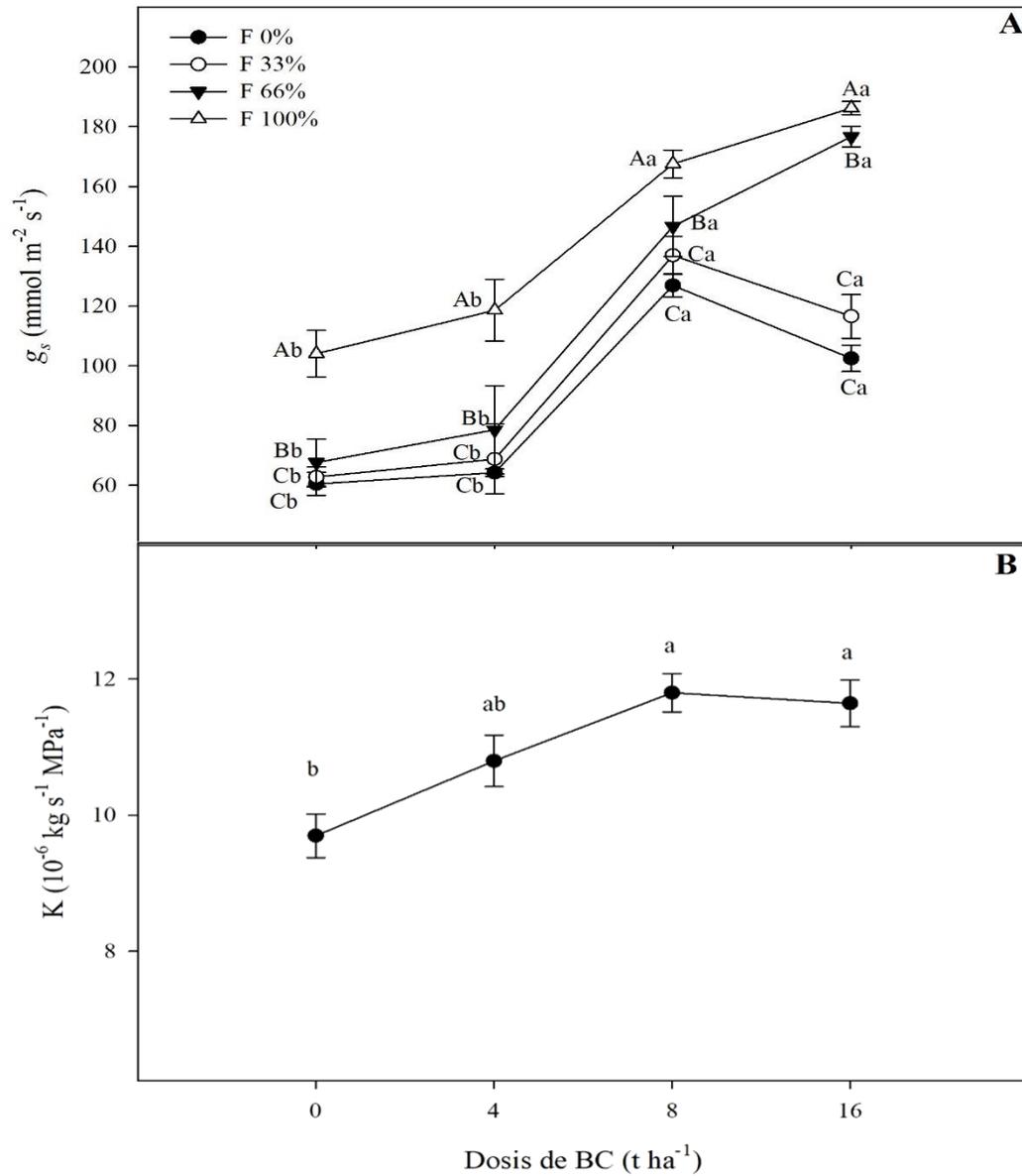
La **Tabla 5** resume los efectos de las dosis de biocarbón (BC) y niveles de fertilización (NF) sobre las diferentes variables a los 100 DDT. La conductancia estomática ( $g_s$ ) presentó diferencias ( $P \leq 0,001$ ) en la interacción BC  $\times$  NF. En general, la  $g_s$  fue mayor en plantas de café tratadas con un 100 % de fertilización química con respecto a plantas sin fertilizantes químicos. La adición creciente de BC favoreció un incremento  $g_s$ , principalmente, en plantas con fertilizantes al 66 y 100% de sus necesidades, alcanzando valores de  $\sim 180$   $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  a una dosis de  $16 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente (**Figura 9A**). Por otro lado, diferencias solamente fueron obtenidas entre el factor dosis de BC sobre la conductividad hidráulica de la raíz ( $K$ ), observándose que un incremento de BC mejoró el movimiento de agua de las raíces hacia la parte aérea ( $9,7 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$  con  $0 \text{ t ha}^{-1}$  vs  $11,6 \times 10^{-6} \text{ kg s}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$  con  $16 \text{ t ha}^{-1}$ ) (**Figura 9B**).

**Tabla 5.** Resumen del análisis de la varianza del efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y  $16 \text{ t ha}^{-1}$ ) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre variables fisiológicas a los 100 días después del trasplante.

Variable	Abreviación	Fuente de variación		
		BC	NF	BC $\times$ NF
Conductancia estomática	$g_s$	***	***	**
Contenido de clorofilas	At-leaf	**	***	*
Eficiencia máxima del PSII	$F_v/F_m$	**	***	**
Peso seco total	TDM	**	NS	**
Altura de la planta		**	NS	**
Partición materia seca hojas	LDMP	***	***	**
Partición materia seca tallos	SDMP	***	***	***
Partición materia seca raíz	RDMP	**	***	***
Tasa relativa de crecimiento	RGR	***	***	**
Uso eficiente del agua	WUE	**	***	***
Eficiencia agronómica	AE	***	***	***

BC: Dosis de biocarbón. NF: Nivel de fertilización.

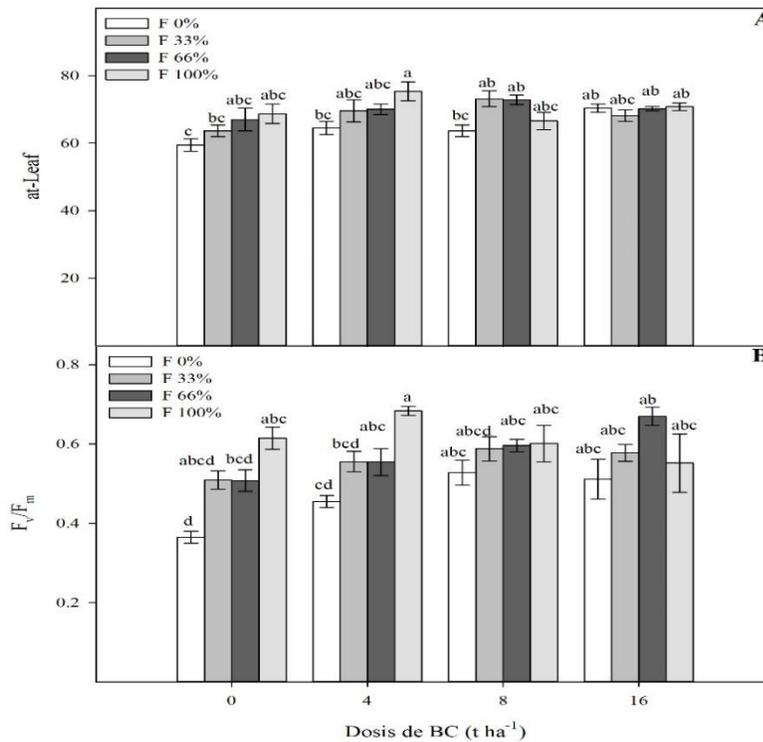
\*, \*\* y \*\*\* son significativamente diferentes en los niveles de probabilidad 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente.



**Figura 9.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16  $t\ ha^{-1}$ ) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre la conductancia estomática ( $g_s$ ) en hojas (A) y conductancia hidráulica de raíz en plántulas de café (B) a los 100 días después de trasplante (DDT). Los puntos representan la media de cinco valores ( $n = 5$ )  $\pm$  error estándar. Letras mayúsculas se refieren a diferencias entre las dosis de biocarbón. Letras minúsculas se refieren a diferencias entre niveles de fertilización. Letras similares indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$ .

### 3.3.2 Contenido relativo de clorofilas y fluorescencia de la clorofila a

Diferencias significativas fueron también encontradas entre los tratamientos de biocarbón y nivel de fertilización sobre el contenido relativo de clorofilas (expresado como unidades At-leaf) y eficiencia máxima del PSII ( $F_v/F_m$ ) (**Tabla 5**). En general, las plantas tratadas con  $0 \text{ t}^{-1} \text{ ha BC} + 0\% \text{ NF}$  registraron los menores valores de At-leaf (59,4) y  $F_v/F_m$  (0,37) con respecto a los demás tratamientos (**Figura 10**). Las anteriores variables también incrementaron gradualmente en relación a mayores dosis de BC y NF, observándose que la relación  $F_v/F_m$  mostró una mayor progresión principalmente en grupo de plantas sin fertilización y diferentes dosis de BC ( $0 \text{ t ha}^{-1} \text{ BC} = 0,37$ ;  $4 \text{ t ha}^{-1} \text{ BC} = 0,46$ ;  $8 \text{ t ha}^{-1} \text{ BC} = 0,53$ ; y  $16 \text{ t ha}^{-1} \text{ BC} = 0,51$ , respectivamente).

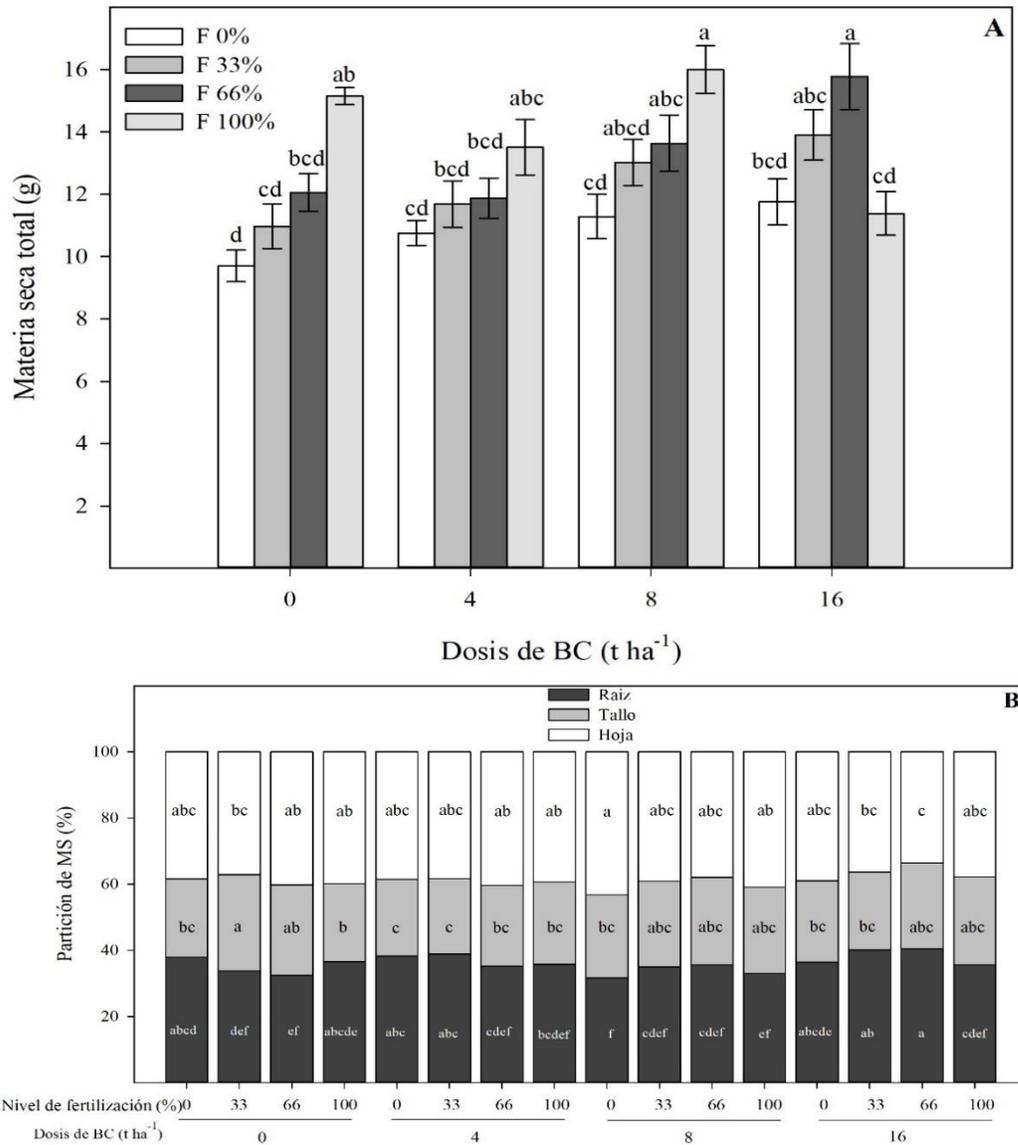


**Figura 10.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre el contenido relativo de clorofila expresado como unidades at-Leaf (A) y la eficiencia máxima del quantum en el PSII (relación  $F_v/F_m$ ) (B) a los 100 DDT. Las barras representan la media de cinco plantas  $\pm$  error estándar. Letras similares indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$ .

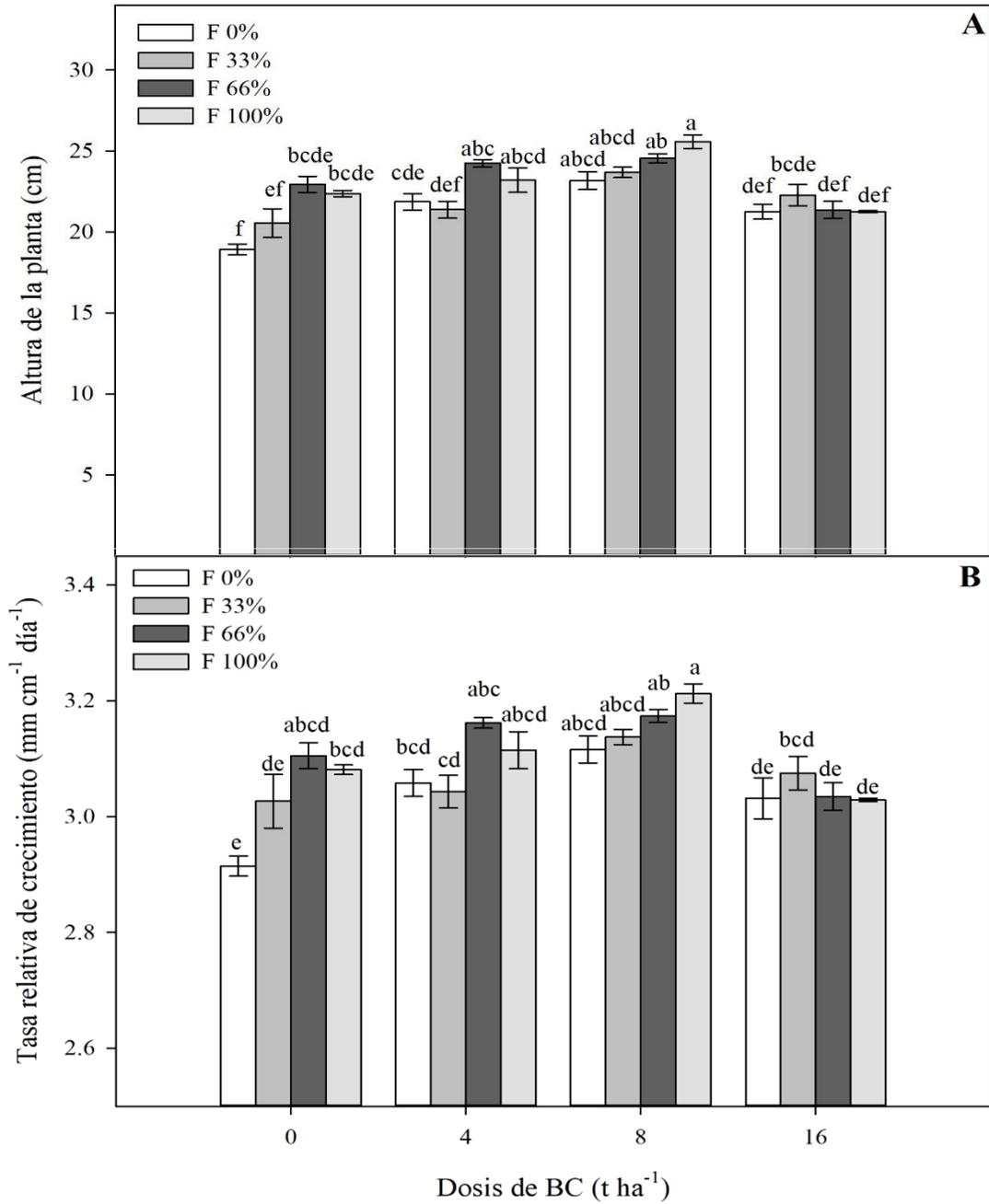
### 3.3.3 Crecimiento: acumulación de materia seca, partición de asimilados y tasa relativa de crecimiento

El análisis de varianza muestra que diferencias también se encontraron entre los factores de nutrición sobre los parámetros de crecimiento de plantas de café (**Tabla 5**). En cuanto al peso seco total, plantas con 0 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% NF también registraron la menor biomasa (9,7 g). En general, se encontró una mayor biomasa cuando se mejoró la nutrición de la planta de café a través de mayores dosis de BC y fertilización, encontrándose que dosis entre 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC causaron un incremento en la acumulación de biomasa (~60% más alto con respecto a plantas con 0 t ha<sup>-1</sup> BC y 0% NF) en los diferentes niveles de fertilización química (**Figura 11A**). Finalmente, la **Figura 11B** muestra que las hojas representaron cerca del 38%, los tallos el 24% y las raíces el 38 % la materia seca total en plantas sin fertilización de BC y química (0 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% NF). No obstante, una redistribución de materia seca hacía las raíces se observó cuando las plantas mejoraron su nutrición con 16 t ha<sup>-1</sup> BC, especialmente, a un suministró del 33 y 66% de la fertilización química. En este sentido, las hojas representaron cerca del 34%, los tallos 24% y las raíces el 40%.

La altura de la planta de café también fue menor en plantas con 0 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% NF (18,9 cm). Niveles crecientes de fertilización química, especialmente, entre 0 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC causaron un mayor incrementó de esta variable. En este rango de dosis de BC, se observó que las plantas tratadas con el 66 o 100% de fertilización química presentaron una altura promedio de 23,8 cm. Sin embargo, el uso de 16 t ha<sup>-1</sup> BC causó una inhibición del crecimiento en todos los niveles de fertilización química, encontrándose valores cercanos a los obtenidos en los tratamientos de NF que contaron con 0 t ha<sup>-1</sup> BC (los cuales oscilaron entre 21,3 hasta los 22,3 cm) (**Figura 12A**). Por otro lado, la **Figura 12B** muestra el análisis de crecimiento de planta expresado como TRC donde se observaron tendencias similares a las obtenidas en altura de la planta. Plantas tratadas con 0 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% NF también evidenciaron una menor TRC (2,91 mm cm<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>). En adición, un efecto positivo se encontró cuando las plantas recibieron niveles crecientes de fertilización, especialmente, a 8 t ha<sup>-1</sup> BC (oscilaron entre 3,12 y 3,21 mm cm<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>). Finalmente, el incremento de los niveles de fertilización en plantas que contaron con 16 t ha<sup>-1</sup> BC no representaron un cambio significativo en TCR, cuyos valores fueron en promedio de 3,04 mm cm<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>.



**Figura 11.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre la materia seca total (A) y partición de asimilados (B) a los 100 DDT. Las barras representan la media de cinco plantas  $\pm$  error estándar. (A) Letras similares indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0.05$ . (B) Letras similares entre barras de color blanco indican que las medias de la partición de asimilados en hojas no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0.05$ ; letras similares entre barras de color gris indican que las medias de la partición de asimilados en tallos no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0.05$ ; letras similares entre barras de color negro indican que las medias de la partición de asimilados en raíces no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0.05$ .



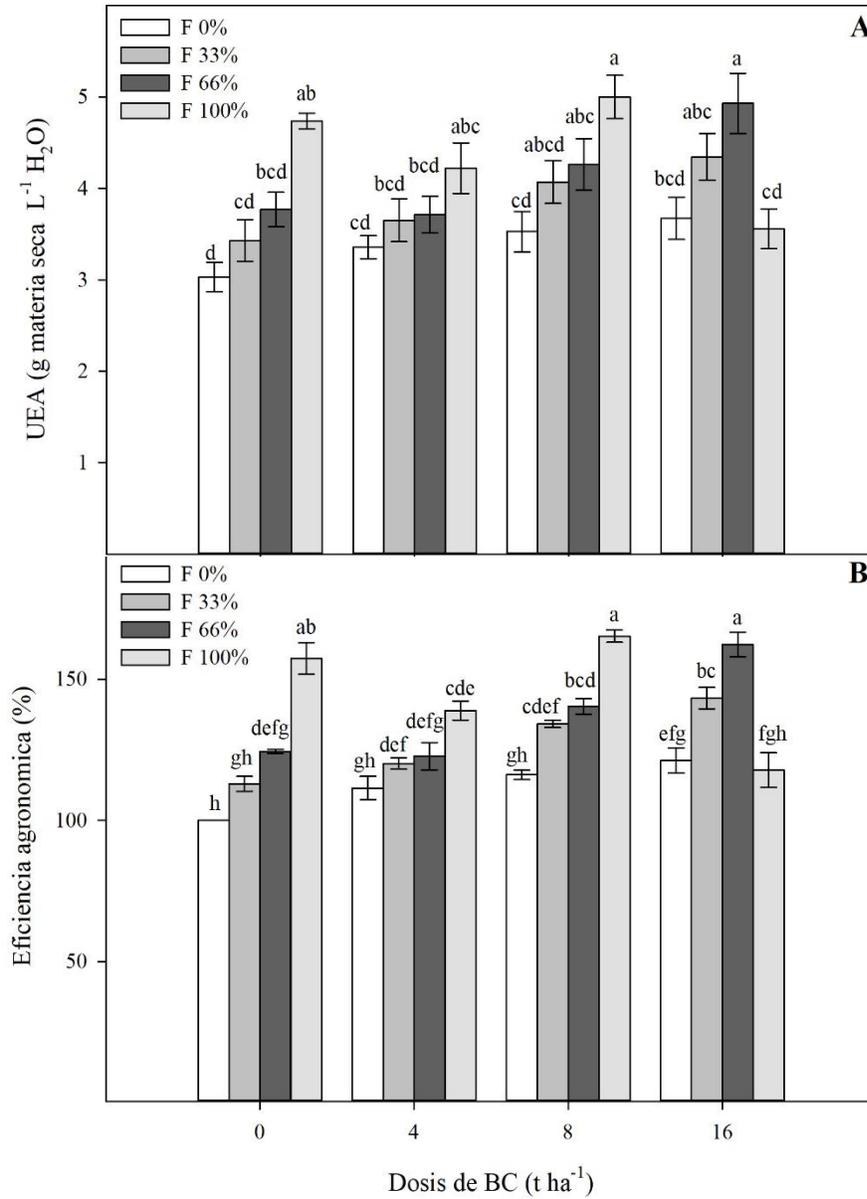
**Figura 12.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre la altura de la planta (A) y la Tasa Relativa de Crecimiento (B) a los 100 DDT. Las barras representan la media de cinco plantas ± error estándar. Letras similares indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$ .

### 3.3.4 Uso eficiente del agua y eficiencia agronómica

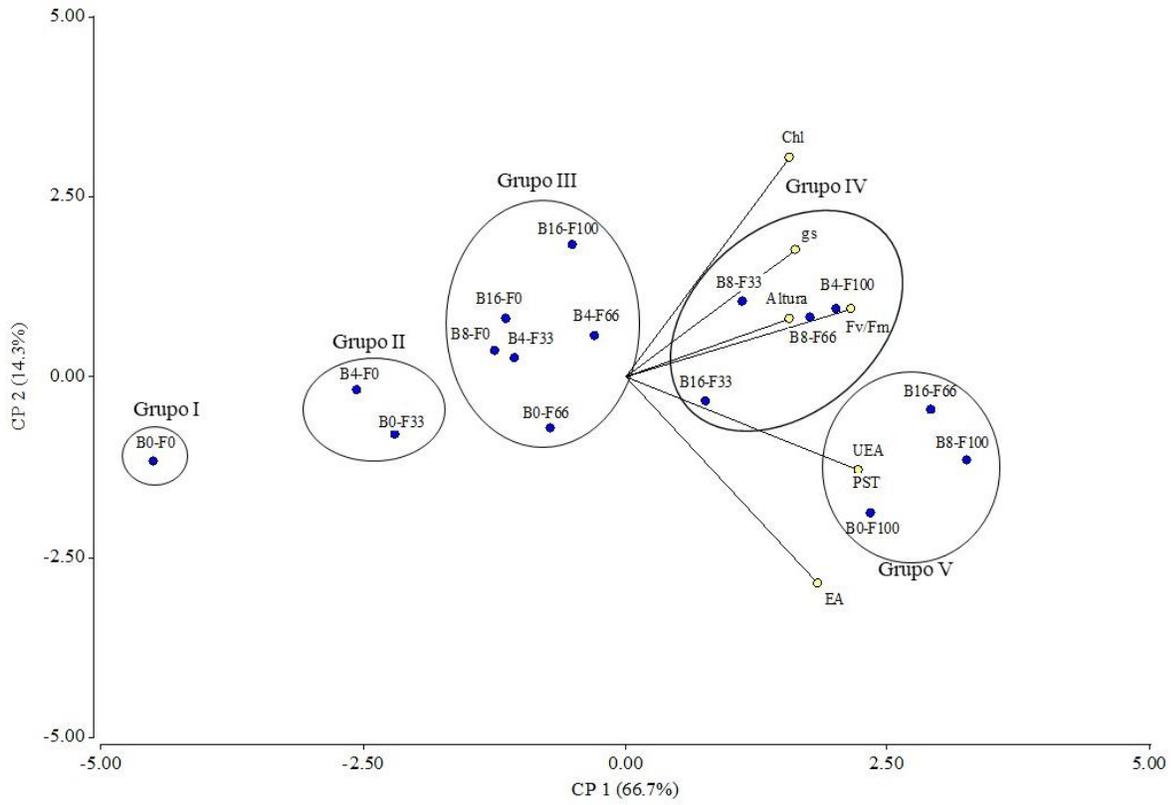
Se evidenció generalmente un incremento progresivo del WUE a medida que el nivel de fertilización química fue mayor, independientemente de la dosis de biocarbón aplicada (**Figura 13A**). Plantas sin fertilización química (0 % NF) registraron los menores valores de WUE en las 4 dosis de biocarbón aplicadas (el WUE varió entre 3,03 hasta 3,67 g materia seca L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O). En adición, el WUE fue favorecido a una mayor dosis de NF (4,22 y 5,00 g materia seca L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O en plantas con 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC y 100% NF) a excepción en el grupo de plantas con 16 t ha<sup>-1</sup> BC (~3,56 g materia seca L<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>O con 100% NF). Una tendencia similar fue también encontrada sobre EA donde se observó que la eficiencia incrementó un 65 % en plantas con 100% NF en casi todas las enmiendas con BC con respecto a plantas sin BC y NF (**Figura 13B**).

### 3.3.5 Análisis de componentes principales biplot (ACP)

El ACP muestra que las variables fueron señaladas por vectores, mientras que los tratamientos son señalados por puntos (**Figura 14**). En términos generales, se encontró que el PCA1 y PCA2 representaron el 66,7 y 14,3 % de la variación de los diferentes atributos analizados, respectivamente. En este sentido, los vectores de WUE, TDW, F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>, Height y G<sub>s</sub> tienen ángulos cercanos al origen, mostrando una alta correlación entre las variables mencionadas con respecto al comportamiento fisiológico de las plantas de café. Se identificó que las plantas con 0 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC en 100% NF y las que contaron con 16 t ha<sup>-1</sup> BC en 66% NF se agruparon en el sector extremo derecho del análisis biplot (grupo V). Por lo contrario, la aplicación de 0 t ha<sup>-1</sup> BC y 0% NF (grupo I), se ubicaron en el sector opuesto al grupo V, indicando un efecto negativo de las dosis de biocarbón y niveles de fertilización sobre las variables evaluadas. En adición, tres efectos diferenciales fueron observados en las dosis BC y NF en las plantas de café: i) 0 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% NF y 4 t ha<sup>-1</sup> BC + % NF (grupo II) se comportaron con la misma tendencia al grupo I; ii) 0 t ha<sup>-1</sup> BC + 66% NF; 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% NF; 4 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% NF; 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 100 % NF (grupo III) tuvo un menor negativo sobre las variables fisiológicas evaluadas. Por último, iii) plantas con 4 t ha<sup>-1</sup> BC + 100% NF; 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% NF y 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 66% NF (grupo IV) registraron la mejor respuesta fisiológica mostrando una tendencia similar al grupo V.



**Figura 13.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre el Uso Eficiente del Agua (A) y Eficiencia Agronómica (B) a los 100 DDT. Las barras representan la media de cinco plantas ± error estándar. Letras similares indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$ .



**Figura 14.** Análisis de Componente Principal (PCA) de diferentes variables fisiológicas en plántulas de café (*Coffea arabica* L.) bajo diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización química. Chl: Contenido de clorofilas at-Leaf; Gs: Conductancia estomática de la hoja; Altura: altura de la planta; Fv/Fm: eficiencia máxima en el quantum del PSII; UJE: Uso Eficiente del Agua; TDW: peso seco total; AE: Eficiencia Agronómica. B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>. F0: 0% de los requerimientos nutricionales; F33: 33% de los requerimientos nutricionales; F66: 66% de los requerimientos nutricionales; F100: 100% de los requerimientos nutricionales.

### 3.4 Discusión

El uso de biocarbón (BC) ha sido reportado como una alternativa para conservar los nutrientes en el suelo y mejorar las condiciones de crecimiento de los cultivos (Domingues *et al.*, 2017; Czekala *et al.*, 2019; Sanchez-Hernandez *et al.*, 2019). No obstante, el conocimiento sobre las respuestas fisiológicas en plantas de café a la aplicación de BC con diferentes niveles de fertilización es aún poco estudiado (Bommaraju, 2016). En el presente estudio, se encontró que plantas de café con aplicaciones de BC principalmente a una dosis de 8 t ha<sup>-1</sup> favoreció parámetros fisiológicos tales como: conductancia

estomática, uso eficiente del agua, contenido de pigmentos fotosintéticos, acumulación de materia seca y eficiencia agronómica, especialmente, con niveles de fertilización química entre el 66 y 100% de los requerimientos nutricionales. En este sentido, estudios recientes han reportado que el rendimiento y desempeño agronómico de los cultivos puede ser mejorado con la aplicación de BC, especialmente, cuando la fertilización química es acompañada con fertilizantes de tipo orgánico o inorgánico (Arif *et al.*, 2017; Ye *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020b). Resultados positivos del uso BC combinado con otras fuentes también han sido encontrados en maíz (*Zea mays* L.) (Tanure *et al.*, 2019; Feng *et al.*, 2021), tomate (*Solanum lycopersicum*) (Prasad *et al.* 2018) y cítricos (*Citrus x sinensis*) (Zhang *et al.*, 2021) donde estos estudios reportaron que el BC aplicado (con dosis que variaron entre 2 al 50% p:v o 10 a 50 t ha<sup>-1</sup>), en general, mejoró el crecimiento, estado nutricional y rendimiento de la planta.

Deficiencias de nutrientes pueden generar limitaciones estomáticas de la fotosíntesis (Morales *et al.*, 2018). Los resultados obtenidos corroboraron que las plantas de café sin un adecuado aporte de nutrientes (0 t ha<sup>-1</sup> y 0% NF) registraron un mayor cierre de estomas (**Figura 9A**). Sin embargo, plantas de café tratadas con 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC registraron una mayor apertura cuando el nivel fertilización química fue también mayor. Tendencias similares fueron reportadas por Tanure *et al.* (2019), quienes observaron que adiciones de BC (entre 20 y 60 g kg<sup>-1</sup> de suelo) fabricado con residuos de eucalipto causaron valores altos de  $g_s$ , fotosíntesis y un mayor contenido relativo de agua (CRA) en plantas de maíz. Estos autores indican que el BC aplicado al suelo puede mejorar la superficie específica y una alta porosidad, favoreciendo la retención y disponibilidad de agua en el suelo. En este sentido, Liu *et al.* (2016) también sugirieron que la mezcla de suelos arenosos con biocarbón reduce la tasa de infiltración, conservando el agua cerca de la superficie por más tiempo.

Los resultados obtenidos también mostraron que valores altos de  $g_s$  están relacionados con un incremento en la conductividad hidráulica de la raíz ( $K$ ), especialmente, cuando las plantas contaron con 8 t ha<sup>-1</sup> BC (**Figura 9B**), indicando un mayor flujo de agua en las plantas de café. En este sentido, Sashi *et al.* (2018) también reportan efectos positivos de aplicaciones entre 5 y 20 t ha<sup>-1</sup> de biocarbón fabricado con cascarilla de arroz sobre las relaciones hídricas en plantas de maíz, observando un incremento progresivo en el contenido relativo de agua (CRA) con la adición de BC. Finalmente, Tanure *et al.* (2019)

concluyen que plantas crecidas con aplicaciones de biocarbón obtuvieron una alta producción de biomasa, generando una mayor apertura de estomas y un mejor uso eficiente del agua (UEA).

El contenido relativo de clorofila (lecturas At-leaf) y relación  $F_v/F_m$  fueron considerablemente menores en plantas de café con un nivel de fertilización del 0% y sin aplicación de biocarbón. No obstante, aumentos sobre el contenido de pigmentos fotosintéticos y relación  $F_v/F_m$  fueron registrados con el incremento de las dosis de BC y del nivel de fertilización; especialmente, en plantas que contaron con 8 t ha<sup>-1</sup> (**Figura 10**). Farhangi-Abriz *et al.* (2017) encontraron que aplicaciones de BC fabricado con residuos de arce (*Acer pseudoplatanus* L.) entre 50 y 100 g kg<sup>-1</sup> de suelo favorecieron la síntesis de clorofila a, b, total y la relación  $F_v/F_m$  en plantas de soya. Estos autores indican que las aplicaciones de BC mejoraron el metabolismo del nitrógeno de las plantas de soya debido a factores como aporte de nutrientes en las cenizas del biocarbón (ayuda a mejorar la forma y la disponibilidad de nitrógeno) y biota del suelo. En adición, se han observado que mayores contenidos de pigmentos fotosintéticos en las plantas tratadas con biocarbón está relacionado con una mayor concentración de N foliar con respecto a plantas sin aplicación de BC (Naeem *et al.*, 2018; Gavili *et al.*, 2019).

El incremento de la materia seca en plantas con aplicación de BC ha sido registrado en diferentes especies de plantas cultivadas (Deng *et al.*, 2019; Gavili *et al.* 2019). Lo anterior también fue observado en el presente estudio donde las plantas con una aplicación de 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC y 100% NF evidenciaron valores mayores en la producción de biomasa en comparación con plantas que contaron con 0 t ha<sup>-1</sup> y 0% NF. Tanure *et al.* (2019) reportan que altas dosis de biocarbón mejoran la fertilidad del suelo, el estado nutricional y el crecimiento de las plantas. También, Saha *et al.* (2019) observaron que plantas de sambiloto (*Andrographis paniculata*) tratadas con 5 t ha<sup>-1</sup> BC (fabricado con residuos de pasto de limón (*Cymbopogon flexuosus*)) junto con 60 kg ha<sup>-1</sup> N (urea), 20 kg ha<sup>-1</sup> P (superfosfato simple) y 40 kg ha<sup>-1</sup> K (muriato de potasio) mostraron un incremento en la acumulación de materia fresca y seca debido a una mayor biomasa microbiana, contenido de carbono y actividad deshidrogenasa y fosfatasa en el suelo. Por otro lado, Ye *et al.* (2019) reportan que tasas de aplicación de biocarbón mayores a 10 t ha<sup>-1</sup> no contribuyen a un mayor rendimiento del cultivo (en el corto plazo), indicando que los beneficios

observados durante el primer año están relacionados principalmente a un efecto encajado del biocarbón en el suelo. Estos autores también mencionan que el N en el biocarbón no está disponible en gran medida ya que está presente principalmente como N aromático heterocíclico; además, puede ocurrir una inmovilización inicial de N en el suelo ya que el carbono orgánico en el BC se mineraliza fácilmente, por lo que es recomendable la adición de alguna forma de N disponible (ya sea orgánica o inorgánica) junto con el BC. Esto concuerda con lo observado en el presente estudio, evidenciando que dosis de  $16 \text{ t ha}^{-1}$  no causaron una mayor biomasa de las plantas de café en general (**Figura 11A**).

Los resultados obtenidos de este estudio muestran una serie de ventajas importantes para el cultivo del café desde un enfoque del manejo de la nutrición del cultivo mediante el uso de BC. Es importante señalar que la incorporación de biocarbón al suelo acompañado de fertilizantes de síntesis química es una estrategia que se ha utilizado en otras especies para mejorar el crecimiento y acumulación de biomasa de las plantas (El-Naggar *et al.*, 2019; Ye *et al.*, 2019), obteniéndose similares resultados en el cultivo de café. Otro resultado importante de este estudio, el uso de BC puede mejorar la fisiología de la planta mediante una mejor conductancia estomática e incremento del estado hídrico (mejor  $K$  y uso eficiente del agua) en combinación con la fertilización química. Estos resultados proporcionan información para recomendar la pirólisis de residuos del grano de café obtener biocarbón y favorecer el reciclaje de nutrientes a suelos de las zonas cafeteras, ayudando a la sostenibilidad del sistema productivo porque esta enmienda muestra un impacto positivo para la relación planta-suelo (Lehman *et al.*, 2011; Agegnehu *et al.*, 2017; Moreira *et al.*, 2017).

En conclusión, el uso de BC a partir de pulpa de café combinado con fertilización inorgánica genera un efecto positivo sobre el comportamiento fisiológico del cultivo de café. La aplicación de  $8 \text{ t ha}^{-1}$  en combinación con niveles de fertilización química 66 y 100% favoreció una acumulación de materia seca, conductividad hidráulica de la raíz y uso eficiente del agua en plantas de café variedad Castillo. Lo anteriores resultados sugieren que el uso de BC fabricado con pulpa de café principalmente a una dosis de  $8 \text{ t ha}^{-1}$  puede ser una herramienta complementaria en la nutrición de este cultivo porque puede reducir los niveles de uso de fertilizantes químicos en un mediano plazo.

### 3.5 Bibliografía

- Agegnehu, G., A.K. Srivastava y M.I. Bird. 2017. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied soil ecology*, 119, 156-170.
- Alam, S. N., Z. Khalid, B. Singh, A. Guldhe, D.K. Shahi y K. Baudh. 2020. Application of Biochar in Agriculture: A Sustainable Approach for Enhanced Plant Growth, Productivity and Soil Health. In *Ecological and Practical Applications for Sustainable Agriculture*. Springer, Singapore. 107-130.
- Alshaal, T., H. El-Ramady, A.H. Al-Saeedi, T. Shalaby, T. Elsakhawy, A.E.D. Omara y N. Abdalla. 2017. The rhizosphere and plant nutrition under climate change. In *Essential Plant Nutrients*. Springer, Cham. 275-308.
- Ancy-Jenifer, A., M. Vasanthi, B. Ravindran, W.J. Chung y S.W. Chang. 2020. Treatment of coffee cherry pulping wastewater by using lectin protein isolated from *Ricinus communis* L. seed. *Journal of Water Process Engineering*, 101742.
- Arcila-Pulgarín, J., L. Buhr, H. Bleiholder, H. Hack, U. Meier y H. Wicke. 2002. Application of the extended BBCH scale for the description of the growth stages of coffee (*Coffea* spp.). *Annals of Applied Biology*, 141(1), 19-27.
- Arif, M., M. Ilyas, M. Riaz, K. Ali, K. Shah, I.U. Haq y S. Fahad. 2017. Biochar improves phosphorus use efficiency of organic-inorganic fertilizers, maize-wheat productivity and soil quality in a low fertility alkaline soil. *Field crops research*, 214, 25-37.
- Asai, H., B.K. Samson, H.M. Stephan, K. Songyikhangsuthor, K. Homma, Y. Kiyono y T. Horie. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos: 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field crops research*, 111(1-2), 81-84.
- Awad, Y.M., S.E. Lee, M.B.M. Ahmed, N.T. Vu, M. Farooq, I.S. Kim y Y.S. Ok. 2017. Biochar, a potential hydroponic growth substrate, enhances the nutritional status and growth of leafy vegetables. *Journal of Cleaner Production*, 156, 581-588.
- Bado, V. B. y A. Bationo. 2018. Integrated management of soil fertility and land resources in Sub-Saharan Africa: involving local communities. *Advances in Agronomy*, 150, 1-33.

- Bommaraju, B.K. 2016. Use of biochar and compost as substrate alternatives in coffee plant production (Tesis de maestría). Università di Bologna. Italia.
- Bongase, E.D. 2017. Impacts of climate change on global coffee production industry. *African Journal of Agricultural Research*, 12(19), 1607-1611.
- Chang, Y., L. Rossi, L. Zotarelli, B. Gao y A. Sarkhosh. 2021. Greenhouse Evaluation of Pinewood Biochar Effects on Nutrient Status and Physiological Performance in Muscadine Grape (*Vitis rotundifolia* L.). *HortScience*, 1(aop), 1-9.
- Chen, J., H. Qian y H. Wu. 2017. Nitrogen contamination in groundwater in an agricultural region along the New Silk Road, northwest China: distribution and factors controlling its fate. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(15), 13154-13167.
- Czekała, W., A. Jeżowska y D. Chelkowski. 2019. The use of biochar for the production of organic fertilizers. *Journal of Ecological Engineering*, 20(1).
- Das, S.K., G.K. Ghosh y R. Avasthe. 2020. Application of biochar in agriculture and environment, and its safety issues. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-11.
- Deng, B., B. Bada, P. Tammeorg, J. Helenius, O. Luukkanen y M. Starr. 2019. Drought stress and *Acacia seyal* biochar effects on sorghum gas exchange and yield: A greenhouse experiment. *Agriculture and Natural Resources*.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo 2016. InfoStatversion 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Domingues, R.R., P.F. Trugilho, C.A. Silva, I.C.N.D. Melo, L.C. Melo, Z.M. Magriotis y M.A. Sanchez-Monedero. 2017. Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PloS one*, 12(5), e0176884.
- Duarte, A., J.C. Uribe, W. Sarache y A. Calderón. 2020. Economic, environmental, and social assessment of bioethanol production using multiple coffee crop residues. *Energy*, 119170.
- El-Naggar, A., S.S. Lee, J. Rinklebe, M. Farooq, H. Song, A.K. Sarmah y S. Ok. 2019. Biochar application to low fertility soils: a review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536-554.
- Faloye, O.T., M.O. Alatise, A.E. Ajayi y B.S. Ewulo. 2019. Effects of biochar and inorganic fertiliser applications on growth, yield and water use efficiency of maize under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 217, 165-178.

- Farhangi-Abriz, S. y S. Torabian. 2018. Biochar improved nodulation and nitrogen metabolism of soybean under salt stress. *Symbiosis*, 74(3), 215-223.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2021. Estadísticas cafeteras. Revisado en enero de 2021. En: <https://federaciondecafeteros.org/wp/86estadísticas-cafeteras/>.
- Feng, W., F. Yang, R. Cen, J. Liu, Z. Qu, Q. Miao y H. Chen. 2021. Effects of straw biochar application on soil temperature, available nitrogen and growth of corn. *Journal of Environmental Management*, 277, 111331.
- García-Castro, A., A. Volder, H. Restrepo-Díaz, T.W. Starman y L. Lombardini. 2017. Evaluation of different drought stress regimens on growth, leaf gas exchange properties, and carboxylation activity in purple passionflower plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 142(1), 57-64.
- Gavili, E., A.A. Moosavi y A.A.K. Haghghi. 2019. Does biochar mitigate the adverse effects of drought on the agronomic traits and yield components of soybean? *Industrial crops and products*, 128, 445-454.
- He, Y., Y. Yao, Y. Ji, J. Deng, G. Zhou, R. Liu y S.H. Bai. 2020. Biochar amendment boosts photosynthesis and biomass in C3 but not C4 plants: A global synthesis. *GCB Bioenergy*, 12(8), 605-617.
- Kalaji, H.M., W. Bąba, K. Gediga, V. Goltsev, I.A. Samborska, M.D. Cetner y A. Kompała-Bąba. 2018. Chlorophyll fluorescence as a tool for nutrient status identification in rapeseed plants. *Photosynthesis research*, 136(3), 329-343.
- Koleška, I., D. Hasanagić, V. Todorović, S. Murtić, I. Klokić, N. Parađiković y B. Kukavica. 2017. Biostimulant prevents yield loss and reduces oxidative damage in tomato plants grown on reduced NPK nutrition. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 209-218.
- Kufa, T., T. Shimber, B. Bellachew, E. Taye y G. Adugna. 2008. Coffee diversity & knowledge. Ethiopian Institute of Agricultural Research.
- Kwoczynski, Z. y J. Čmelík. 2021. Characterization of biomass wastes and its possibility of agriculture utilization due to biochar production by torrefaction process. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124302.
- Lehmann, J. y S. Joseph. 2009. Biochar for environmental management: an introduction. *Biochar for Environmental Management-Science and Technology*. UK: Earthscan. 33-46

- Liu, Z., B. Dugan, C.A. Masiello, R.T. Barnes, M.E. Gallagher y H. Gonnermann. 2016. Impacts of biochar concentration and particle size on hydraulic conductivity and DOC leaching of biochar-sand mixtures. *J. Hydrol.* 2016 (533), 461–472.
- Manolikaki, I. y E. Diamadopoulos. 2017. Ryegrass yield and nutrient status after biochar application in two Mediterranean soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 63(8), 1093-1107.
- Morales, F., A. Pavlovič, A. Abadía y J. Abadía. 2018. Photosynthesis in poor nutrient soils, in compacted soils, and under drought. In *The leaf: A platform for performing photosynthesis*. Springer, Cham. 371-399.
- Moreira, M.T., I. Noya y G. Feijoo. 2017. The prospective use of biochar as adsorption matrix—A review from a lifecycle perspective. *Bioresource technology*, 246, 135-141.
- Naeem, M.A., M. Khalid, M. Aon, G. Abbas, M. Amjad, B. Murtaza y N. Ahmad. 2018. Combined application of biochar with compost and fertilizer improves soil properties and grain yield of maize. *Journal of Plant Nutrition*, 41(1), 112-122.
- Obia, A., T. Børresen, V. Martinsen, G. Cornelissen y J. Mulder. 2017. Effect of biochar on crust formation, penetration resistance and hydraulic properties of two coarse-textured tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 170, 114-121.
- Pareek, N. 2017. Climate change impact on soils: Adaptation and mitigation. *MOJ Eco. Environ. Sci*, 2(3), 00026.
- Pesce, M., A. Critto, S. Torresan, E. Giubilato, M. Santini, A. Zirino, y A. Marcomini. 2018. Modelling climate change impacts on nutrients and primary production in coastal waters. *Science of the Total Environment*, 628, 919-937.
- Poltronieri, P. y F. Rossi. 2016. Challenges in specialty coffee processing and quality assurance. *Challenges*, 7(2), 19.
- Prasad, M., N. Tzortzakis y N. McDaniel. 2018. Chemical characterization of biochar and assessment of the nutrient dynamics by means of preliminary plant growth tests. *Journal of environmental management*, 216, 89-95.
- Qian, Z.H.U., L.J. Kong, Y.Z. Shan, X.D. Yao, H.J. Zhang, F.T. Xie y A.O. Xue. 2019. Effect of Biochar on grain yield and leaf photosynthetic physiology of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(10), 2242-2254.
- Raviv, M. y T.J. Blom. 2001. The effect of water availability and quality on photosynthesis and productivity of soilless-grown cut roses. *Scientia Horticulturae*, 88(4), 257-276.

- Razzaghi, F., P.B. Obour y E. Arthur. 2020. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055.
- Reichembach, L.H. & de C.L. Oliveira-Petkowicz. 2020. Extraction and characterization of a pectin from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp with gelling properties. *Carbohydrate Polymers*, 116473.
- Ronga, D., M. Parisi, A. Pentangelo, M. Mori y I. Di Mola. 2019. Effects of nitrogen management on biomass production and dry matter distribution of processing tomato cropped in southern Italy. *Agronomy*, 9(12), 855.
- Salamanca-Jimenez, A. 2017. Coffee crop fertilization in Colombia: A Mini-. *International Potash Institute*, 50, 22–30.
- Sadeghian, S. 2008. Fertilidad del suelo y nutrición del café en Colombia: Guía práctica.
- Saha, A., B.B. Basak, N.A. Gajbhiye, KA. Kalariya y P. Manivel. 2019. Sustainable fertilization through co-application of biochar and chemical fertilizers improves yield, quality of *Andrographis paniculata* and soil health. *Industrial Crops and Products*, 140, 111607.
- Sanchez-Hernandez, J.C., K.S. Ro y F.J. Díaz. 2019. Biochar and earthworms working in tandem: research opportunities for soil bioremediation. *Science of the total environment*, 688, 574-583.
- Sánchez-Reinoso, A.D., E.A. Ávila-Pedraza y H. Restrepo-Díaz. 2020. Use of biochar in agriculture. *Acta Biológica Colombiana*, 25(2), 327-338.
- Shashi, M.A., M.A. Mannan, M.M. Islam y M.M. Rahman. 2018. Impact of rice husk biochar on growth, water relations and yield of maize (*Zea mays* L.) under drought condition. *The Agriculturists*, 16(02), 93-101.
- Shah, S.H., R. Houborg y M.F. McCabe. 2017. Response of chlorophyll, carotenoid and SPAD-502 measurement to salinity and nutrient stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agronomy*, 7(3), 61.
- Silva, B. M., G.C. de Oliveira, M.E. Serafim, C.E. Carducci, É.A. da Silva, S.M. Barbosa y P.T.G. Guimarães. 2019. Soil management and water-use efficiency in Brazilian coffee Crops. In *Coffee*. IntechOpen
- Singh, C., S. Tiwari y J.S. Singh. 2020. Biochar: a sustainable tool in soil pollutant bioremediation. In *bioremediation of industrial waste for environmental safety*. Springer, Singapore. 475-494.

- Song, S., S. Arora, A.K.C. Laserna, Y. Shen, B.W. Thian, J.C. Cheong y C.H. Wang. 2020. Biochar for urban agriculture: Impacts on soil chemical characteristics and on *Brassica rapa* growth, nutrient content and metabolism over multiple growth cycles. *Science of The Total Environment*, 727, 138742.
- Sorrenti, G., E. Muzzi y M. Toselli. 2019. Root growth dynamic and plant performance of nectarine trees amended with biochar and compost. *Scientia Horticulturae*, 257, 108710.
- Tanure, M.M., L.M. da Costa, H.A. Huiz, R.B.A. Fernandes, P.R. Cecon, J.D.P. Junior y J.M.R. da Luz. 2019. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil and Tillage Research*, 192, 164-173.
- Tomczyk, A., Z. Sokołowska y P. Boguta. 2020. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191-215.
- Tyree, M.T. S. Patinõ, J. Bennink, y J. Alexander. 1995. Dynamic measurements of roots hydraulic conductance using a high-pressure flowmeter in the laboratory and field. *J. Expt. Bot.* 46:83–94.
- Vassallo-Barco, M., L. Vives-Garnique, V. Tuesta-Monteza, H.I. Mejía-Cabrera y R.Y. Toledo. 2017. Automatic detection of nutritional deficiencies in coffee tree leaves through shape and texture descriptors. *Journal of Digital Information Management*, 15(1).
- Vegro, C.L.R. y L.F. de Almeida. 2020. Global coffee market: Socio-economic and cultural dynamics. In *Coffee Consumption and Industry Strategies in Brazil*. Woodhead Publishing. 3-19.
- Vijayaraghavan, K. 2021. The importance of mineral ingredients in biochar production, properties and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 51(2), 113-139.
- Xu, X., P. He, M.F. Pampolino, A.M. Johnston, S. Qiu, S. Zhao y W. Zhou. 2014. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Research*, 157, 27-34.
- Yazhini, G., R. Abishek, T. Ilakiya, S. Shanmugapriya y R.S. Piriya. 2020. Beneficial effects of biochar on agriculture and environments. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 74-88.

- Ye, L., M. Camps-Arbestain, Q. Shen, J. Lehmann, B. Singh y M. Sabir. 2019. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use and Management*, 36(1), 2-18.
- Zhang, P., F. Yang, H. Zhang, L. Liu, X. Liu, J. Chen, y C. Li. 2020a. Beneficial effects of biochar-based organic fertilizer on nitrogen assimilation, antioxidant capacities, and photosynthesis of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under Saline-Alkaline Stress. *Agronomy*, 10(10), 1562.
- Zhang, Q., Y. Song, Z. Wu, X. Yan, A. Gunina, Y. Kuzyakov y Z. Xiong. 2020b. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118435.
- Zhang, M., L. Zhang, M. Riaz, H. Xia y C. Jiang. 2021. Biochar amendment improved fruit quality and soil properties and microbial communities at different depths in citrus production. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126062.

# Capítulo 4 Comportamiento fisiológico y estado nutricional de árboles de café (*Coffea arabica* L.) en respuesta a aplicaciones de biocarbón

## Resumen.

La obtención de biocarbón (BC) a partir de pulpa de café puede ser una alternativa complementaria de la fertilización química (FQ) del cultivo; sin embargo, poca evidencia de sus efectos combinados en el cultivo de café ha sido reportada. Un ensayo en campo fue realizado durante dos años de evaluación (2019 y 2020) para analizar el efecto de la aplicación de cuatro diferentes dosis de biocarbón en combinación con cuatro niveles de fertilización sobre las respuestas fisiológicas como conductancia estomática ( $g_s$ ), contenido relativo de clorofila, eficiencia del PSII, contenido foliar de nutrientes y rendimiento de árboles de café (*Coffea arabica* L. var. Castillo el Tambo) de tres años de edad. Un diseño en parcelas divididas con bloques al azar fue establecido en campo; las parcelas principales fueron las cuatro dosis de BC (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y las parcelas pequeñas fueron los cuatro niveles de FQ (0, 33, 66 y 100% de los requerimientos nutricionales). Los resultados indican que árboles con 0 t ha<sup>-1</sup> BC y 0% FQ mostraron los menores valores en todas las variables fisiológicas estudiadas ( $g_s = 269.9$  y 126.8 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>; Chl = 61.7 y 54.7 At-leaf; Rendimiento = 0.21 y 0.22 kg CPS/árbol para 2019 y 2020, respectivamente). Árboles de café tratados con 8 t ha<sup>-1</sup> BC y con niveles de fertilización del 100% registraron los mayores resultados en las variables evaluadas ( $g_s = 424.9$  y 366.9 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>; Chl = 71.1 y 69.8 At-leaf; Rendimiento = 0.41 y 0.57 kg/árbol en 2019 y 2020, respectivamente). En conclusión, la aplicación de BC de pulpa de café, especialmente a una dosis de 8 t ha<sup>-1</sup>, genera un efecto positivo sobre las respuestas fisiológicas (rendimiento,  $g_s$ , contenido foliar de nutrientes, Chl) de árboles de café y puede ser una alternativa como complemento de la nutrición mineral de cultivos comerciales de café que ayudaría a mitigar el uso de fertilizantes químicos en un mediano plazo a través del aprovechamiento de residuos producidos dentro de la misma cadena productiva.

**Palabras clave:** Subproductos de café, concentración foliar de nutrientes, pirolisis, eficiencia agronómica.

## Abstract

Obtaining biochar (BC) from coffee pulp can be a complementary alternative to chemical fertilization (CF) of the crop; however, little evidence of their combined effects on coffee cultivation has been reported. A field trial was carried out during two evaluation years (2019 and 2020) to analyze the effect of the application of four different doses of biochar in combination with four levels of fertilization on physiological responses such as stomatal conductance ( $g_s$ ), relative content of chlorophyll, PSII efficiency, foliar nutrient content and yield of three-year-old coffee trees (*Coffea arabica* L. var. Castillo el Tambo). A split plots design with random blocks was established in the field; the main plots were the four doses of BC (0, 4, 8 and 16 t ha<sup>-1</sup>) and the small plots were the four levels of CF (0, 33, 66 and 100% of the nutritional requirements). The results indicate that trees with 0 t ha<sup>-1</sup> BC and 0% CF showed the lowest values in all the physiological variables studied ( $g_s = 269.9$  and 126.8 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>; Chl = 61.7 and 54.7 At-leaf; Yield = 0.21 and 0.22 kg CPS / tree for 2019 and 2020, respectively). Coffee trees treated with 8 t ha<sup>-1</sup> BC and with fertilization levels of 100% registered the highest results in the evaluated variables ( $g_s = 424.9$  and 366.9 mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>; Chl = 71.1 and 69.8 At-leaf; Yield = 0.41 and 0.57 kg / tree in 2019 and 2020, respectively). In conclusion, the application of BC from coffee pulp, especially at a dose of 8 t ha<sup>-1</sup>, generates a positive effect on the physiological responses (yield,  $g_s$ , foliar nutrient content, Chl) of coffee trees and can be an alternative as a complement to the mineral nutrition of commercial coffee crops that would help mitigate the use of chemical fertilizers in the medium term through the use of residues produced within the same production chain.

**Keywords:** Coffee by-products, foliar nutrient concentration, pyrolysis, agronomic efficiency.

## 4.1 Introducción

El café es uno de los productos agrícolas más comercializados internacionalmente porque es consumido por aproximadamente un tercio de la población mundial, convirtiéndolo en una de las bebidas más populares. Además, el comercio de café a nivel global es basado en dos especies: café arábico (*Coffea arabica* L.) y café robusto (*C. canephora* L.), los cuales representan cerca del 99% de la producción de café en todo el mundo (Chinchilla-Soto *et al.*, 2021). En Colombia, el café es uno de los principales cultivos y ocupó una extensión de 853,700 ha que obtuvo cerca de 833,400 t de café verde en 2020 (Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2021).

La producción de cultivos está contribuyendo sustancialmente al cambio climático a través de actividades asociadas a las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) o la contaminación del agua, aire y suelo (Fofack y Derick, 2020). El uso inadecuado de

fertilizantes nitrogenados puede generar altos contenidos de nitratos en las aguas subterráneas, causando problemas ambientales y aportar en la generación de GEI (Zheng *et al.*, 2020). Este escenario demanda utilizar estrategias sostenibles que sean capaces de mejorar el rendimiento, la calidad de los productos cosechados y ayudar la adaptación de los cultivos (Del Buono., 2020: Fofack y Derick, 2020).

El cultivo de café puede ser fuente de generación de subproductos como la pulpa fresca, los cuales pueden llegar a ser entre el 40% al 50% de los granos de café cereza cosechados (Reichembach y de Oliveira-Petkowicz, 2020). Gran parte de este residuo es vertido en la naturaleza generando graves problemas ambientales (contaminación de las aguas subterráneas y del suelo) a causa de lixiviados tóxicos (taninos, terpenoides, cafeína, entre otros) (da Silveira *et al.*, 2020). Generalmente, el uso agrícola de pulpa de café puede ser como compost (Murthy and Naidu, 2012). En los últimos años, se ha estudiado el uso de la pulpa de café con el objetivo de realizar una mejor aplicación en la agricultura y para usarla como materia prima en la creación de varios productos de valor agregado (compuestos aromáticos, ácidos orgánicos, enzimas, entre otros) (da Silveira *et al.*, 2020). En este sentido, el proceso de pirólisis puede ser una alternativa importante en el manejo de subproductos como la pulpa de café y su aplicación puede aportar numerosos beneficios como un complemento en la nutrición mineral de los cultivos agrícolas.

El biocarbón (BC) es un producto de bajo costo y rico en carbono que es obtenido mediante la degradación térmica de recursos naturales bajo una condición de oxígeno limitado (pirólisis) (Guo *et al.*, 2020). El resultado del proceso de pirólisis puede ser nombrado de dos formas dependiendo de su uso: i) biocarbón: como acondicionador del suelo con el fin de mejorar la calidad del suelo y la productividad de los cultivos y ii) carbón vegetal: destinado para la generación de energía (Lehmann and Joseph, 2009). Materiales a base de carbono como estiércol animal, desechos vegetales, residuos de madera o residuos de cultivos pueden ser utilizados para la fabricación de BC (Farhangi-AbrizKazem y Ghassemi-Golezani, 2021). Wang *et al.* (2020) han reportado que las interacciones entre el BC, la materia orgánica, la biota del suelo y la biodisponibilidad de nutrientes para las plantas se presentan en un corto período de tiempo después de la aplicación de este al suelo. Además, se ha documentado que el uso de BC puede ayudar al secuestro de carbono y mejorar las propiedades físicas y químicas del suelo en determinadas

condiciones, considerándose como una alternativa sustentable para la aprovechamiento y uso de los subproductos de un agroecosistema (Reyes-Moreno *et al.*, 2021).

Diversas investigaciones han estado enfocadas en evaluar el uso del BC sobre la fisiología de plantas cultivadas. Vaccari *et al.* (2015) encontraron que aplicaciones de 14 t ha<sup>-1</sup> BC (obtenido de pellet de salvado de trigo) incrementó el crecimiento y contenido de nutrientes (Nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K) y magnesio (Mg)) en plantas de tomate. Partey *et al.* (2016) también encontraron que plantas de arroz tratadas con 5 t ha<sup>-1</sup> BC (obtenido de madera de teca (*Tectona grandis* L.)) aumentaron la absorción de N en un 127% y tuvieron un rendimiento promedio de 1.8 t ha<sup>-1</sup> en comparación con plantas no tratadas con BC (rendimiento de 1.3 t ha<sup>-1</sup>). Por otro lado, se ha documentado también los beneficios de la aplicación de BC como complemento a la nutrición mineral. Mete *et al.*, (2015) concluyeron que aplicaciones de 20 t ha<sup>-1</sup> BC (obtenido de aserrín) en combinación con un fertilizante compuesto (60N-175P-120K kg ha<sup>-1</sup>) causaron una mayor disponibilidad de P en el suelo e incrementaron el rendimiento de tres genotipos de soya evaluados. Resultados similares también son reportados por Baiga y Rao (2017) donde observaron que plantas de col China tratadas con 10 t ha<sup>-1</sup> BC (obtenido de pasto Kunai (*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.)) con 500 kg ha<sup>-1</sup> N tuvieron una mayor absorción de N y rendimiento.

El estudio de la fisiología de las plantas sobre la respuesta a la aplicación de BC ha adquirido importancia en los últimos años (Al-Wabel *et al.*, 2018; Vijayaraghavan, 2021). Algunos estudios han reportado que el uso de BC como enmienda del suelo puede mejorar significativamente la fisiología e incrementa la productividad de los cultivos (Abbas *et al.*, 2021; Graber *et al.*, 2010). En adición, Zeeshan *et al.* (2020) reportaron que las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) registraron e incrementaron el contenido de clorofila a, b, clorofila total y caroteno (en 10, 45, 17 y 15%, respectivamente) con la aplicación de 20 t ha<sup>-1</sup> BC obtenido de madera de *Acacia arabica* (L.) Delile. Del mismo modo, Tanure *et al.* (2019) indicó que el suelo enmendado con 5-60 g kg<sup>-1</sup> BC (obtenido de *Eucalyptus* spp.) Mostró mayor conductancia estomática y tasa de fotosíntesis en plantas de maíz (*Zea mays* L.), lo que podría estar relacionado con el mejor estado nutricional del cultivo.

La aplicación exclusiva de BC no puede causar un efecto significativo en la producción intensiva de cultivos; sin embargo, su uso como un complemento a la nutrición mineral con

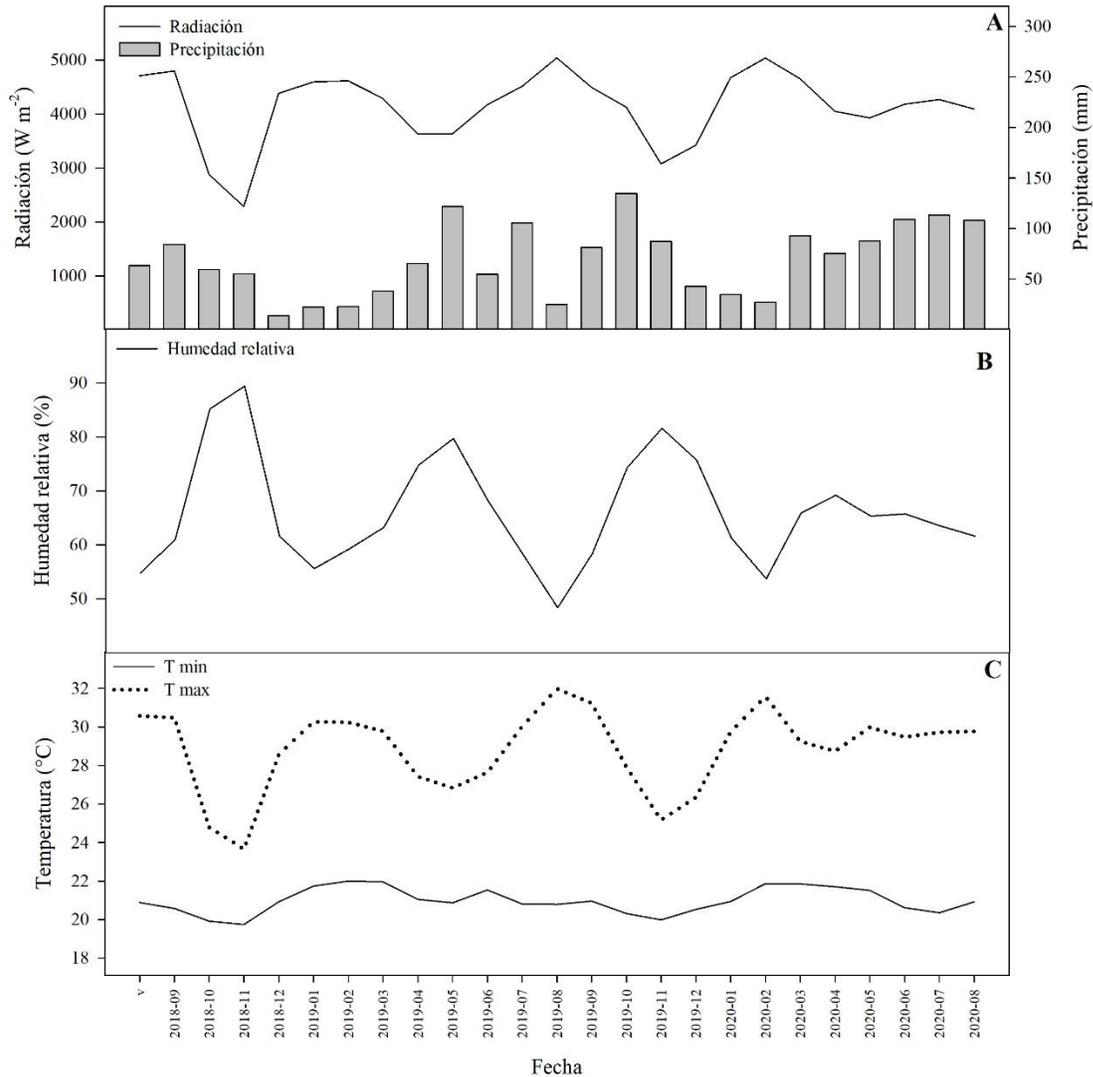
fertilizantes de síntesis química podría ofrecer beneficios a través de la inmovilización y una mejor regulación de la mineralización de elementos como el N, generando una mejor absorción y estado nutricional del cultivo (Baiga *et al.*, 2017). La información sobre el aprovechamiento de los residuos de la cosecha del café (pulpa) como fuente de BC y los efectos de la aplicación de este tipo de BC solo o en combinación con fertilizantes sigue siendo aún escasa en sistemas productivos tropicales como el cultivo del café. Estudios han reportado que el uso de BC puede favorecer la fisiología de planta mediante un mejor estado nutricional o propiedades de intercambio gaseoso de la hoja (Bommaraju, 2016; Baiga *et al.*, 2017). Sin embargo, el conocimiento sobre la influencia del uso del BC sobre el rendimiento del cultivo del café es limitada. En este sentido, el presente estudio buscaba estudiar el aprovechamiento de residuos del café (pulpa) como fuente para la fabricación de biocarbón y complemento al manejo de la nutrición mineral del café. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de cuatro diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) obtenido de la pulpa de café y cuatro niveles de fertilización química (0, 33, 66 y 100% de los requerimientos nutricionales de la especie) sobre las respuestas fisiológicas de árboles de café (*Coffea arabica* L. var. Castillo el Tambo) como: conductancia, pigmentos fotosintéticos, concentración foliar de nutrientes (macro y micro nutrientes) y rendimiento.

## 4.2 Materiales y métodos

### 4.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento

El experimento se desarrolló en la finca Luxemburgo, municipio de Chaparral, departamento del Tolima, Colombia (Lat. 3°49'39,2" N, Long. 75°34'07,1" O, altitud: 1.875 msnm), entre agosto de 2018 y 2020. Las condiciones ambientales (radiación, temperatura y precipitación) durante el experimento son presentadas en la **Figura 15**. El experimento se llevó a cabo con árboles de café (*Coffea arabica* L.) de tres años de edad del cultivar Castillo el Tambo. También, todos los árboles estaban espaciados a 1,70 m × 1,30 m (4.500 árboles/ha). Las características del suelo fueron las siguientes: i) pH de 5,50; ii) Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) 11,51 meq/100g; iii) Conductividad Eléctrica 0,17 dS/m; iv) Características químicas: Nitrógeno total: 0,27%, Ca: 7,85, K: 0,50,

Mg: 2,52, Na: 0,15 meq 100 g<sup>-1</sup>, Cu: 1,40, Fe: 124, Mn: 65, Zn: 2,90, B: 0,07 y P: 0,98 mg kg<sup>-1</sup> y v) una textura Franco (46% de Arcilla, 30% de limo y 46% arena).



**Figura 15.** Registros de precipitación y radiación solar (A), humedad relativa (B), temperatura máxima y mínima (C) en el experimento de Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) ubicado en la vereda Aguabonita, Corregimiento de las Hermosas, Chaparral Tolima. Los datos se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana [Chaparral (latitud 3° 37' 35,193" N, longitud 75° 32' 35,483" O, altitud: 914 m.s.n.m)] de Meteoblue weather

### 4.2.2 Tratamientos de biocarbón y niveles de fertilización

Los tratamientos de BC se establecieron cuatro meses después de la última cosecha de los árboles de café (agosto del 2018) usando cuatro diferentes dosis de Biocarbón (BC). La aplicación de BC fue realizada una sola vez durante el desarrollo de todo el experimento. Las dosis BC utilizadas fueron 0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> (BC0 = 0.0 kg/planta; BC4 = 0,75 kg/planta; BC8 = 1,50 kg/planta y BC16 = 3,00 kg/planta). Las dosis fueron establecidas con base a las respuestas agronómicas que se han observado en otras especies cultivadas (Sánchez-Reinoso *et al.*, 2020). El BC fue aplicado a un radio de 30 cm desde la base del tallo del árbol de café y posteriormente cubierto con suelo. El biocarbón utilizado se obtuvo de pulpa de café, la cual tuvo una pirolización media a 500 °C por 20 min con la ayuda de un horno rotatorio (6 m de largo x 0,7 m de diámetro interno), (Tecsol, Bogotá, Colombia). Finalmente, el BC mostraba las siguientes características: pH: 9.42; conductividad eléctrica 19.4: dS / m; carbono orgánico (CO): 46.4%; polvo 20,8%; N: 2.81%; P: 1,11%; Ca: 0,97%; K: 4,37%; Mg: 0,43%; Cu: 53,5 mg kg<sup>-1</sup>; Fe: 2.795 mg kg<sup>-1</sup>; Zn: 110 mg kg<sup>-1</sup>; B: 99,3 mg kg<sup>-1</sup>; CIC: 103 meq / 100g; CO/N: 16,5.

Los tratamientos de niveles de fertilización química se realizaron de forma fraccionada (dos aplicaciones por cada año de evaluación) acorde a las recomendaciones de Sadeghian (2013). La fertilización se desarrolló usando un fertilizante simple 46N (Urea, Yara, Colombia) y un fertilizante compuesto 17N–6P–18K–2Mg (Nutrimon–Café Producción, Monómeros S.A., Colombia). Los niveles de fertilización química (FQ) empleados fueron: i) 0% FQ (0 kg ha<sup>-1</sup>N, 0 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 0 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0 Zn kg ha<sup>-1</sup>), ii) 33% FQ (38 kg ha<sup>-1</sup>N, 8 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 24 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 3 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0,3 Zn kg ha<sup>-1</sup>), iii) 66% FQ (75 kg ha<sup>-1</sup>N, 16 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 48 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 5 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0,5 Zn kg ha<sup>-1</sup>) y iv) 100% FQ (114 kg ha<sup>-1</sup>N, 24 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 73 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 8 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0,8 Zn kg ha<sup>-1</sup>) de los requerimientos nutricionales. Los anteriores niveles se suministraron con las siguientes dosis de fertilizantes comerciales usados: F0 = 0 g/árbol de 17N–6P–18K–2Mg y 0 g/árbol de urea; F33 = 30 g/árbol de 17N–6P–18K–2Mg y 7 g/árbol de UREA; F66 = 60 g/planta de 17N–6P–18K–2Mg y 14 g/árbol de urea; y F100 = 90 g/árbol de 17N–6P–18K–2Mg y 22 g/árbol de UREA).

Las dosis anteriores se seleccionaron con base al análisis físico y químico del suelo y a los requerimientos nutricionales reportados por Salamanca-Jimenez (2017). La frecuencia de

aplicación de nutrientes fue cada 6 meses (mayo y octubre de cada año). Los tratamientos fueron dispuestos en un diseño de parcelas divididas en bloques completamente al azar. Las parcelas principales fueron las dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y las subparcelas fueron los niveles de fertilización química (0, 33, 66 y 100% de los requerimientos nutricionales). La unidad experimental estaba compuesta por cinco árboles rodeados de 12 árboles guarda y cada tratamiento se repitió cuatro veces (cuatro bloques), utilizando un total de 320 árboles en todo el experimento.

### 4.2.3 Conductancia estomática de la hoja

La estimación de la conductancia estomática ( $g_s$ ) fue registrada entre las 07:00 y las 10:00 horas usando un porómetro de estado estacionario (SC-1; Decagon Devices Inc., US). Las medidas fueron tomadas dos veces en el segundo par de hojas completamente expandidas de la rama del tercio superior del árbol acorde a los criterios descritos por Rodrigues *et al.* (2018).

### 4.2.4 Clorofilas y fluorescencia de la clorofila a

El contenido relativo de clorofila y la eficiencia fotoquímica máxima de PSII ( $F_v/F_m$ ) fueron también medidas en el segundo par de hojas completamente expandidas de la rama del tercio superior del árbol de café. El contenido relativo de clorofila (unidades At-leaf) se determinó usando un clorofilómetro (At-leaf, FT Green, US) en ambos años del estudio. La relación  $F_v/F_m$  se evaluó con la ayuda de un fluorómetro de excitación continua (Handy PEA, Hansatech Instruments, UK) utilizando clips de adaptación a la oscuridad por un periodo de 30 min. Al finalizar el tiempo de adaptación a oscuridad, los parámetros como la fluorescencia mínima ( $F_0$ ), fluorescencia máxima ( $F_m$ ) y la eficiencia máxima en el quantum del PSII ( $F_v/F_m$ ) fueron registradas. La  $F_0$  se midió utilizando luz de baja intensidad modulada ( $<0,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) para no alterar la fluorescencia variable. La  $F_m$  se registró con el uso de un pulso de luz saturante de  $3.000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  durante 0,8 s. La fluorescencia variable ( $F_v$ ) se calculó por la diferencia entre  $F_0$  y  $F_m$ . Finalmente, el rendimiento cuántico máximo potencial de PSII fue calculado mediante la relación entre la  $F_v$  y la  $F_m$ .

En 2020, las variables de fluorescencia a condiciones de luz fueron medidas con la ayuda de un fluorómetro modulado (MultispeQ V 2,0, PhotosynQ, US) de acuerdo a la metodología descrita por Fernández-Calleja *et al.* (2020). Las lecturas se registraron siguiendo el protocolo “Photosynthesis RIDES MultispeQ v2.0” una vez la hoja era sujeta por el equipo. La medición de una sola hoja tomó aproximadamente 120 s.

El rendimiento cuántico de PSII en condiciones de luz ( $\Phi_2$ ), el flujo lineal de electrones (LEF), la disipación no fotoquímica total ( $\text{NPQ}_t$ ), la fracción de luz perdida a través de procesos inhibidores de la fotosíntesis no regulados ( $\Phi_{\text{INO}}$ ) y la fracción de luz dedicada a la disipación no fotoquímica ( $\Phi_{\text{NPQ}}$ ) fueron determinadas. Los parámetros de rendimiento de la fluorescencia de la clorofila ( $F_s$ ,  $F_m$  ' y  $F_0$  ) fueron estimados con un pulso de saturación en hojas adaptadas a la luz. El rendimiento de fluorescencia en estado estacionario ( $F_s$ ) fue determinado mediante el uso de luz actínica continua. Luego, la muestra fue expuesta a un breve pulso de saturación de luz para registrar una estimación del rendimiento máximo de fluorescencia bajo iluminación de estado estable ( $F_m$  ' ) con niveles de estado estable NPQ (pero con todos los centros de PSII cerrados). Inmediatamente, la luz actínica fue apagada después del pulso de saturación y un pulso de luz roja lejana (procedente de un LED) fue aplicado para oxidar completamente el conjunto de plastoquinona y  $Q_A$  y así estimar  $F_0$  en presencia de niveles de estado estacionario de NPQ (pero con todos los centros de PSII oxidados) (Baker, 2008). Finalmente, el flujo lineal de electrones (LEF) fue estimado multiplicando  $\Phi_2 \times \text{PAR}$  incidente  $\times 0,5$  (asumiendo una distribución igual de excitación entre los PSII y PSI)  $\times 0,84$  (coeficiente de absorbancia foliar más común para plantas C3 sanas) (Krall y Edwards, 1992).

Finalmente, la determinación de variables como  $g_s$ , unidades At-leaf, parámetros de la fluorescencia de la clorofila a y concentración foliar de nutrientes se determinaron un mes previo a la cosecha (segunda semana del mes de marzo) para cada año de evaluación, usando hojas completamente desarrolladas de ramas del tercio superior de cada planta. En adición, se tomaron tres árboles centrales de cada unidad experimental para la estimación de las variables.

#### 4.2.5 Concentración foliar de macro y micro nutrientes

Hojas completamente expandidas y sanas de los tres árboles centrales de cada unidad experimental por bloque fueron recolectadas para el análisis foliar. Las muestras se colectaron un mes antes de la cosecha (segunda semana del mes de marzo en cada año de evaluación), tomando entre cuatro y cinco hojas de los cuatro puntos cardinales de la zona central por cada árbol. El material vegetal fue procesado en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. El contenido de nitrógeno orgánico (N) fue determinado a siguiendo el método de digestión Kjeldahl. La cantidad de fósforo total (P) fue hallada por determinación colorimétrica con el método del fosfomolibdo-vanadato. La cuantificación de bases elementales mayores totales (Ca, K, Mg y Na) y elementos menores totales (Cu, Fe, Mn y Zn) fueron determinados por absorción atómica a través del método de calcinación a 600 °C y digestión ácida con HCl. Finalmente, el Boro (B) fue cuantificado por determinación colorimétrica según el método de la azometina.

#### 4.2.6 Recolección, rendimiento y eficiencia agronómica

Frutos maduros (Estado 88 según escala Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie - BBCH (Arcila-Pulgarín *et al.*, 2002)) de los cinco árboles de cada unidad experimental fueron colectados manualmente a partir de la segunda semana del mes de abril de cada respectivo año de evaluación. En adición, los granos fueron clasificados por método de flotación para seleccionar el café maduro y sano (Sanz-Uribe *et al.*, 2013). Posteriormente, la pulpa del café fue retirada sin agua con el uso de despulpadora tradicional (Eterna #3, Fundación Estrada Hermanos, Caldas, Colombia). El mucílago fue removido mediante fermentación natural en baldes plásticos durante 16 horas (Puerta-Quintero, 2000). Al finalizar el periodo de fermentación, los granos de café fueron lavados con agua limpia y se ubicaron en bandejas dentro de un secador cubierto hasta que alcanzaron una humedad entre el 10 y el 11%. El peso de 100 granos y rendimiento de café en pergamino seco (CPS) ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) fueron registrados (Fajardo-Peña y Sáenz-Uribe, 2004). Asimismo, el volumen del árbol sobre el suelo fue utilizada como covariable para ajustar el rendimiento, la cual fue calculada a partir de la cuantificación de la altura y extensión que asimilan la copa de los árboles a un esferoide (Restrepo-Díaz *et al.*, 2008).

Finalmente, la eficiencia agronómica (EA) fue calculada como la relación entre el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) del tratamiento sobre el rendimiento de las plantas sin fertilización ( $0 \text{ t ha}^{-1}$  BC y 0% NF) acorde a la metodología descrita por Xu *et al.* (2014).

#### 4.2.7 Análisis de los datos

Se realizó un diseño en parcelas divididas con bloques al azar donde las parcelas grandes fueron las cuatro dosis de biocarbón ( $0, 4, 8$  y  $16 \text{ t ha}^{-1}$ ) y las parcelas pequeñas correspondieron a los cuatro niveles de fertilización ( $0, 33, 66$  y  $100\%$  de los requerimientos nutricionales) para un total de 16 tratamientos con cuatro repeticiones por tratamiento. En adición, los valores porcentuales fueron transformados mediante la fórmula del arcoseno y posteriormente se realizó un análisis de varianza con medidas repetidas. En cuanto al rendimiento en CPS, un análisis por covarianza utilizando como covariable el volumen del árbol sobre suelo fue realizado. Posteriormente, cuando se presentaron diferencias significativas, se empleó la prueba comparativa de medias de Tukey a  $P \leq 0,05$ . Los datos se analizaron usando el programa Statistix v 9,0 (software analítico, Tallahassee, FL, US). Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales utilizando el programa InfoStat 2016 (Di Rienzo *et al.*, 2016).



**Tabla 6.** Resumen del análisis de la varianza del efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre las variables fisiológicas (conductancia estomática de la hoja, contenido de clorofila, eficiencia máxima de la clorofila a, rendimiento y eficiencia agronómica) y estado nutricional de los árboles de café durante dos años de experimentación (2019 y 2020).

Variable	2019			2020		
	Fuente de variación			Fuente de variación		
	Biocarbón (BC)	Nivel de fertilización (NF)	Interacción BC x NF	Biocarbón (BC)	Nivel de fertilización (NF)	Interacción BC x NF
g <sub>s</sub>	***	***	*	***	***	*
Chl	*	***	NS	*	***	**
F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	**	***	NS	***	***	***
CPS	**	***	**	***	***	*
EA	***	***	***	***	***	***
N	NS	***	NS	NS	*	NS
P	NS	*	NS	NS	***	NS
K	*	*	NS	NS	**	NS
Ca	NS	*	NS	NS	NS	NS
Mg	NS	*	NS	NS	*	NS
Cu	NS	*	NS	NS	***	NS
Fe	NS	*	NS	NS	**	NS
Mn	NS	**	NS	NS	***	NS
B	NS	*	NS	*	***	NS
Zn	NS	NS	NS	NS	***	NS

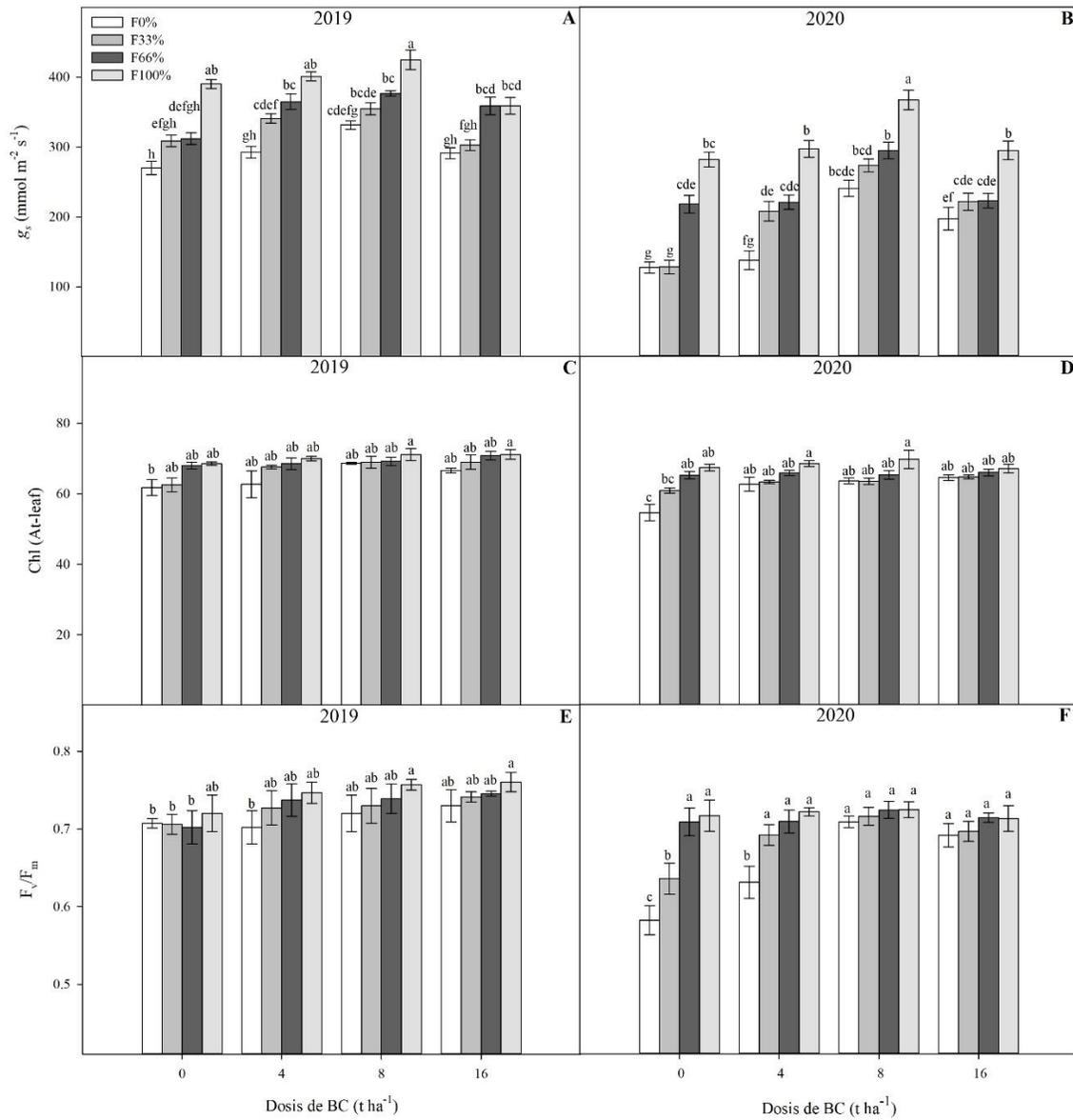
BC: Dosis de biocarbón. NF: Nivel de fertilización. \*, \*\* y \*\*\* son significativamente diferentes en los niveles de probabilidad 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente.

## 4.3 Resultados

### 4.3.1 Conductancia estomática, contenido relativo de clorofila y fluorescencia de la clorofila a

Los efectos de las dosis de biocarbón (BC) y niveles de fertilización (FQ) sobre las diferentes variables fisiológicas en árboles de café son resumidos en la **Tabla 6**. La conductancia estomática ( $g_s$ ) mostró diferencias ( $P \leq 0,05$ ) en la interacción entre los factores en ambos periodos de evaluación (año 2019 y 2020). En general, la  $g_s$  fue mayor en árboles de café tratados con un 100 % FQ en las diferentes dosis de BC con respecto a árboles sin fertilizantes en ambos años. La adición progresiva de BC generó un incremento más notorio en el segundo año de evaluación sobre  $g_s$  (principalmente en árboles con 100% FQ de sus requerimientos nutricionales), observándose valores de  $\sim 425 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  y  $\sim 367 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  a una dosis de  $8 \text{ t ha}^{-1}$  para 2019 y 2020, respectivamente (**Figura 16A y 16B**).

Diferencias fueron también encontradas entre los tratamientos de biocarbón y nivel de fertilización sobre Chl (registrado como lecturas At-leaf) y la  $F_v/F_m$  (**Tabla 6**). En resumen, los árboles tratados con  $0 \text{ t ha}^{-1}$  BC + 0% FQ registraron las menores lecturas At-leaf (año 2019 = 61,76 y año 2020 = 54,73) (Figura 2C y 2D) y  $F_v/F_m$  (año 2019 = 0,71 y año 2020 = 0,58) (**Figura 16E y 16F**) en comparación con los demás tratamientos en sus respectivos años de evaluación. Estas variables también mostraron un incremento progresivo con respecto a una mayor tasa de aplicación de BC y FQ, observándose un mayor aumento en el grupo de árboles sin fertilización y diferentes dosis de BC ( $0 \text{ t ha}^{-1}$  BC = 0,58;  $4 \text{ t ha}^{-1}$  BC = 0,63,  $8 \text{ t ha}^{-1}$  BC = 0,71 y  $16 \text{ t ha}^{-1}$  BC = 0,69, respectivamente) en 2020 (**Figura 16F**).



**Figura 16.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre conductancia estomática ( $g_s$ ) (A y B), contenido relativo de clorofila (lecturas at-Leaf) (C y D) y eficiencia máxima del quantum en el PSII ( $F_v/F_m$ ) (E y F) en 2019 y 2020. Las barras representan la media de cuatro bloques  $\pm$  error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tukey a  $p \leq 0,05$

El análisis de varianza muestra que diferencias también se encontraron entre las dosis de BC sobre parámetros de fluorescencia de la clorofila durante 2020 (**Tabla 7**). En general, cinco grupos de respuesta fueron identificados: *i*) los valores de NPQ<sub>t</sub>, PS1<sub>Centros Activos</sub>, PS1<sub>Centros Sobre Reducidos</sub> y PS1<sub>Centros Oxidados</sub> no presentaron diferencias significativas con la adición de BC; *ii*) una tendencia lineal positiva fue observada con aplicaciones graduales de BC sobre Phi2, alcanzando valores de 0.66 en los árboles tratados con 16 t ha<sup>-1</sup> BC; *iii*) una tendencia lineal negativa fue registrada con el incremento la dosis de BC sobre el PhiNO, mostrando los valores más altos en árboles que tuvieron 0 t ha<sup>-1</sup> BC (0,159); *iv*) una tendencia cúbica fue registrada con respecto a la dosis de BC sobre LEF y los valores más altos fueron encontrados en árboles con 4 t ha<sup>-1</sup> BC (54,48); finalmente, *v*) una tendencia cuadrática y cúbica fueron obtenidas con respecto a la dosis de BC sobre PS1<sub>Centros Abiertos</sub> y los valores más altos fueron alcanzados en árboles sin aplicación de BC (0,23).

Por otro lado, una positiva tendencia lineal fue evidenciada con la aplicación gradual de fertilizantes, especialmente, en árboles con el 100% FQ sobre los parámetros LEF (55,50), Phi2 (0,67), PniNO (0,156), PS1<sub>Centros Activos</sub> (3,44), PS1<sub>Centros Abiertos</sub> (0,23), PS1<sub>Centros Sobre Reducidos</sub> (0,74), PS1<sub>Centros Oxidados</sub> (0,08). Sin embargo, una negativa tendencia lineal fue registrada con el incremento de la fertilización química sobre NPQ<sub>t</sub> y PhiNPQ, alcanzando los valores más bajos en árboles tratados con 100% FQ (1,15 y 0,19) en comparación con árboles de café con 0% FQ (1,38 y 0,23), respectivamente.

**Tabla 7.** Resumen de análisis de varianza y contrastes polinómicos en variables como el Flujo lineal de electrones (LEF), Quenching no fotoquímico total (NPQ<sub>t</sub>), Rendimiento del quantum en PSII en condiciones de luz (Phi2), Fracción de luz perdida a través de procesos inhibidores de la fotosíntesis no regulados (PhiNO), Fracción de luz dedicada a la disipación no fotoquímica (PhiNPQ); Centros activos en PS1 (PS1<sub>Centros Activos</sub>), Centros abiertos en PS1 (PS1<sub>Centros Abiertos</sub>), Centros sobre reducidos en PS1 (PS1<sub>Centros Sobre Reducidos</sub>), Centros oxidados en PS1 (PS1<sub>Centros Oxidados</sub>) en hojas de árboles de café tratadas con cuatro dosis de biocarbón y diferentes niveles de fertilización para el periodo de evaluación del año 2020.

Tratamiento	LEF	NPQ <sub>t</sub>	Phi2	PhiNO	PhiNPQ	PS1 <sub>Centros Activos</sub>	PS1 <sub>Centros Abiertos</sub>	PS1 <sub>Centros Sobre Reducidos</sub>	PS1 <sub>Centros Oxidados</sub>
<b>Biocarbón (BC)</b>									
0 t ha <sup>-1</sup>	52,74 <sup>1</sup>	1,22	0,64	0,159	0,20	3,17	0,23	0,70	0,07
4 t ha <sup>-1</sup>	54,48	1,23	0,64	0,154	0,21	3,39	0,18	0,75	0,07
8 t ha <sup>-1</sup>	52,96	1,23	0,66	0,153	0,21	3,27	0,22	0,74	0,07
16 t ha <sup>-1</sup>	54,16	1,24	0,66	0,148	0,19	3,26	0,22	0,71	0,08
Significancia	C*	NS	L*	L**	Q*	NS	Q*, C*	NS	NS
<b>Nivel de fertilización (NF)</b>									
0%	51,56	1,38 a	0,63	0,151	0,23	2,99	0,19	0,68	0,06
33%	52,95	1,23 b	0,64	0,152	0,21	3,21	0,21	0,73	0,07
66%	54,33	1,16 b	0,66	0,154	0,19	3,44	0,22	0,76	0,07
100%	55,50	1,15 b	0,67	0,156	0,19	3,44	0,23	0,74	0,08
Contraste polinómico	L***	L***	L***	L*	L***	L**	L***	L***, Q**	L***
<b>Interacción BC × NF</b>									
Significancia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS
CV (%) <sup>x</sup>	2,90	11,19	3,89	4,31	13,80	14,07	14,48	5,97	21,91

<sup>1</sup>Los datos representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n = 4). \*, \*\* y \*\*\* difieren significativamente en 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente L = lineal, Q = cuadrática; C cúbica acorde al análisis de contrastes polinómicos. <sup>x</sup> Coeficiente de variación.

### 4.3.2 Concentración foliar de nutrientes

Diferencias fueron solamente encontradas entre los tratamientos de BC o FQ sobre la concentración foliar de macro y micro nutrientes (**Tabla 8** y **Tabla 9**). En cuanto a los macro nutrientes primarios, el N no evidenció diferencias significativas con respecto a la aplicación gradual de BC en los dos años de evaluación. La concentración foliar de P mostró una tendencia cuadrática y cúbica para 2019 y 2020, alcanzando los registros más altos en árboles tratados con 16 t ha<sup>-1</sup> BC. El K registró una positiva tendencia lineal, obteniéndose también el mayor contenido foliar de K con 16 t ha<sup>-1</sup> BC (año 2019 = 1,68% y año 2020 = 1,67%). Los macro elementos secundarios mostraron que el Ca y Mg presentaron diferencias en el primer año, evidenciándose que las mayores concentraciones se alcanzaron con 8 t ha<sup>-1</sup> BC (1,37% y 0,41%, respectivamente). Mientras, las diferencias no se presentaron en el segundo año del ensayo (2020) para estos macronutrientes. Por otro lado, la fertilización química causó unas mayores concentraciones foliares de macronutrientes cuando su nivel era mayor. En este sentido, una tendencia positiva lineal fue observada con el incremento gradual del FQ sobre los macronutrientes, encontrando los valores más altos en árboles tratados con el 100% FQ (N: 2,08% y 1,71%; P: 0,18% y 0,19%; K: 1,64% y 1,54%; Ca: 1,39% y 1,25%; Mg: 0,43% y 0,48% en 2019 y 2020, respectivamente) (**Tabla 8**).

Con respecto a los micronutrientes, El Cu y el Fe no mostraron diferencias significativas con respecto a la aplicación de BC en los dos años de evaluación. La concentración foliar de Mn registró una tendencia cúbica para el 2019 alcanzando los valores más altos en árboles tratados con 4 t ha<sup>-1</sup> BC (187,5 mg kg<sup>-1</sup>); mientras, diferencias significativas entre las dosis de BC no fueron encontradas en el segundo año de evaluación (2020). En cuanto a la concentración foliar de B, diferencias no fueron observadas en el primer año del ensayo (2019) con respecto a la aplicación gradual de BC; sin embargo, una tendencia cuadrática fue evidenciada en 2020, alcanzando los valores más altos en árboles tratados con 16 t ha<sup>-1</sup> BC (67,81 mg kg<sup>-1</sup>). Asimismo, diferencias significativas no fueron encontradas en el contenido foliar de Zn con la aplicación de BC en 2019 y 2020. Por otro lado, la fertilización química causó incrementos en las concentraciones foliares de micronutrientes cuando la FQ fue mayor. En general, una tendencia positiva lineal fue observada con la aplicación de fertilizantes, encontrando los valores más altos en los árboles de café tratados con el 100% FQ en los dos años de evaluación (Cu: 30,64 y 27,73 mg kg<sup>-1</sup>; Fe:

---

145,25 y 152,13 mg kg<sup>-1</sup>; Mn 191,27 y 199,92 mg kg<sup>-1</sup>; B: 50,64 y 79,79 mg kg<sup>-1</sup>; Zn: 15,85 y 18,23 mg kg<sup>-1</sup> en 2019 y 2020, respectivamente).

**Tabla 8.** Contenido de macronutrientes en hojas de árboles de café tratadas con cuatro dosis de biocarbón y diferentes niveles de fertilización durante dos años de experimentación (2019 y 2020).

Tratamiento	N (%)		P (%)		K (%)		Ca (%)		Mg (%)	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Biocarbón (BC)										
0 t ha <sup>-1</sup>	2,03	1,54	0,16	0,17	1,26	1,21	1,25	1,13	0,36	0,45
4 t ha <sup>-1</sup>	2,05	1,59	0,18	0,17	1,62	1,47	1,34	1,18	0,44	0,42
8 t ha <sup>-1</sup>	2,03	1,65	0,17	0,16	1,61	1,41	1,37	1,23	0,41	0,48
16 t ha <sup>-1</sup>	1,99	1,67	0,17	0,18	1,68	1,51	1,30	1,22	0,36	0,46
Significancia	NS	NS	Q*	C*	L**	L*	Q*	NS	Q*	NS
Nivel de fertilización (NF)										
0%	1,94	1,53	0,16	0,16	1,47	1,26	1,20	1,11	0,35	0,42
33%	2,03	1,58	0,17	0,17	1,43	1,36	1,31	1,17	0,39	0,44
66%	2,05	1,63	0,18	0,17	1,63	1,44	1,36	1,22	0,40	0,48
100%	2,08	1,71	0,18	0,19	1,64	1,54	1,39	1,25	0,43	0,48
Significancia	L***	L***	L**	L***	L*	L***	L**	L**	L**	L**
Interacción BC × NF										
Significancia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CV (%) <sup>x</sup>	3,89	8,30	10,99	7,77	15,46	14,52	13,62	12,27	17,06	23,15

<sup>1</sup>Los datos representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n = 4). \*, \*\* y \*\*\* difieren significativamente en 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente L = lineal, Q = cuadrática; C cúbica acorde al análisis de contrastes polinómicos. <sup>x</sup> Coeficiente de variación.

**Tabla 9.** Contenido de micronutrientes en hojas de árboles de café tratadas con cuatro dosis de biocarbón y diferentes niveles de fertilización durante dos años de experimentación (2019 y 2020).

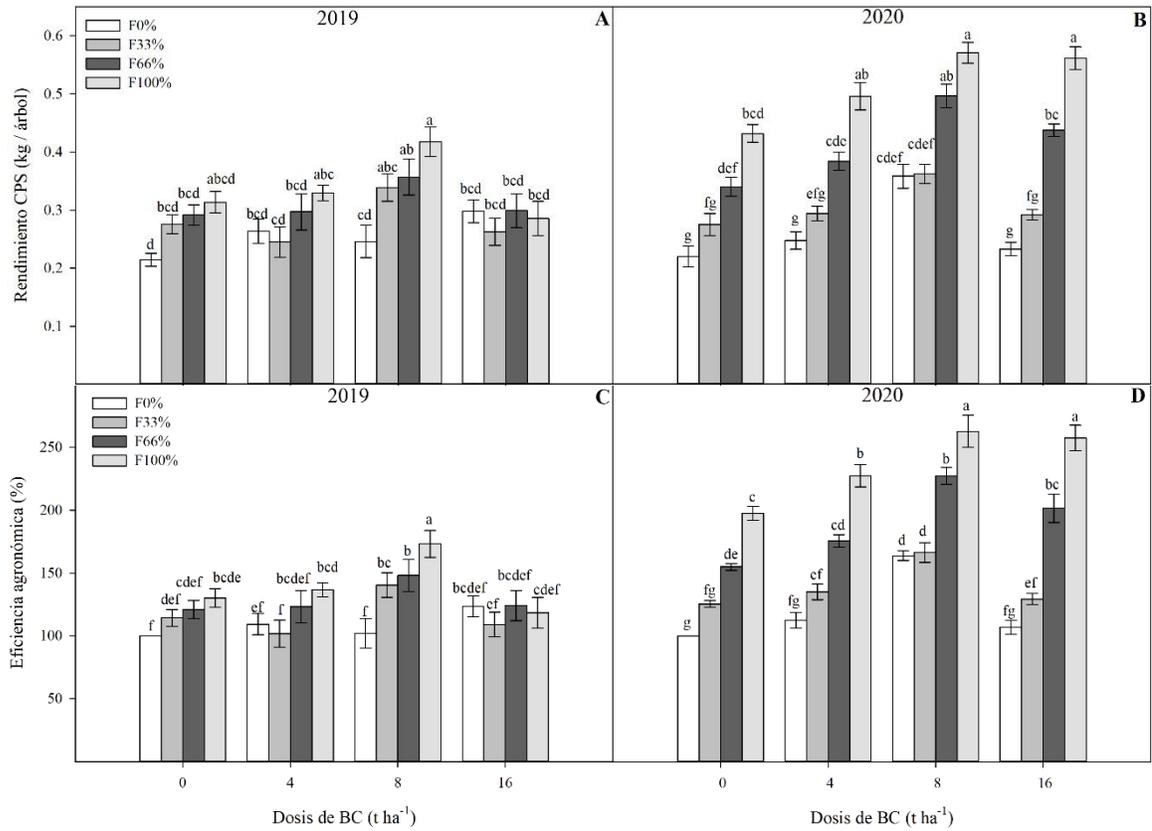
Tratamiento	Cu (mg/kg)		Fe (mg/kg)		Mn (mg/kg)		B (mg/kg)		Zn (mg/kg)	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Biocarbón (BC)										
0 t ha <sup>-1</sup>	28,74	20,33	139,73	124,88	170,54	156,88	43,27	60,90	15,54	11,52
4 t ha <sup>-1</sup>	30,41	22,63	133,63	138,88	187,50	150,15	46,32	51,44	14,51	7,31
8 t ha <sup>-1</sup>	28,20	21,86	132,23	149,75	152,60	162,85	44,42	55,90	15,11	10,02
16 t ha <sup>-1</sup>	28,60	23,28	124,40	137,05	177,63	157,98	49,97	67,81	14,30	9,92
Significancia	NS	NS	NS	NS	C*	NS	NS	Q**	NS	NS
Nivel de fertilización (NF)										
0%	27,71	17,65	119,90	123,45	153,37	121,06	42,69	45,42	14,39	5,01
33%	28,38	20,08	127,84	130,70	164,02	139,81	44,44	49,38	13,78	6,02
66%	29,22	22,64	137,00	144,29	179,60	167,06	46,20	61,48	15,43	9,50
100%	30,64	27,73	145,25	152,13	191,27	199,92	50,64	79,79	15,85	18,23
Significancia	L**	L***	L**	L***	L***	L***	L**	L***	L*	L***
Interacción BC x NF										
Significancia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CV (%) <sup>x</sup>	9,19	22,07	16,82	17,21	16,27	17,63	16,69	34,00	16,39	83,80

<sup>1</sup>Los datos representan el promedio de 4 plantas por tratamiento (n = 4). \*, \*\* y \*\*\* difieren significativamente en 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente L = lineal, Q = cuadrática; C cúbica acorde al análisis de contrastes polinómicos. <sup>x</sup> Coeficiente de variación.

### 4.3.3 Rendimiento, eficiencia agronómica y análisis de componentes principales biplot

El rendimiento en café pergamino seco (CPS) y la eficiencia agronómica (EA) presentaron diferencias ( $P \leq 0,001$ ) en la interacción BC x FQ (**Tabla 6**). En general, el CPS fue mayor en los árboles de café tratados con algún nivel de fertilización química (33%, 66% y 100%) en comparación con aquellos que no tuvieron aplicación de fertilizantes (0%) (**Figura 17**). La adición gradual de BC proporcionó un incremento en el rendimiento, especialmente, en árboles manejados con el 66% y 100% FQ de los requerimientos nutricionales, alcanzando valores de  $\sim 0,42 \text{ kg ha}^{-1}$  a una dosis de  $8 \text{ t ha}^{-1}$  en el periodo de evaluación del año 2019 (**Figura 17A**). Este efecto fue más notorio en el año 2020, alcanzando una producción cercana de  $\sim 0,57 \text{ kg ha}^{-1}$  a una dosis de 8 y  $16 \text{ t ha}^{-1}$ , respectivamente (**Figura 17B**). Tendencias similares fueron también encontradas en la EA donde se observó que la eficiencia aumentó cerca un  $\sim 73 \%$  en árboles con  $8 \text{ t ha}^{-1}$  BC y 100% FQ en el año 2019 (**Figura 17C**); mientras que en 2020 se evidenció un incremento del  $\sim 80\%$  de EA en árboles con  $4 \text{ t ha}^{-1} + 100\%$  FQ y cerca del  $\sim 120\%$  en árboles con  $8 \text{ y } 6 \text{ t ha}^{-1}$  BC + 66% y 100% FQ en comparación con los árboles tratados con  $0 \text{ t ha}^{-1}$  BC y 0% FQ (**Figura 17D**).

La **Tabla 10** resume los coeficientes de correlación ( $r$ ) que describen el grado de correlación entre las variables fisiológicas, rendimiento y concentración foliar de nutrientes para los años 2019 y 2020. En términos generales, los principales efectos de la aplicación de BC y FQ fueron evidenciados en el segundo año de evaluación (2020). Sin embargo, el rendimiento (expresado como CPS) mostró correlaciones positivas y significativas con  $g_s$ , EA, N y Ca en el año 2019 ( $r$  entre  $0,34^{**}$  y  $0,75^{***}$ ). En adición, una positiva y significativa correlación entre  $F_v/F_m$  y EA ( $r = 0,64^{***}$ ) fue observada; así como también entre  $g_s$  y Chl ( $r = 0,49^{***}$ ) con respecto a la adición de BC y NF en los árboles de café. En cuanto al año 2020, el CPS tuvo correlaciones positivas y significativas con  $g_s$ , Chl,  $F_v/F_m$ , EA, N, K, Mg, Cu, Fe, Mn, B y Zn. También, correlaciones positivas y significativas fueron registradas entre  $g_s$  con Chl,  $F_v/F_m$ , EA, N, K, Cu, Fe, Mn, B y Zn ( $r$  entre  $0,34^{**}$  y  $0,83^{***}$ ). No obstante, el contenido de Chl (lecturas At-leaf) tuvo correlaciones débiles positivas y no significativas ( $r < 0,3$ ,  $P > 0,05$ ) con P, Ca, Mg y Cu en árboles tratados con BC de pulpa de café y diferentes niveles de fertilización química. Tendencia similar fue también observada en los coeficientes de correlación entre  $F_v/F_m$  con N, Cu, B y Zn ( $r$  entre  $0,01$  y  $0,29$ ).



**Figura 17.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre rendimiento del cultivo en café pergamino seco (CPS) (g<sub>s</sub>) (A y B) y Eficiencia Agronómica (EA) (C y D) en 2019 y 2020. Las barras representan la media de cuatro bloques ± error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$ .

**Tabla 10.** Coeficiente de correlación de Pearson (*r*) entre las diferentes variables fisiológicas, rendimiento y contenido foliar de nutrientes en respuesta a la aplicación de biocarbón y niveles de fertilización en árboles de café.

Variables fisiológicas en el periodo de evaluación del año 2019														
	<i>g<sub>s</sub></i>	Chl	F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	CPS	EA	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	B
Chl	<b>0,49</b> <sup>***</sup>													
F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	<b>0,30</b> <sup>*</sup>	0,16 <sup>NS</sup>												
CPS	<b>0,54</b> <sup>***</sup>	<b>0,28</b> <sup>*</sup>	<b>0,36</b> <sup>**</sup>											
EA	<b>0,48</b> <sup>***</sup>	0,15 <sup>NS</sup>	<b>0,64</b> <sup>***</sup>	<b>0,75</b> <sup>***</sup>										
N	<b>0,38</b> <sup>**</sup>	0,15 <sup>NS</sup>	0,02 <sup>NS</sup>	<b>0,34</b> <sup>**</sup>	0,24 <sup>NS</sup>									
P	<b>0,41</b> <sup>***</sup>	<b>0,25</b> <sup>*</sup>	0,12 <sup>NS</sup>	0,27 <sup>*</sup>	<b>0,26</b> <sup>*</sup>	<b>0,40</b> <sup>***</sup>								
K	<b>0,35</b> <sup>**</sup>	<b>0,38</b> <sup>**</sup>	0,17 <sup>NS</sup>	0,24 <sup>NS</sup>	0,21 <sup>NS</sup>	0,02 <sup>NS</sup>	<b>0,35</b> <sup>**</sup>							
Ca	<b>0,42</b> <sup>***</sup>	0,23 <sup>NS</sup>	0,16 <sup>NS</sup>	<b>0,46</b> <sup>***</sup>	<b>0,32</b> <sup>**</sup>	<b>0,30</b> <sup>*</sup>	<b>0,32</b> <sup>**</sup>	0,16 <sup>NS</sup>						
Mg	<b>0,34</b> <sup>**</sup>	0,16 <sup>NS</sup>	-0,05 <sup>NS</sup>	0,17 <sup>NS</sup>	-0,03 <sup>NS</sup>	<b>0,25</b> <sup>*</sup>	0,23 <sup>NS</sup>	0,00 <sup>NS</sup>	0,19 <sup>NS</sup>					
Cu	0,23 <sup>NS</sup>	0,07 <sup>NS</sup>	-0,09 <sup>NS</sup>	-0,01 <sup>NS</sup>	-0,07 <sup>NS</sup>	0,17 <sup>NS</sup>	0,15 <sup>NS</sup>	0,13 <sup>NS</sup>	0,04 <sup>NS</sup>	<b>0,35</b> <sup>**</sup>				
Fe	<b>0,42</b> <sup>***</sup>	0,22 <sup>NS</sup>	<b>-0,26</b> <sup>*</sup>	0,11 <sup>NS</sup>	-0,03 <sup>NS</sup>	<b>0,29</b> <sup>*</sup>	0,10 <sup>NS</sup>	0,14 <sup>NS</sup>	0,00 <sup>NS</sup>	0,20 <sup>NS</sup>	<b>0,27</b> <sup>*</sup>			
Mn	0,23 <sup>NS</sup>	0,06 <sup>NS</sup>	<b>0,33</b> <sup>**</sup>	0,20 <sup>NS</sup>	0,24 <sup>NS</sup>	0,06 <sup>NS</sup>	<b>0,31</b> <sup>*</sup>	-0,07 <sup>NS</sup>	0,21 <sup>NS</sup>	<b>0,35</b> <sup>**</sup>	<b>0,34</b> <sup>**</sup>	-0,09 <sup>NS</sup>		
B	0,14 <sup>NS</sup>	0,22 <sup>NS</sup>	0,05 <sup>NS</sup>	0,12 <sup>NS</sup>	-0,01 <sup>NS</sup>	<b>0,32</b> <sup>*</sup>	<b>0,28</b> <sup>*</sup>	<b>0,28</b> <sup>*</sup>	0,17 <sup>NS</sup>	-0,04 <sup>NS</sup>	0,07 <sup>NS</sup>	-0,11 <sup>NS</sup>	0,09 <sup>NS</sup>	
Zn	0,23 <sup>NS</sup>	0,13 <sup>NS</sup>	-0,17 <sup>NS</sup>	-0,02 <sup>NS</sup>	-0,05 <sup>NS</sup>	-0,08 <sup>NS</sup>	-0,04 <sup>NS</sup>	0,10 <sup>NS</sup>	-0,03 <sup>NS</sup>	0,13 <sup>NS</sup>	0,24 <sup>NS</sup>	<b>0,28</b> <sup>*</sup>	0,10 <sup>NS</sup>	0,10 <sup>NS</sup>

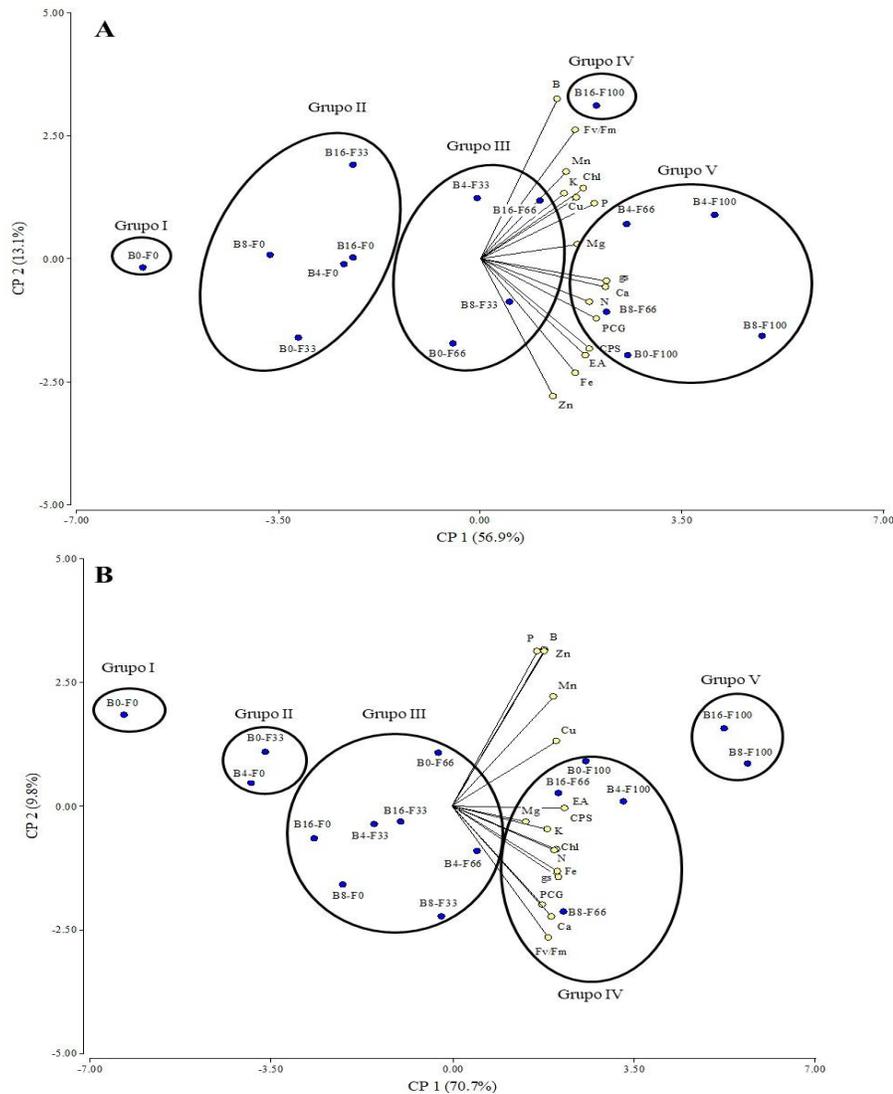
Variables fisiológicas en el periodo de evaluación del año 2020														
	<i>g<sub>s</sub></i>	Chl	F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	CPS	EA	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Fe	Mn	B
Chl	<b>0,64</b> <sup>***</sup>													
F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub>	<b>0,66</b> <sup>***</sup>	<b>0,57</b> <sup>***</sup>												
CPS	<b>0,80</b> <sup>***</sup>	<b>0,66</b> <sup>***</sup>	<b>0,58</b> <sup>***</sup>											
EA	<b>0,83</b> <sup>***</sup>	<b>0,65</b> <sup>***</sup>	<b>0,53</b> <sup>***</sup>	<b>0,95</b> <sup>***</sup>										
N	<b>0,42</b> <sup>***</sup>	<b>0,54</b> <sup>***</sup>	0,27 <sup>*</sup>	<b>0,39</b> <sup>**</sup>	<b>0,43</b> <sup>***</sup>									
P	0,25 <sup>*</sup>	0,24 <sup>NS</sup>	<b>0,39</b> <sup>**</sup>	0,28 <sup>**</sup>	<b>0,30</b> <sup>*</sup>	0,02 <sup>NS</sup>								
K	<b>0,40</b> <sup>***</sup>	<b>0,29</b> <sup>*</sup>	<b>0,44</b> <sup>***</sup>	<b>0,42</b> <sup>***</sup>	<b>0,38</b> <sup>**</sup>	0,14 <sup>NS</sup>	<b>0,54</b> <sup>***</sup>							
Ca	0,21 <sup>NS</sup>	0,23 <sup>NS</sup>	<b>0,59</b> <sup>***</sup>	0,27 <sup>*</sup>	0,20 <sup>NS</sup>	0,09 <sup>NS</sup>	<b>0,32</b> <sup>**</sup>	<b>0,30</b> <sup>*</sup>						
Mg	0,26 <sup>*</sup>	0,24 <sup>NS</sup>	<b>0,38</b> <sup>**</sup>	<b>0,36</b> <sup>**</sup>	<b>0,36</b> <sup>**</sup>	0,12 <sup>NS</sup>	0,20 <sup>NS</sup>	0,09 <sup>NS</sup>	<b>0,35</b> <sup>**</sup>					
Cu	<b>0,46</b> <sup>***</sup>	0,34 <sup>NS</sup>	0,29 <sup>*</sup>	<b>0,55</b> <sup>***</sup>	<b>0,58</b> <sup>***</sup>	<b>0,35</b> <sup>**</sup>	<b>0,43</b> <sup>***</sup>	0,29 <sup>*</sup>	0,26 <sup>*</sup>	0,09 <sup>NS</sup>				
Fe	<b>0,41</b> <sup>***</sup>	<b>0,41</b> <sup>***</sup>	<b>0,49</b> <sup>***</sup>	<b>0,49</b> <sup>***</sup>	<b>0,46</b> <sup>***</sup>	0,10 <sup>NS</sup>	0,28 <sup>*</sup>	0,27 <sup>*</sup>	<b>0,33</b> <sup>**</sup>	0,23 <sup>NS</sup>	<b>0,35</b> <sup>**</sup>			
Mn	<b>0,56</b> <sup>***</sup>	<b>0,38</b> <sup>**</sup>	<b>0,41</b> <sup>***</sup>	<b>0,68</b> <sup>***</sup>	<b>0,64</b> <sup>***</sup>	<b>0,34</b> <sup>**</sup>	<b>0,43</b> <sup>***</sup>	<b>0,31</b> <sup>*</sup>	0,21 <sup>NS</sup>	0,28 <sup>*</sup>	<b>0,42</b> <sup>***</sup>	<b>0,39</b> <sup>**</sup>		
B	<b>0,37</b> <sup>**</sup>	<b>0,41</b> <sup>***</sup>	0,11 <sup>NS</sup>	<b>0,44</b> <sup>***</sup>	<b>0,55</b> <sup>***</sup>	<b>0,42</b> <sup>***</sup>	0,04 <sup>NS</sup>	0,14 <sup>NS</sup>	-0,09 <sup>NS</sup>	0,19 <sup>NS</sup>	<b>0,33</b> <sup>**</sup>	0,09 <sup>NS</sup>	<b>0,36</b> <sup>**</sup>	
Zn	<b>0,34</b> <sup>**</sup>	<b>0,38</b> <sup>**</sup>	-0,01 <sup>NS</sup>	<b>0,45</b> <sup>***</sup>	<b>0,53</b> <sup>***</sup>	<b>0,35</b> <sup>**</sup>	-0,07 <sup>NS</sup>	0,10 <sup>NS</sup>	-0,13 <sup>NS</sup>	0,01 <sup>NS</sup>	0,28 <sup>*</sup>	0,06 <sup>NS</sup>	<b>0,30</b> <sup>*</sup>	<b>0,83</b> <sup>***</sup>

<sup>\*</sup>, <sup>\*\*</sup> y <sup>\*\*\*</sup> difieren significativamente en 0,05, 0,01 y 0,001.

El ACP muestra que los tratamientos son señalados por puntos, mientras que las variables fisiológicas y nutricionales son representadas por vectores (**Figura 18**). En resumen, se encontró que el PCA1 y PCA2 correspondieron el 56,9 y 13,1 % de la variación de los diferentes parámetros fisiológicos estudiados en el año 2019 (**Figura 18A**); mientras el PCA1 y PCA2 representaron el 70,7 y 9,0 % de la variación para 2020 (**Figura 18B**), respectivamente. En este sentido, los vectores de nutrientes (Mn, K, Cu, P, Mg, Ca y N) y variables fisiológicas (Chl, gs, CPS y EA) tienen ángulos cercanos al origen, indicando una mayor correlación entre las variables fisiológicas evaluadas en 2019. Los árboles tratados con 0, 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC en 100% FQ y árboles con 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 66% FQ se situaron en la sección del extremo derecho del análisis biplot (grupo V). Por lo contrario, la aplicación de 0 t<sup>-1</sup> ha BC y 0% FQ (grupo I), se ubicaron en el lado opuesto al grupo I, indicando un efecto negativo de la no nutrición del árbol de café sobre los parámetros fisiológicos estudiados. En adición, tres efectos diferenciales fueron observados con respecto a las dosis BC y FQ en las respuestas fisiológicas del cultivo de café: i) 0 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% FQ; 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% FQ (grupo II) respondieron con la misma tendencia del grupo I; ii) 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% NF; 0 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 66% FQ (grupo III) mostraron un menor efecto negativo sobre el comportamiento fisiológico de los árboles de café. Finalmente, iii) árboles tratados con 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 100% NF (grupo IV) evidenciaron una tendencia similar al grupo V, indicando una mejor respuesta en la fisiología de los árboles de café ante la aplicación de BC y fertilizantes.

Con respecto a la evaluación del año 2020, los vectores de nutrientes (Ca, Mn, Cu, Mg, K, N y Fe) y variables fisiológicas (EA, Chl, CPS y gs) mostraron ángulos cercanos al origen, evidenciando una mayor correlación entre las variables fisiológicas analizadas en el año 2020 (**Figura 18B**). Tendencias similares fueron encontradas en el grupo I, el cual fue representado por el mismo tratamiento en el año 2019. El grupo V estuvo conformado por los árboles tratados con 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 100% NF, los cuales se ubicaron en el extremo derecho del análisis biplot. Asimismo, tres respuestas diferenciales fueron observadas en los árboles de café con respecto a las dosis de BC y NF: i) 0 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% FQ; 4 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% FQ (grupo II) se comportaron hacia la misma tendencia del grupo I; ii) 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% FQ; 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% FQ; 0 y 4 t ha<sup>-1</sup> BC + 66% FQ (grupo III) evidenciaron un menor efecto negativo en las variables estudiadas; iii) árboles tratados con 0 y 4 t ha<sup>-1</sup> BC + 100% FQ; 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 66% FQ (grupo IV) registraron una tendencia

similar al grupo V. Finalmente, variables fisiológicas (gs, Chl, rendimiento) y nutricionales (contenido macros de N, K, Ca y Mg) serían herramientas o variables fisiológicas útiles para evaluar la respuesta de café a tratamientos de enmiendas, fertilización o la combinación de ambos.



**Figura 18.** Biplot de Análisis de Componente Principal (PCA) de diferentes variables fisiológicas en plántulas de café (*Coffea arabica* L.) bajo diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización. Chl: Contenido de clorofilas at-Leaf; gs: Conductancia estomática de la hoja; Fv/Fm: eficiencia máxima en el quantum del PSII; CPS: rendimiento en café pergamino seco; PCG: peso de cien granos; EA: eficiencia agronómica. Contenido de nutrientes en la hoja: N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: Magnesio; Cu: cobre; Fe: hierro; Mn: manganeso; B: boro; y Zn: zinc. B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>. F0: 0% de los requerimientos nutricionales; F33: 33% de los requerimientos nutricionales; F66: 66% de los requerimientos nutricionales; F100: 100% de

los requerimientos nutricionales. **A)** Periodo de evaluación del año 2019. **B)** Periodo de evaluación del año 2020.

## 4.4 Discusión

Estudios han documentado que el uso de biocarbón (BC) como una enmienda del suelo para mejorar la disponibilidad de nutrientes y condiciones de crecimiento para los cultivos (Vassilev *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2019; Abbas *et al.*, 2021). En la presente investigación, se encontró que árboles productivos de café con aplicaciones de BC principalmente a una dosis de 8 t ha<sup>-1</sup> favoreció parámetros fisiológicos tales como: conductancia estomática, contenido de pigmentos fotosintéticos, contenido foliar de nutrientes, rendimiento (café pergamino seco) y eficiencia agronómica, especialmente, como a niveles de fertilización química (entre el 66 y 100% de los requerimientos nutricionales). En este sentido, estudios recientes han concluido que el rendimiento y las respuestas fisiológicas de los cultivos pueden ser mejoradas con la incorporación de BC en el suelo, principalmente, cuando el manejo de la nutrición mineral de las plantas es complementado con fertilizantes químicos (Gao *et al.*, 2020; Liao *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020). Resultados positivos del uso BC combinado con otras fuentes también han sido encontrados en trigo (*Triticum aestivum* L. cv. Amaretto L.) (Akhtar *et al.*, 2015), tomate (*Solanum lycopersicum* Mill.) (Prasad *et al.* 2018; Ronga *et al.*, 2020), papa (*Solanum tuberosum* L.) (Gebre *et al.*, 2021) y nectarina (*Prunus persica* (L.) Batsch) (Sorrenti *et al.*, 2019). En resumen, estos autores concluyen que el BC incorporado al suelo (con dosis que variaron entre el 5% y 50% p:p, o entre 4 a 50 t ha<sup>-1</sup>) incrementó el contenido foliar de nutrientes, pigmentos fotosintéticos, crecimiento y rendimiento del cultivo.

La baja disponibilidad de nutrientes reduce la productividad de los cultivos porque afecta negativamente la tasa fotosintética e impacta negativamente en la traslocación de asimilados (Lu *et al.*, 2020). Los resultados encontrados confirmaron que los árboles de café sin un adecuado aporte de nutrientes (0 t ha<sup>-1</sup> y 0% FQ) mostraron una menor apertura de estomas contenido de clorofilas, relación  $F_v/F_m$  (**Figura 16E y 16F**), concentración foliar de macro y micro nutrientes y rendimiento. No obstante, árboles de café tratados con 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC alcanzaron una mayor  $g_s$  y estado nutricional cuando el nivel fertilización química era también mayor (66% y 100% NF). Similares tendencias han sido reportadas por Guo *et al.* (2021), quienes evaluaron la aplicación de 2% p/p de BC (obtenido a partir

de bolitas de paja de *Miscanthus* sp.) y dos niveles de fertilización nitrogenada (baja: 100 mg N kg<sup>-1</sup> suelo; alta: 200 mg N kg<sup>-1</sup> suelo) en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*). Estos autores indican que la aplicación de BC en complemento con un nivel alto de N presentó un incremento en  $g_s$ , transpiración y tasa fotosintética, sugiriendo que el BC mejoró el estado hídrico de las plantas de tomate. Dicho comportamiento fue asociado al aumento en la retención de agua en el suelo permitiendo una mayor conductancia hidráulica de la raíz. Hussien-Ibrahim *et al.* (2020) también concluyen que aplicaciones entre 0,25% y 5,00% p/p de BC (obtenido de paja de trigo) incrementó significativamente  $g_s$  y transpiración en plantas de sorgo.

Los árboles de café tratados con un nivel de fertilización del 0% y sin aplicación de BC también presentaron un contenido relativo de clorofila (lecturas At-leaf) y relación  $F_v/F_m$  considerablemente más bajo con respecto a los árboles tratados con el 100% del nivel de FQ y 0 t ha<sup>-1</sup> BC. Sin embargo, aumentos en Chl y relación  $F_v/F_m$  fueron observados con el incremento gradual de las dosis de BC y del nivel de FQ; especialmente, en árboles cuya aplicación de BC fue de 8 t ha<sup>-1</sup>. En este sentido, Abbas *et al.* (2017) encontraron que el contenido de clorofila a y b de plantas de trigo registraron un aumento de hasta 76% con aplicaciones graduales de BC (1,5, 3,0% y 5,0% p/p fabricado a partir de paja de arroz). Estos autores sugieren que el incremento del contenido de clorofilas está relacionado con un mayor contenido de nutrientes en el suelo como respuesta a la aplicación de BC.

El análisis de fluorescencia de la clorofila (relación  $F_v/F_m$ ) ha sido una técnica para estudiar la eficiencia de la fotosíntesis en relación a la aplicación de BC (Lyu *et al.*, 2016). En este sentido, Wang *et al.* (2021) informan que aplicaciones de 10 y 20 t ha<sup>-1</sup> BC (material no especificado por los autores) mejoraron la tasa de transferencia de electrones fotosintéticos y la proporción de centros de reacción PSII abiertos en las hojas de maní y redujeron la disipación de energía en forma de calor, permitiendo el uso completo de la energía luminosa absorbida en las hojas para la fotosíntesis. Dichos autores también indican que las aplicaciones de BC incrementaron la absorción de nitrógeno del suelo y probablemente mejoraron el contenido de clorofilas en la hoja, las cuales estimularon la síntesis de varias enzimas y transportadores de electrones que incrementaron la función fotosintética en las hojas. Tendencias similares también fueron observadas en el presente estudio, especialmente en aplicaciones superiores a 8 t ha<sup>-1</sup> BC; las cuales causaron

incremento sobre los valores de Phi2 y disminuyeron PhiNPQ en árboles de café. Lo anterior concuerda con lo reportado por Tang *et al.* (2020), quienes indicaron que aplicaciones de 5% p/p de BC (obtenido a partir de *Solidago canadensis* L.) favoreció la proporción de centros de reacción abiertos de PSII y redujo NPQ en plantas de *Brassica chinensis* L. en comparación con plantas que no contaron con BC.

El uso del análisis foliar para estimar el estado nutricional de los cultivos agrícolas (nivel de deficiencia o exceso) es una de las principales herramientas que apoya los programas de manejo de la nutrición basados en análisis del suelo (Zabini *et al.*, (2021). En este sentido, los resultados obtenidos en el presente estudio sugieren que en general el contenido foliar de macro y micronutrientes estuvo dentro de los rangos óptimos para el cultivo de café en los dos años de evaluación del experimento acorde a lo reportado por Sadeghian (2013). No obstante, la concentración foliar de N y K de los árboles de café tratados con 0 y 4 t ha<sup>-1</sup> BC y con niveles de FQ inferiores al 66% mostraron valores más bajos (dentro de los rangos de deficiencia) con respecto a los demás tratamientos, especialmente, en el segundo año del ensayo (2020). Por otro lado, los resultados del presente trabajo concuerdan con lo reportado por El-Mageed *et al.* (2021), quienes indican que aplicaciones de 0 a 5 y 10 t ha<sup>-1</sup> BC aumentaron el contenido de N en un 20,9% y 22,5%, P en un 25,4 y 16,9%, K en un 20,7 y 28,0% y Ca en un 48,2% y 76%, respectivamente en plantas de *Vicia faba* L. El aumento de la absorción de N, P, K y Ca en las plantas coincidió con un rendimiento alto del cultivo y fue asociado a un mayor contenido total de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> disponible, CIC y pH del suelo. Similar tendencia fue observada en esta investigación, sugiriendo que el aumento del rendimiento en CPS está relacionado a valores altos en el contenido foliar de macro (N, K y Mg) y micro nutrientes (Cu, Fe, Mn, B y Zn) especialmente en el año 2020 (**Tabla 10 y Figura 18B**).

El aumento del rendimiento en cultivos como respuesta a la aplicación de BC ha sido documentado en diferentes especies de plantas (Farhangi-Abriz *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2020; Ye *et al.* 2019). Nuestros resultados sugieren que 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC acompañado de un 66% y 100% de FQ generan mayor producción de CPS con respecto a árboles tratados con 0 t ha<sup>-1</sup> y 0% FQ. Sadaf *et al.* (2017) compararon el uso de 20 t ha<sup>-1</sup> de cuatro diferentes BC (obtenidos de estiércol de aves de corral, estiércol de corral, residuos de cocina y virutas de madera, respectivamente) en complemento con fertilizantes de síntesis química (87, 87 y 30 kg ha<sup>-1</sup> de NPK, respectivamente) en plantas de trigo. En general, la co-

aplicación de BC y fertilizantes produjo un mayor contenido de carbono del suelo, absorción de N y rendimiento en comparación con el control (sin nutrientes y ni enmiendas) o la sola aplicación de BC; sugiriendo que el complemento de las enmiendas de BC con FQ puede ser la estrategia más adecuada para lograr beneficios a corto plazo en términos de mayor rendimiento de grano y una mejora de la calidad de suelos infértiles. Los resultados de este estudio concuerdan con lo reportado por Gebre *et al.* (2021), quienes informan que el mayor rendimiento de tubérculos de papa fue registrado en plantas tratadas con 8 t ha<sup>-1</sup> BC (cascaras de café) y 363 kg ha<sup>-1</sup> de una mezcla de fertilizante inorgánico (NPS). Esta respuesta podría atribuirse a: *i*) el rol del S en una mejor distribución de los fotoasimilados en el brote y los tubérculos; y *ii*) la adición de P favorece el desarrollo de raicillas laterales y fibrosas que contribuyen a la absorción de agua y nutrientes, e incrementa la fotosíntesis.

La información obtenida de esta investigación muestra una serie de ventajas interesantes para el cultivo del café desde un enfoque del manejo de la nutrición del cultivo mediante el uso de BC. Es importante indicar que la aplicación de BC al suelo en combinación con fertilizantes de síntesis química es una opción interesante que se ha empleado en otros cultivos para mejorar el desempeño agronómico y rendimiento de las plantas (Ye *et al.*, 2019; Gao *et al.*, 2020; Abbas *et al.*, 2021), lo cual concuerda con las tendencias similares observadas en el cultivo de café. Otro aporte interesante de este estudio es que el uso de BC puede mejorar la fisiología de los árboles de café mediante una mejor conductancia estomática y estado nutricional del árbol (mayor contenido foliar de P, Ca, Mg, Fe, Mn y B) en combinación con la fertilización química. Esta investigación también aporta información que permite recomendar la transformación de la pulpa de café en BC a través de la pirólisis y su uso en suelos de las zonas cafeteras donde dichas enmiendas han mostrado un impacto positivo para la relación planta-suelo porque favorece el reciclaje de nutrientes (Lehman *et al.*, 2011; Kammann *et al.*, 2011; Das *et al.*, 2020).

En conclusión, aplicaciones de BC obtenido a partir de pulpa de café como un complemento a la fertilización inorgánica genera un efecto positivo sobre las respuestas fisiológicas de árboles de café. La aplicación de 8 t ha<sup>-1</sup> acompañadas con niveles de fertilización química de 66 y 100% de los requerimientos nutricionales incrementó el rendimiento en café pergamino seco, eficiencia agronómica, conductancia estomática,

clorofilas, fluorescencia de la clorofila y contenido foliar de nutrientes en árboles de café variedad Castillo el Tambo. El presente estudio también sugiere que el uso de BC fabricado con pulpa de café, especialmente a una dosis de 8 t ha<sup>-1</sup>, puede ser una opción complementaria en el manejo de la nutrición mineral de cultivos comerciales de café que ayudaría a mitigar el uso de fertilizantes químicos en un mediano plazo a través del aprovechamiento de residuos producidos dentro de la misma cadena productiva. Finalmente, el análisis de componentes principales biplot fue una herramienta que permitió identificar rasgos fisiológicos (rendimiento, conductancia estomática, pigmentos fotosintéticos, fluorescencia de la clorofila) y contenido foliar de nutrientes que ayudaron a comprender el desempeño agronómico de árboles de café en respuesta a las aplicaciones de diferentes dosis de BC y niveles de fertilización química.

## 4.5 Bibliografía

- Abbas, T., M. Rizwan, S. Ali, M. Zia-ur-Rehman, M.F. Qayyum, F. Abbas y Y.S. Ok. 2017. Effect of biochar on cadmium bioavailability and uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in a soil with aged contamination. *Ecotoxicology and environmental safety*, 140, 37-47.
- Abbas, S., M.T. Javed, Q. Ali, H.J. Chaudhary y M. Rizwan. 2021. Alteration of plant physiology by the application of biochar for remediation of organic pollutants. In *Handbook of Bioremediation* (pp. 475-492). Academic Press.
- Akhtar, S.S., M.N. Andersen y F. Liu. 2015. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress. *Agric. Water Manag.* 158, 61–68.
- Ali, A., D. Guo, P.G.S.A. Jeyasundar, Y. Li, R. Xiao, J. Du y Z. Zhang. 2019. Application of wood biochar in polluted soils stabilized the toxic metals and enhanced wheat (*Triticum aestivum*) growth and soil enzymatic activity. *Ecotoxicology and environmental safety*, 184, 109635.
- Al-Wabel, M.I., Q. Hussain, A.R. Usman, M. Ahmad, A. Abduljabbar, A.S. Sallam y Y.S. Ok. 2018. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. *Land Degradation & Development*, 29(7), 2124-2161.
- Arcila-Pulgarín, J., L. Buhr, H. Bleiholder, H. Hack, U. Meier y H. Wicke. 2002. Application of the extended BBCH scale for the description of the growth stages of coffee (*Coffea* spp.). *Annals of Applied Biology*, 141(1), 19-27.

- Baiga, R. y B.K.R. Rao. 2017. Effects of biochar, urea and their co-application on nitrogen mineralization in soil and growth of Chinese cabbage. *Soil Use and Management*. <https://doi.org/10.1111/sum.12328>
- Baker, N.R. 2008. Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59, 89–113.
- Bommaraju, B.K. 2016. Use of biochar and compost as substrate alternatives in coffee plant production (Tesis de maestría). Università di Bologna. Italia.
- Chemura, A., B.T. Mudereri, A.W. Yalew y C. Gornott. 2021. Climate change and specialty coffee potential in Ethiopia. *Scientific reports*, 11(1), 1-13.
- Chinchilla-Soto, C., A.M. Durán-Quesada, M. Monge-Muñoz y M.V. Gutiérrez-Soto. 2021. Quantifying the annual cycle of water use efficiency, energy and CO<sub>2</sub> fluxes using micrometeorological and physiological techniques for a coffee field in Costa Rica. *Forests*, 12(7), 889.
- Das, S.K., G.K. Ghosh y R. Avasthe. 2020. Valorizing biomass to engineered biochar and its impact on soil, plant, water, and microbial dynamics: a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-17.
- da Silveira, J.S., C. Mertz, G. Morel, S. Lacour, M.P. Belleville, N. Durand y M. Dornier. 2020. Alcoholic fermentation as a potential tool for coffee pulp detoxification and reuse: Analysis of phenolic composition and caffeine content by HPLC-DAD-MS/MS. *Food chemistry*, 319, 126600.
- Del Buono, D. 2020. Can biostimulants be used to mitigate the effect of anthropogenic climate change on agriculture? It is time to respond. *Science of The Total Environment*, 141763.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo 2016. InfoStatversion 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- El-Mageed, A., A. Taia, E.E. Belal, M.O. Rady, A. El-Mageed, A. Shima y W.M. Semida. 2021. Acidified biochar as a soil amendment to drought stressed (*Vicia faba* L.) plants: Influences on growth and productivity, nutrient status, and water use efficiency. *Agronomy*, 11(7), 1290.
- Fajardo, I. y J. Sanz. 2013. La calidad física y el rendimiento del café en los procesos de beneficio tradicional y beneficio ecológico: Becolsub.

- Farhangi-Abriz, S., S. Torabian, R. Qin, C. Noulas, Y. Lu y S. Gao. 2021. Biochar effects on yield of cereal and legume crops using meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 775, 145869.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2021. Estadísticas cafeteras. Revisado en julio de 2021. En: <https://federaciondefcafeteros.org/wp/123estadísticas-cafeteras/>.
- Fernández-Calleja, M., A. Monteagudo, A.M. Casas, C. Boutin, P.A. Pin, F. Morales y E. Igartua. 2020. Rapid on-site phenotyping via field fluorimeter detects differences in photosynthetic performance in a hybrid—parent barley germplasm set. *Sensors*, 20(5), 1486.
- Fofack, A.D. y E.A. Derick. 2020. Evaluating the bidirectional nexus between climate change and agriculture from a global perspective. *World*, 6, 100.
- Gao, Y., G. Shao, J. Lu, K. Zhang, S. Wu y Z. Wang. 2020. Effects of biochar application on crop water use efficiency depend on experimental conditions: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 249, 107763.
- Gebre, T., S. Singh y I. Zewide. 2021. Potato yield enhancement by combined use of NPS blended fertilizer and coffee husk biochar and its economic analysis. *Tropical Agriculture*, 97(4).
- Graber, E.R., Y.M. Harel, M. Kolton, E. Cytryn, A. Silber, D.R. David y Y. Elad. 2010. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant Soil* 337 (1-2), 481–496.
- Guo, X., Q. Ji, M. Rizwan, H. Li, D. Li y G. Chen. 2020. Effects of biochar and foliar application of selenium on the uptake and subcellular distribution of chromium in *Ipomoea aquatica* in chromium-polluted soils. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 206, 111184.
- Guo, L., M.L. Bornø, W. Niu y F. Liu. 2021. Biochar amendment improves shoot biomass of tomato seedlings and sustains water relations and leaf gas exchange rates under different irrigation and nitrogen regimes. *Agricultural Water Management*, 245, 106580.
- Hussien-Ibrahim, M.E., A.Y. Adam-Ali, G. Zhou, A.M. Ibrahim-Elsiddig, G. Zhu, N.E. Ahmed-Nimir y I. Ahmad. 2020. Biochar application affects forage sorghum under salinity stress. *Chilean journal of agricultural research*, 80(3), 317-325.
- Kammann, C.I., S. Linsel, J.W. Gößling y H.W. Koyro. 2011. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil–plant relations. *Plant and soil*, 345(1), 195-210.

- Krall, J.P. y G.E. Edwards. 1992. Relationship between photosystem II activity and CO<sub>2</sub> fixation in leaves. *Physiol. Plant.* 86, 180–187.
- Lehmann, J. y S. Joseph. 2009. Introduction. *Biochar for Environmental Management*, 450.
- Liao, X., Y. Niu, D. Liu, Z. Chen, T. He, J. Luo y W. Ding. 2020. Four-year continuous residual effects of biochar application to a sandy loam soil on crop yield and N<sub>2</sub>O and NO emissions under maize-wheat rotation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 302, 107109.
- Lu, Z., T. Ren, J. Li, W. Hu, J. Zhang, J. Yan y J. Lu. 2020. Nutrition-mediated cell and tissue-level anatomy triggers the covariation of leaf photosynthesis and leaf mass per area. *Journal of Experimental Botany*, 71(20), 6524-6537.
- Lyu, S., G. Du, Z. Liu, L. Zhao y D. Lyu. 2016. Effects of biochar on photosystem function and activities of protective enzymes in *Pyrus ussuriensis* Maxim. under drought stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(9), 1-10.
- Mete, F.Z., S. Mia, F.A. Dijkstra, M. Abuyusuf y A.S.M.I. Hossain. 2015. Synergistic effects of biochar and NPK fertilizer on soybean yield in an alkaline soil. *Pedosphere*, 25, 713–719. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)30052-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)30052-7)
- Murthy, P.S. y M.M. Naidu. 2012. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and recycling*, 66, 45-58.
- Partey, S.T., K. Saito, R.F. Preziosi y G.D. Robson. 2016. Biochar use in a legume–rice rotation system: Effects on soil fertility and crop performance. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62, 199–215. <https://doi.org/10.1080/03650340.2015.1040399>
- Prasad, M., N. Tzortzakis y N. McDaniel. 2018. Chemical characterization of biochar and assessment of the nutrient dynamics by means of preliminary plant growth tests. *Journal of environmental management*, 216, 89-95.
- Puerta-Quintero, G.I. 2000. Calidad en taza de algunas mezclas de variedades de café de la especie *Coffea arabica* L. *Cenicafé*, 51(1): 5-19.
- Reichembach, L.H. y C.L. de Oliveira-Petkowicz. 2020. Extraction and characterization of a pectin from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp with gelling properties. *Carbohydrate Polymers*, 116473.
- Restrepo-Díaz, H., M. Benlloch, Navarro, C. y R. Fernández-Escobar. 2008. Potassium fertilization of rainfed olive orchards. *Scientia Horticulturae*, 116(4), 399–403.

- Reyes-Moreno, G., M.E. Fernández y E.D. Contreras. 2021. Balanced mixture of biochar and synthetic fertilizer increases seedling quality of *Acacia mangium*. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*.
- Rodrigues, W.P., J.R. Silva, L.S. Ferreira, J.A. Machado-Filho, F.A. Figueiredo, T.M. Ferraz, y J.C. Ramalho. 2018. Stomatal and photochemical limitations of photosynthesis in coffee (*Coffea* spp.) plants subjected to elevated temperatures. *Crop and Pasture Science*, 69(3), 317-325.
- Ronga, D., F. Caradonia, M. Parisi, G. Bezzi, B. Parisi, G. Allesina y E. Francia. 2020. Using digestate and biochar as fertilizers to improve processing tomato production sustainability. *Agronomy*, 10(1), 138.
- Salamanca-Jimenez, A. 2017. Coffee crop fertilization in Colombia: A Mini-. *International Potash Institute*, 50, 22–30.
- Sánchez-Reinoso, A.D., E.A. Ávila-Pedraza y H. Restrepo-Díaz. 2020. Use of biochar in agriculture. *Acta Biológica Colombiana*, 25(2), 327-338.
- Sadaf, J., G.A. Shah, K. Shahzad, N. Ali, M. Shahid y S. Ali. 2017. Improvements in wheat productivity and soil quality can accomplish by coapplication of biochars and chemical fertilizers. *Sci. Total Environ.* 607–608, 715–724. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.06.178
- Sadeghian, S. 2013. Nutrición de cafetales. En: *Manual del Cafetero Colombiano, Investigación y Tecnología para la Sostenibilidad de la Caficultura- Postcosecha y subproductos del café*. Gast, F., Benavides, P., Sanz, J. R., Herrera, J. C., Ramírez, V. H., Cristancho, M. A., & Marín, S. M. Federación Nacional de Cafeteros, Cenicafé. 354 pp.
- Sanz-Uribe, J.R., C.E. Oliveros-Tascón, C.A. Ramírez-Gómez, A.E. Peñuela-Martínez y P.J. Ramos-Giraldo. 2013. Proceso de Beneficio. En: *Manual del Cafetero Colombiano, Investigación y Tecnología para la Sostenibilidad de la Caficultura – Nutrición de Cafetales*. Gast, F., Benavides, P., Sanz, J. R., Herrera, J. C., Ramírez, V. H., Cristancho, M. A., & Marín, S. M. Federación Nacional de Cafeteros, Cenicafé. 327 pp.
- Sorrenti, G., E. Muzzi y M. Toselli. 2019. Root growth dynamic and plant performance of nectarine trees amended with biochar and compost. *Scientia Horticulturae*, 257, 108710.
- Tang, J.W., S.D. Zhang, X.T. Zhang, J.H. Chen, X.Y. He y Q.Z. Zhang. 2020. Effects of pyrolysis temperature on soil-plant-microbe responses to *Solidago canadensis* L.-

- derived biochar in coastal salinealkali soil. *Sci. Total Environ.* 731:138938. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138938
- Tanure, M.M. J.M.R. C., L.M. da Costa, H.A. Huiz, R.B.A. Fernandes, P.R. Cecon, J.D.P. Junior and da Luz. 2019. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil Till. Res.*, 192, 164-173.
- Vaccari, F., A. Maienza, F. Miglietta, S. Baronti, S. Di Lonardo, L. Giagnoni y L. Genesisio. 2015. Biochar stimulates plant growth but not fruit yield of processing tomato in a fertile soil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 207, 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.04.015>
- Vassilev, N., E. Martos, G. Mendes, V. Martos y M. Vassileva. 2013. Biochar of animal origin: a sustainable solution to the global problem of high-grade rock phosphate scarcity. *J. Sci. Food Agric.* 93, 1799–1804.
- Wang, D., P. Jiang, H. Zhang y W. Yuan. 2020. Biochar production and applications in agro and forestry systems: a review. *Sci. Total Environ.* 723, 137775.
- Wang, S., J. Zheng, Y. Wang, Q. Yang, T. Chen, Y. Chen y T. Wang. 2021. Photosynthesis, chlorophyll fluorescence, and yield of peanut in response to biochar application. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1000.
- Xu, X., P. He, M.F. Pampolino, A.M. Johnston, S. Qiu, S. Zhao y W. Zhou. 2014. Fertilizer recommendation for maize in China based on yield response and agronomic efficiency. *Field Crops Research*, 157, 27-34.
- Ye, L., M. Camps-Arbestain, Q. Shen, J. Lehmann, B. Singh y M. Sabir. 2019. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use and Management*, 36(1), 2-18.
- Zabini, A.V., H.E.P. Martinez, J.C.L. Neves, C.D. Cruz y S.V. Valadares. 2021. Chemical analyses of flowers and leaves for nutritional diagnoses of coffee trees. *Ciência Rural*, 51.
- Zeeshan, M., W. Ahmad, F. Hussain, W. Ahamd, M. Numan, M. Shah and I. Ahmad. 2020. Phytostabalization of the heavy metals in the soil with biochar applications, the impact on chlorophyll, carotene, soil fertility and tomato crop yield. *J. Clean. Prod.*, 255, 120318.
- Zhang, Q., Y. Song, Z. Wu, X. Yan, A. Gunina, Y. Kuzyakov y Z. Xiong. 2020. Effects of six-year biochar amendment on soil aggregation, crop growth, and nitrogen and

phosphorus use efficiencies in a rice-wheat rotation. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118435.

Zheng, W., B. Luo y X. Hu. 2020. The determinants of farmers' fertilizers and pesticides use behavior in China: An explanation based on label effect. *Journal of Cleaner Production*, 272, 123054.

Zhu, L., H. Yang, Y. Zhao, K. Kang, Y. Liu, P. He y Z. Wei. 2019. Biochar combined with montmorillonite amendments increase bioavailable organic nitrogen and reduce nitrogen loss during composting. *Bioresour. Technol.* 294, 122224.



# Capítulo 5 La aplicación de biocarbón de pulpa de café mejora características físicas, químicas y biológicas de un suelo cafetero

## Resumen.

El biocarbón (BC) puede ser una alternativa para los caficultores porque permitiría mejorar características del suelo. Un experimento en condiciones de campo por dos años (2019 y 2020) fue desarrollado para determinar la respuesta a la aplicación de BC (obtenido de pulpa de café) (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y fertilización química (FQ) (0, 33, 66 y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre densidad aparente ( $\rho_a$ ), agregados estables, disponibilidad de nutrientes y respiración en un suelo cafetero. Dosis de 8 o 16 t ha<sup>-1</sup> BC redujeron la  $\rho_a$  (0,82 y 0,83 g cm<sup>-3</sup>, respectivamente) e incrementó el estado de agregación (96,5% y 96,84%, respectivamente) en 2020. La aplicación de 16 t ha<sup>-1</sup> BC disminuyó la acidez intercambiable (AI) (0,18 y 0,22 meq/100g); mientras que el pH (4,96 y 4,92) y carbono orgánico (CO) (4,41 y 4,59%) fueron más altos con respecto a 0 t ha<sup>-1</sup> (AI: 0,58 y 0,54 meq/100g; pH: 4,63 y 4,55; CO: 4,17 y 4,32%) en 2019 y 2020, respectivamente. La respiración aumentó con el 66% FQ y 8 t ha<sup>-1</sup> BC (187,6  $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1}$  suelo seco día<sup>-1</sup> en 2019) o 16 t ha<sup>-1</sup> BC (146,4  $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1}$  suelo seco día<sup>-1</sup> en el 2020) en comparación a 0 t ha<sup>-1</sup> BC y 0% FQ (93,3 y 86,2  $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1}$  suelo seco día<sup>-1</sup> en 2019 y 2020, respectivamente). En resumen, dosis entre 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC de pulpa de café pueden mejorar la calidad de los suelos cafeteros y proporcionan una opción complementaria que permitiría reducir los niveles de fertilización química.

**Palabras clave:** disponibilidad de nutrientes, acidez intercambiable, retención de agua en el suelo, agregados estables del suelo, respiración microbiana del suelo.

## Abstract

Biochar (BC) can be an alternative for coffee growers because it would improve soil characteristics. An experiment under field conditions for two years (2019 and 2020) was developed to determine the response to the application of BC (obtained from coffee pulp) (0, 4, 8 and 16 t ha<sup>-1</sup>) and chemical fertilization (CF) (0, 33, 66 and 100% of the nutritional requirements) on bulk density ( $\rho_a$ ), stable aggregates, nutrients availability and respiration in a coffee soil. Doses of 8 or 16 t ha<sup>-1</sup> BC reduced  $\rho_a$  (0.82 and 0.83 g cm<sup>-3</sup>, respectively) and increased the state of aggregation (96.5% and 96.84%, respectively) in 2020. The application of 16 t ha<sup>-1</sup> BC decreased the exchangeable acidity (AI) (0.18 and 0.22 meq / 100g); while the pH (4.96 and 4.92) and organic carbon (CO) (4.41 and 4.59%) were higher with respect to 0 t ha<sup>-1</sup> (AI: 0.58 and 0.54 meq / 100g; pH: 4.63 and 4.55; CO: 4.17 and 4.32%) in 2019 and 2020, respectively. Respiration increased with 66% CF and 8 t ha<sup>-1</sup> BC (187.6  $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil day}^{-1}$  in 2019) or 16 t ha<sup>-1</sup> BC (146.4  $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil day}^{-1}$  in 2020) compared to 0 t ha<sup>-1</sup> BC and 0% CF (93.3 and 86.2  $\mu\text{g CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ dry soil day}^{-1}$  in 2019 and 2020, respectively). In summary, doses between 8 and 16 t ha<sup>-1</sup> BC of coffee pulp can improve the quality of coffee growing soils and provide a complementary option that would reduce the levels of chemical fertilization.

**Keywords:** nutrient availability, soil water retention, soil restoration, stable soil aggregates.

## 5.1 Introducción

El café es el segundo producto comercial internacional más importante y la bebida suave más popular del mundo (Wariyo *et al.*, 2021). Cerca del 70% del café consumido pertenece a la especie *Coffea arabica* L. y su producción global estimada es cercana a los 170.560.000 de sacos de 60-kg (Asegid, 2020; Lemma y Megersa, 2021). El cultivo de café puede ser responsable de la generación de subproductos como la pulpa fresca, obteniendo cerca de 500 kg de pulpa por cada 1000 kg de granos de café cereza procesados (Reichembach y de Oliveira-Petkowicz, 2020). Estos residuos son ricos en celulosa, proteínas, minerales, polifenoles, taninos y cafeína, los cuales pueden causar contaminación al ambiente (Elida *et al.*, 2020). Asimismo, la pulpa de café requiere un cierto tipo de manejo (compostaje) para que tenga una mejor degradación biológica (Kufa *et al.*, 2008).

La utilización residuos biológicos para la producción de biocarbón (BC) puede desempeñar un rol ambiental y económico importante en la agricultura (Owsianiak *et al.*, 2021). El BC

es fabricado por la descomposición termoquímica de la biomasa en condiciones de suministro limitado de oxígeno (pirólisis) y su uso es una alternativa para mejorar las condiciones físicas y químicas del suelo (Coomes y Miltner, 2016). Se ha reportado que su aplicación ha ayudado en la alcalinización de los suelos por incremento del pH (Sorrenti *et al.*, 2016), incrementa la capacidad de intercambio catiónico, el carbono total y la retención de agua (Chan *et al.*, 2008; Kuzyakov, 2009; Van Zwieten *et al.*, 2010) y reduce la acidez intercambiable y densidad aparente (Ch'ng *et al.*, 2015; Al-Wabel *et al.*, 2018). En el caso de la pulpa de café, la transformación mediante el proceso de pirólisis podría ser una alternativa para su manejo debido a su potencial de uso como enmienda del suelo, trayendo numerosos beneficios en la nutrición del cultivo. La aplicación de BC también puede ser una alternativa asequible para los agricultores para mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Yazhini *et al.*, 2020). Se ha reportado que la disponibilidad de nutrientes mejora con la aplicación de BC, encontrándose aumentos alrededor del 48% del carbono orgánico y del 22,6 % del fósforo disponible en el suelo a una dosis de 20 t ha<sup>-1</sup> BC de paja de trigo. También, incrementos del 2,41% del nitrógeno, 38,8% del fósforo y 88% del potasio se han registrados en suelos tratados a una dosis de 22 t ha<sup>-1</sup> BC de cáscaras de maní (Gaskin *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2016).

El uso de BC también ayuda a ciertas propiedades físicas del suelo. Por ejemplo, aplicaciones de 7,18 t ha<sup>-1</sup> de BC de residuos de maíz fabricado aumentaron los valores de la estabilidad de agregados (diámetro medio ponderado DMP), mostrando los registros más altos cuando la temperatura de pirólisis fue mayor (BC a 350°C = 2,88 y BC a 550°C = 3,10, respectivamente) con respecto a suelos tratados con 0 t ha<sup>-1</sup> BC (DMP = 2,78) (Herath *et al.*, 2013). En adición, se ha encontrado que aplicaciones de BC fabricado con residuos de cultivos de maíz a una tasa del 10% (p/p del suelo) incrementaron la retención de agua (0,43) y redujeron la densidad aparente ( $\rho_a = 1,01 \text{ g cm}^{-3}$ ) en comparación con suelos no tratados con BC (retención de agua = 0,30 y  $\rho_a = 1,26 \text{ g cm}^{-3}$ , respectivamente) (Igalavithana *et al.*, 2017).

El aprovechamiento de los subproductos agrícolas como la pulpa del café puede ser una estrategia agronómica interesante para mejorar la sostenibilidad y fertilidad de los suelos en los sistemas productivos de café. Se ha reportado que la aplicación de BC (obtenido de residuos de pastos y *Eupatorium* sp) en suelos cafeteros incrementaron el pH y la materia orgánica del suelo, lo cual mejoró la fertilidad del suelo y el ciclo de nutrientes (Gautam et

al., 2017). En este sentido, el presente estudio estuvo orientado en estudiar el aprovechamiento de subproductos del café (pulpa) como materia prima para la obtención de biocarbón y posterior análisis de los efectos de su aplicación sobre ciertas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Por consiguiente, el objetivo de esta investigación fue determinar las variaciones sobre retención de agua, densidad aparente, agregados estables, disponibilidad de nutrientes y respiración en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización (0, 33, 66 y 100% de los requerimientos nutricionales) a un suelo con un cultivo de café (*Coffea arabica* L.).

## 5.2 Materiales y métodos

### 5.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento

El experimento se desarrolló en la finca Luxemburgo, municipio de Chaparral en el departamento del Tolima (Lat. 3°49'39.2" N, Long. 75°34'07,1" O, altitud: 1875 msnm), entre agosto de 2018 y agosto de 2020. La **Figura 19** resumen las condiciones meteorológicas (radiación, temperatura y precipitación) durante la investigación. El experimento se llevó a cabo en árboles de café (*Coffea arabica* L.) de tres años de edad del cultivar Castillo el Tambo. Los árboles estaban espaciados a 1.70 m × 1.30 m (4500 árboles/ha). El suelo fue clasificado como un Typic Hapludand y presentó las siguientes características: i) una textura Franco (46% de Arcilla, 30% de limo y 46% arena); ii) pH de 5.50; iii) Conductividad Eléctrica 0.17 dS/m; iv) Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) 11.51 meq/100g. Finalmente, el suelo estudiaba presentaba la siguiente concentración de nutrientes: Nitrógeno total: 0.27%, P: 0.98 mg kg<sup>-1</sup>, K: 0.50%, Ca: 7.85%, Mg: 2.52%, Cu: 1.40 mg kg<sup>-1</sup>, Fe: 124 mg kg<sup>-1</sup>, Mn: 65 mg kg<sup>-1</sup>, Na: 0.15 meq 100 g<sup>-1</sup>, B: 0.07 mg kg<sup>-1</sup> y Zn: 2.90 mg kg<sup>-1</sup>.

### 5.2.2 Tratamientos de biocarbón y niveles de fertilización

Las aplicaciones de BC se realizaron cuatro meses después de la última cosecha del cultivo de café (agosto del 2018) usando cuatro diferentes dosis de BC. Los tratamientos de biocarbón (BC) fueron de 0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> (BC0 = 0,0 kg/árbol; BC4 = 0,75 kg/árbol; BC8 = 1,50 kg/árbol y BC16 = 3,00 kg/árbol). Las dosis fueron determinadas con base a las respuestas fisiológicas observadas en otros cultivos (Sánchez-Reinoso *et al.*, 2020). El BC fue incorporado a una distancia de 30 cm desde la base del tallo del árbol de café y posteriormente fue cubierto con una capa de suelo. El BC fue fabricado a partir de pulpa de café, la cual fue sometida a una pirolización intermedia de 500 °C durante 20 minutos en un horno rotatorio (6 m de largo x 0,7 m de diámetro interno) (Tecsol, Bogotá, Colombia). Las características del BC obtenido fueron las siguientes: pH: 9.42; conductividad eléctrica 19,4; dS / m; CIC: 103 meq / 100g; cenizas 20,8%; carbono orgánico (CO): 46,4%; CO/N: 16,5; N: 2,81%; P: 1,11%; K: 4,37%; Ca: 0,97%; Mg: 0,43%; Cu: 53,5 mg kg<sup>-1</sup>; Fe: 2.795 mg kg<sup>-1</sup>; B: 99,3 mg kg<sup>-1</sup>; Zn: 110 mg kg<sup>-1</sup>.

Los tratamientos de niveles de fertilización química se realizaron de forma fraccionada (dos aplicaciones por año de evaluación) acorde a las recomendaciones de Sadeghian (2013). La fertilización se desarrolló usando un fertilizante simple 46N (Urea, Yara, Colombia) y un fertilizante compuesto 17N–6P–18K–2Mg (Nutrimon–Café Producción, Monómeros S.A., Colombia). Los niveles de fertilización fueron los siguientes: a) 0% (0 kg ha<sup>-1</sup>N, 0 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 0 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0 Zn kg ha<sup>-1</sup>); b) 33% (38 kg ha<sup>-1</sup>N, 8 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 24 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 3 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0,3 Zn kg ha<sup>-1</sup>); c) 66% (75 kg ha<sup>-1</sup>N, 16 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 48 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 5 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0,5 Zn kg ha<sup>-1</sup>); y d) 100% (114 kg ha<sup>-1</sup>N, 24 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 73 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 8 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0,8 Zn kg ha<sup>-1</sup>) de los requerimientos nutricionales. Los anteriores tratamientos de fertilización fueron proporcionados con los siguientes fertilizantes comerciales: F0 = 0 g/árbol de 17-6-18-2 y 0 g/árbol de UREA; F33 = 30 g/árbol de 17N-6P-18K-2Mg y 7 g/árbol de UREA; F66 = 60 g/árbol de 17N-6P-18K-2Mg y 14 g/árbol de UREA; y F100 = 90 g/árbol de 17N-6P-18K-2Mg y 22 g/árbol de UREA). Las dosis fueron determinadas con base al análisis físico y químico del suelo y según los requerimientos nutricionales reportados por Salamanca-Jimenez (2017). La frecuencia de aplicación de fertilizantes fue cada seis meses (mayo y octubre por cada año de evaluación).

Finalmente, los tratamientos experimentales fueron dispuestos un diseño de parcelas divididas en bloques completamente al azar donde las parcelas principales correspondían a las dosis de BC (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y las subparcelas correspondieron a los niveles de fertilización química (FQ) (0, 33, 66 y 100% de los requerimientos nutricionales). Sin embargo, los datos de las variables registradas fueron analizados de dos formas: *i*) un diseño de bloques completamente al azar para el análisis de variables físicas del suelo porque se deseaba conocer el efecto directo de las diferentes dosis de BC (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y *ii*) el análisis de variables químicas y respiración microbiana del suelo fue desarrollado mediante un diseño en parcelas divididas. Finalmente, la unidad experimental fue conformada por cinco árboles rodeados de 12 árboles guarda y cada tratamiento fue repetido cuatro veces (cuatro bloques), usando 320 árboles en el desarrollo de todo el experimento.

### 5.2.3 Características físicas del suelo

Al final del experimento (agosto de 2020), muestras de suelo fueron recolectadas de los tratamientos de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) que no contaron con aplicación de fertilizantes (NF 0%), para la estimación de variables de física de suelos como la densidad aparente ( $\rho_a$ ), estabilidad de agregados, retención de agua en el suelo en punto de saturación y capacidad de campo.

La determinación de la  $\rho_a$  se realizó por el método del cilindro descrito por Pla (1983).

$$\rho_a = \frac{a}{V(1 + w)} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde  $\rho_a$  es la densidad aparente;  $a$  es el peso del suelo extraído del hoyo en campo;  $V$  es el volumen del cilindro metálico y  $W$  es el porcentaje de humedad obtenido de la muestra secada en estufa.

La estimación de la estabilidad de los agregados al agua se realizó por el método de tamizado en húmedo de Yoder (Yoder 1936 modificado por Pla, 1983). El porcentaje de agregados estables al agua fue determinado usando 130 g de agregados del suelo seco a temperatura ambiente entre 6 y 8mm de diámetro equivalente, al someter a movimientos ascendentes y descendentes en un agitador mecánico utilizando un juego de tamices con

apertura de malla de 6,3; 4,00; 2,00; 1,00; 0,5 y 0,25 mm. En adición, el diámetro medio ponderado de los agregados tamizados en agua (DMP) fue estimado acorde a la metodología descrita por Kemper y Rosenau (1986) modificado por Pla (1983) teniendo en cuenta la ecuación 2.

$$DMP = \sum_{i=1}^n D_i \times P_i \quad \text{Ecuación (2)}$$

La retención de agua en el suelo a punto de saturación (PS), capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) se estimó a través de la metodología de las ollas de presión. Se tomaron muestras de suelo de cada tratamiento directamente en campo mediante anillos metálicos cilíndricos (5 cm de diámetro y 2 cm de altura). Las muestras en los cilindros fueron saturadas con agua por capilaridad (PS) y luego se sometieron a tensiones de -33 kPa (CC) y -1.500 kPa (PMP). El contenido de agua a PS, CC y PMP se determinó mediante la ecuación 3:

$$CH (\%) = \left( \frac{M_{sh} - M_{ss}}{M_{ss}} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde CH es el contenido de agua;  $M_{sh}$  es la masa de suelo húmedo y  $M_{ss}$  es la masa de suelo seco a 105°C (24 horas).

Finalmente, el contenido de arcillas (Ar), limos (L) y arenas (A) fueron determinados por densimetría usando el método de Bouyoucos por dispersión con hexametáfosfato de sodio y se utilizó el triángulo clasificación textural USDA.

#### 5.2.4 Características químicas del suelo

Muestras de 1,5 kg de suelo fueron usadas para el análisis de variables químicas y contenido de nutrientes. El material fue colectado un mes antes de la cosecha (segunda semana del mes de marzo en cada respectivo año de evaluación). Una muestra compuesta de los tres árboles centrales de cada unidad experimental fue realizada, tomando suelo de los primeros 25 cm de profundidad a una distancia de 30 cm de la base del tallo del árbol de café. Las muestras de suelo fueron procesadas en el Laboratorio de Aguas y Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. El pH fue

registrado por determinación potenciométrica acorde al método de suspensión suelo:agua en relación p/v 1:1. El carbono orgánico (CO) fue realizada por determinación colorimétrica siguiendo el método de Walkley-Black y el Nitrógeno estimado (Nest) fue calculado a partir del CO empleando el factor de 0.0862.

Las bases elementales mayores totales (Ca, K, Mg y Na) fueron determinados por absorción atómica usando el método de extracción con acetato de amonio 1M en pH 7. La acidez intercambiable (AI) fue hallada por determinación volumétrica a través del método de extracción en KCl 1M. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) fue estimada por la suma de bases y acidez intercambiables. La cantidad de fósforo disponible (P) fue hallada por determinación colorimétrica con el método Bray II. Los microelementos (Cu, Fe, Mn y Zn) fueron determinados por absorción atómica a través del método de extracción con DTPA. El Boro (B) fue cuantificado por determinación colorimétrica según el método de extracción con fosfato monocálcico.

### 5.2.5 Respiración microbiana del suelo

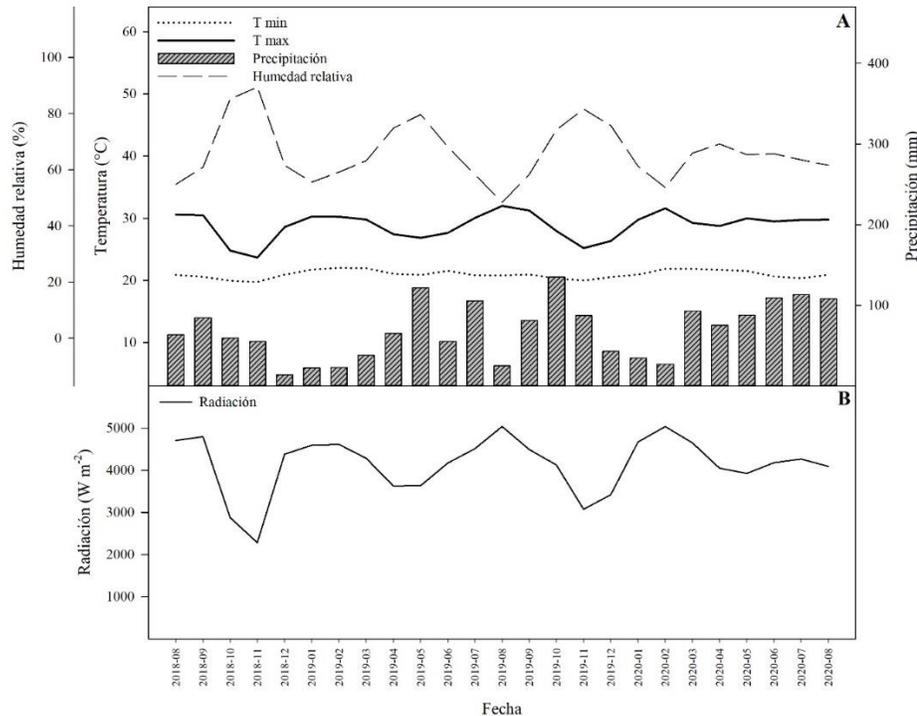
La respiración basal del suelo se cuantificó a través de la técnica de frascos cerrados modificada (Alef K y Nannipieri, 1995). Una submuestra de 100 gramos de suelo de cada unidad experimental fue llevada a través de un tamiz de 2 mm. Las muestras fueron incubadas a una temperatura de 25°C durante 24 horas en oscuridad en envases de vidrio de 2 L cerrados herméticamente. En el interior de cada envase fueron dispuestos tres béaker de la siguiente manera: *i*) un béaker con 15 ml de una solución de NaOH 0,05 M que almacenó el C respirado; *ii*) un béaker con 15 ml de agua destilada para mantener la humedad en el recipiente; y *iii*) un béaker con 30 g de muestra de suelo previamente tamizada. En adición, tres frascos fueron usados como blanco, los cuales no contaron con muestra de suelo. Después de transcurrido el tiempo de incubación se extrajo el béaker con NaOH y se detuvo la reacción agregando 3 ml de solución de BaCl<sub>2</sub> 0,5 M para precipitar el C presente. Posteriormente, tres gotas de indicador de titulación (0,5 g fenolftaleína disuelto en 50 ml de agua destilada y 50 ml de etanol) fueron agregadas y se realizó titulación con una solución de HCl 0.05 M hasta viraje del color. La tasa de respiración del suelo en mg de CO<sub>2</sub> por peso seco del suelo en el tiempo de incubación en horas (CO<sub>2</sub> (mg) / SW / t) acorde a la ecuación 4.

$$CO_2(mg) = \frac{(V_0 - V) \times 1.1}{dwt} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde SW = cantidad de suelo en peso seco; t corresponde al tiempo de incubación en horas;  $V_0$  es volumen de HCl usado para la titulación del blanco; V es el volumen de HCL usado para la titulación de la muestra de suelo; 1,1 es el factor de conversión (1 ml de NaOH 0,05 M = 1,1 mg  $CO_2$ ); dwt es el peso seco de 1 g de suelo húmedo.

### 5.2.6 Análisis de los datos

Dos separados análisis de datos se desarrollaron para cuantificar el efecto de BC sobre las diferentes propiedades del suelo estudiadas. Un diseño con bloques al azar con cuatro tratamientos de dosis de BC (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) se utilizó para el análisis de las variables de física de suelos. Por otro lado, se estableció un análisis mediante diseño en parcelas divididas (niveles de BC vs Niveles FQ) en bloques al azar para las variables químicas y respiración microbiana del suelo. Los resultados con valores expresados en porcentaje fueron transformaron en arcoseno y posteriormente se realizó un análisis de varianza. Cuando se obtuvieron diferencias significativas, se aplicó la prueba comparativa de medias de Tukey a  $P \leq 0.05$ . También, un análisis de contrastes polinómicos fue realizado para identificar tendencias en los niveles de BC y FQ. El análisis de los datos fue hecho usando el programa Statistix v 9.0 (software analítico, Tallahassee, FL, US). Adicionalmente, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) con la ayuda del programa InfoStat 2016 (Di Rienzo *et al.*, 2016).



**Figura 19.** Registros de humedad relativa, precipitación, temperatura máxima y mínima (A) y radiación solar (B) en el experimento de Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización química (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) ubicado en la vereda Aguabonita, Corregimiento de las Herosas, Chaparral Tolima. Los datos se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana [Chaparral (latitud 3° 37' 35,193" N, longitud 75° 32' 35,483" O, altitud: 914 m.s.n.m.)] de Meteoblue weather.

## 5.3 Resultados

### 5.3.1 Efecto de cuatro dosis de BC (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) sobre las características físicas del suelo

La **Tabla 11** resume los efectos de las diferentes dosis de aplicación de biocarbón (BC) sobre las características físicas del suelo al final del experimento (año 2020). En general, una tendencia lineal positiva fue evidenciada con respecto a la adición progresiva de BC donde un aumento de las dosis de BC causó un incremento sobre DMP, estado de agregación, PS y CC. Mientras, una tendencia lineal negativa fue registrada en general sobre AE,  $\rho_a$  y MP donde estas variables disminuyeron a una mayor dosis de BC. Finalmente, diferencias significativas no fueron encontradas sobre el contenido de arcillas (Ar), limos (L) y arenas (A). En general, el suelo evaluado mostró una textura franca (F), acorde al triángulo clasificación textural USDA.

### 5.3.2 Características químicas del suelo

Diferencias fueron encontradas solamente entre los tratamientos de BC o NF sobre las características químicas del suelo (**Tabla 12** y **Tabla 13**). Con respecto a la dosis de BC, tres grupos de variables del contenido de nutrientes no evidenciaron diferencias significativas: *i*) el Ca, K, Na, P, y Cu en los dos años de evaluación (2019 y 2020); *ii*) el Mg y CICE en el 2019; y *iii*) el CO, Nest, Fe y Mn durante el 2020. Por otro lado, una tendencia lineal positiva fue también observada cuando incrementó la tasa de aplicación de BC en los dos años de evaluación, especialmente, en los suelos con 16 t ha<sup>-1</sup> BC en variables como el pH (4,96 y 4,92), CO (4,41 y 4,59), N<sub>est</sub> (0,38% y 0,39%), Zn (2,33 y 3,21 mg kg<sup>-1</sup>) y B (0,48 y 0,38 mg kg<sup>-1</sup>), respectivamente. Mientras, una tendencia lineal negativa fue observada con el incremento la tasa de aplicación de BC en la Al (0 t ha<sup>-1</sup> BC = 0,58 y 0,54 meq/100g vs 16 t ha<sup>-1</sup> BC = 0,18 y 0,22 meq/100g, en la evaluación del año 2019 y 2020, respectivamente). Por otro lado, una tendencia cuadrática fue observada sobre el contenido de Mg (2,41 meq/100 g) para el año 2020 (**Tabla 12**) y contenido de Fe (169.19 mg kg<sup>-1</sup>) y Mn (45.63 mg kg<sup>-1</sup>) en el año 2019 (**Tabla 13**), observándose los valores más altos, en general, con aplicaciones a 8 t ha<sup>-1</sup> BC. Finalmente, una tendencia cúbica fue registrada en la CICE del año 2020, alcanzando los registros más altos en suelos con aplicación de 16 t ha<sup>-1</sup> BC (11,08 meq/100 g).

En cuanto a los efectos de los niveles de fertilización, el Fe no evidenció diferencias significativas con la aplicación gradual de fertilizantes en el 2020. Sin embargo, una tendencia lineal positiva fue observada con el incremento progresivo de fertilizantes en todas las variables químicas estudiadas en los dos años de evaluación (2019 y 2020). Sin embargo, el CO en el año 2019 presentó una tendencia cuadrática y el Mg del año 2020 obtuvo tendencias lineal y cuadrática (**Tabla 12**). En resumen, la aplicación de fertilizantes generó un incremento en los valores de las diferentes características químicas en los dos años de evaluación, especialmente cuando el nivel de fertilización fue del 100 % de los requerimientos nutricionales (pH: 4,88 y 4,84; CO: 4,27% y 4,52%; N<sub>est</sub>: 0,38% y 0,39%; Ca: 6,57 y 6,73 meq/100 g; Mg: 3,49 y 2,70 meq/100 g; K: 1,79 y 1,63 meq/100 g; Na: 0,03 y 0,03 meq/100 g; Al: 0,44 y 0,39 meq/100 g; CICE: 11,50 y 10,97 meq/100 g; P: 9,89 y 9,40 mg kg<sup>-1</sup>; Cu: 1,01 y 1,06 mg kg<sup>-1</sup>; Fe: 164,23 y 217,56 mg kg<sup>-1</sup>; Mn: 42,90 y 58,32 mg kg<sup>-1</sup>; Zn: 2,46 y 3,02 mg kg<sup>-1</sup>; B: 0,47 y 0,43 mg kg<sup>-1</sup> en el 2019 y 2020, respectivamente).



**Tabla 11.** Análisis de contrastes polinómicos de variables de física de suelos en el cultivo de café en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) para el periodo de evaluación del año 2020

Tratamiento	DMP	Estado de Agregación (%)	AE 4 mm (%)	AE 2 mm (%)	AE 1 mm (%)	AE 0.5 mm (%)	AE 0.25 mm (%)
Biocarbón (BC)							
0 t ha <sup>-1</sup>	4,62 <sup>1</sup>	95,70	90,56	2,74	1,32	1,08	0,55
4 t ha <sup>-1</sup>	4,64	95,87	90,62	1,41	0,53	0,41	0,41
8 t ha <sup>-1</sup>	4,78	96,50	94,09	1,17	0,47	0,38	0,18
16 t ha <sup>-1</sup>	4,75	96,84	93,43	2,14	0,53	0,56	0,23
Significancia	L**	L*	L**	Q**	L*	L*, Q*	L*
CV	1,30	0,66	1,69	28,34	56,99	43,34	43,83

Tratamiento	$\rho_a$ (g cm <sup>-3</sup> )	PS (%)	CC (%)	MP (%)	Ar (g kg <sup>-1</sup> )	L (g kg <sup>-1</sup> )	A (g kg <sup>-1</sup> )	Textura
Biocarbón (BC)								
0 t ha <sup>-1</sup>	0,90	91,64	52,81	47,88	200,00	210,00	590,00	F
4 t ha <sup>-1</sup>	0,89	96,99	53,30	48,76	185,00	165,00	650,00	FA
8 t ha <sup>-1</sup>	0,82	107,11	55,72	50,26	205,00	205,00	590,00	F
16 t ha <sup>-1</sup>	0,83	116,54	56,02	47,22	220,00	215,00	565,00	F
Significancia	L**	L***	L***	L*	NS	NS	NS	-
CV <sup>x</sup>	3,75	2,14	1,03	4,44	13,67	21,10	10,06	-

DMP = Diámetro medio ponderado, AE = Agregados estables, PS = Punto de saturación, CC = Capacidad de campo, MP = Marchitez permanente, Ar = arcillas, L = limos, A = arenas, F = Franco, FA = Franco arenoso. <sup>1</sup>Los datos representan el promedio de 4 muestras por tratamiento (n = 4). \*, \*\* y \*\*\* difieren significativamente en 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente L = lineal, Q = cuadrática; C cúbica acorde al análisis de contrastes polinómicos. <sup>x</sup> Coeficiente de variación

**Tabla 12.** Análisis de contrastes polinómicos del pH, el contenido de carbono orgánico (CO), nitrógeno estimado (N<sub>est</sub>), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), sodio (Na) y acidez intercambiable (AI) en el suelo del cultivo de café en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) durante dos años de experimentación (2019 y 2020).

Tratamiento	pH		CO (%)		N <sub>est</sub> (%)		Ca (meq/100 g)		Mg (meq/100 g)		K (meq/100 g)		Na (meq/100 g)		AI (meq/100 g)	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Biocarbón (BC)																
0 t ha <sup>-1</sup>	4,63 <sup>1</sup>	4,55	4,17	4,32	0,35	0,35	5,05	6,01	2,73	2,39	0,85	1,05	0,03	0,02	0,58	0,54
4 t ha <sup>-1</sup>	4,73	4,73	3,98	4,07	0,35	0,37	5,63	6,63	2,78	2,56	1,73	1,51	0,03	0,03	0,27	0,23
8 t ha <sup>-1</sup>	4,87	4,78	4,04	4,30	0,36	0,37	5,19	6,09	2,73	2,51	1,60	1,29	0,03	0,03	0,37	0,30
16 t ha <sup>-1</sup>	4,96	4,92	4,41	4,59	0,38	0,39	6,10	6,72	2,80	2,41	1,74	1,66	0,03	0,04	0,18	0,22
Significancia	L <sup>***</sup>	L <sup>**</sup>	*	NS	*	NS	NS	NS	NS	Q <sup>**</sup>	NS	NS	NS	NS	L <sup>**</sup> , Q <sup>*</sup>	L <sup>*</sup>
Nivel de fertilización (NF)																
0%	4,71	4,63	3,93	4,08	0,34	0,35	4,89	6,07	2,34	2,36	1,15	1,08	0,02	0,02	0,30	0,28
33%	4,76	4,71	4,13	4,22	0,35	0,36	5,13	6,22	2,50	2,39	1,43	1,32	0,03	0,02	0,35	0,30
66%	4,83	4,81	4,26	4,46	0,37	0,38	5,39	6,43	2,71	2,42	1,54	1,49	0,03	0,03	0,32	0,31
100%	4,88	4,84	4,27	4,52	0,38	0,39	6,57	6,73	3,49	2,70	1,79	1,63	0,03	0,03	0,44	0,39
Significancia	L <sup>***</sup>	L <sup>***</sup>	Q <sup>**</sup>	L <sup>**</sup>	L <sup>***</sup>	L <sup>**</sup>	L <sup>***</sup>	L <sup>***</sup>	L <sup>*</sup>	L <sup>***</sup> , Q <sup>**</sup>	L <sup>*</sup>	L <sup>***</sup>	L <sup>**</sup>	L <sup>*</sup>	L <sup>*</sup>	L <sup>*</sup>
Interacción																
Significancia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	***	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CV (%) <sup>x</sup>	2,63	3,19	9,60	11,04	11,14	11,91	22,23	17,70	44,83	6,76	60,07	25,90	37,11	86,13	47,97	45,12

<sup>1</sup>Los datos representan el promedio de 4 muestras por tratamiento (n = 4). \*, \*\* y \*\*\* difieren significativamente en 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente L = lineal, Q = cuadrática; C cúbica acorde al análisis de contrastes polinómicos.

**Tabla 13.** Análisis de contrastes polinómicos de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), el contenido de fósforo (P), cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), zinc (Zn) y boro (B) en el suelo del cultivo de café en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) durante dos años de experimentación (2019 y 2020).

Tratamiento	CICE (meq/100 g)		P (mg kg <sup>-1</sup> )		Cu (mg kg <sup>-1</sup> )		Fe (mg kg <sup>-1</sup> )		Mn (mg kg <sup>-1</sup> )		Zn (mg kg <sup>-1</sup> )		B (mg kg <sup>-1</sup> )	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020
Biocarbón (BC)														
0 t ha <sup>-1</sup>	8,70 <sup>1</sup>	10,09	6,96	5,23	0,82	0,84	156,83	223,00	33,19 b	41,31	1,88	2,03	0,35	0,23
4 t ha <sup>-1</sup>	10,21	10,88	7,44	6,44	0,85	0,92	157,06	240,63	35,07 b	56,36	2,09	2,68	0,35	0,31
8 t ha <sup>-1</sup>	9,35	10,10	7,90	8,81	0,92	0,96	169,19	215,44	45,63 a	56,55	2,17	2,39	0,35	0,39
16 t ha <sup>-1</sup>	10,97	11,08	9,99	7,82	0,80	0,96	134,63	217,56	30,21 b	51,43	2,33	3,21	0,48	0,38
Significancia	NS	C <sup>*</sup>	NS	NS	NS	NS	Q <sup>*</sup>	NS	Q <sup>*</sup> , C <sup>*</sup>	NS	NS	L <sup>*</sup>	L <sup>**</sup> , Q <sup>*</sup>	L <sup>**</sup>
Nivel de fertilización (NF)														
0%	8,63	10,05	6,49	4,62	0,77	0,76	148,25	228,50	31,01	44,60	1,80	2,14	0,32	0,26
33%	9,33	10,35	7,20	6,75	0,77	0,88	153,11	226,56	32,46	48,01	2,01	2,31	0,34	0,30
66%	9,78	10,78	8,70	7,53	0,83	0,98	152,13	224,00	37,74	54,71	2,20	2,85	0,41	0,32
100%	11,50	10,97	9,89	9,40	1,01	1,06	164,23	217,56	42,90	58,32	2,46	3,02	0,47	0,43
Significancia	L <sup>**</sup>	L <sup>**</sup>	L <sup>**</sup>	L <sup>***</sup>	L <sup>**</sup>	L <sup>*</sup>	L <sup>*</sup>	NS	L <sup>***</sup>	L <sup>***</sup>	L <sup>**</sup>	L <sup>**</sup>	L <sup>**</sup>	L <sup>*</sup>
Interacción														
Significancia	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CV (%) <sup>x</sup>	25,91	7,71	56,59	45,02	26,49	35,94	11,85	9,86	28,52	18,47	29,60	32,12	33,34	33,24

<sup>1</sup> Los datos representan el promedio de 4 muestras por tratamiento (n = 4). <sup>\*</sup>, <sup>\*\*</sup> y <sup>\*\*\*</sup> difieren significativamente en 0,05, 0,01 y 0,001, respectivamente L = lineal, Q = cuadrática; C cúbica acorde al análisis de contrastes polinómicos. <sup>x</sup> Coeficiente de variación.

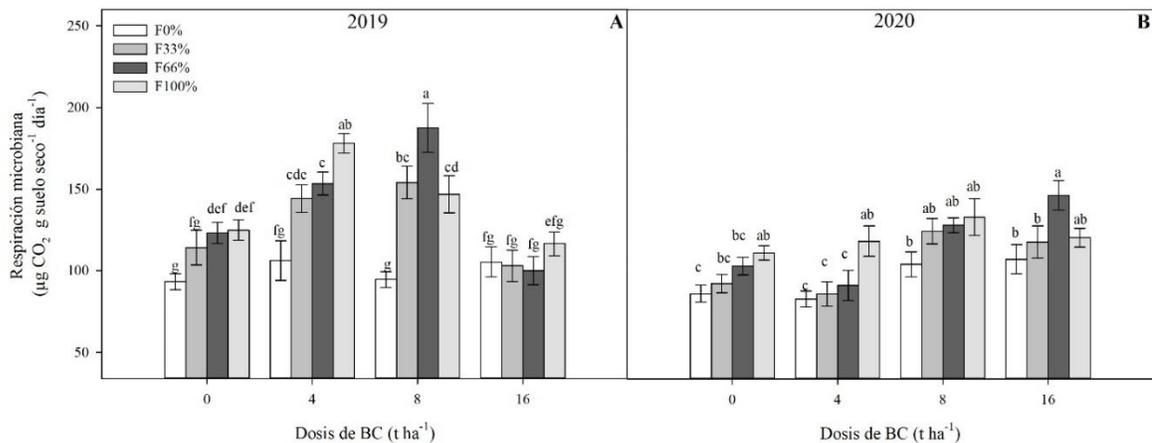
### 5.3.3 Respiración microbiana del suelo y análisis de componentes principales biplot

La respiración microbiana del suelo presentó diferencias ( $P \leq 0.05$ ) en la interacción BC x NF. En general, la respiración microbiana fue mayor en los suelos del cultivo de café tratados con fertilización química con respecto al suelo sin fertilizantes (**Figura 20**). La adición creciente de BC generó también un incremento sobre esta variable, principalmente, en suelos con fertilizantes al 66 y 100% de las necesidades nutricionales de los árboles de café, alcanzando valores de  $\sim 187,6 \mu\text{g g}^{-1}$  suelo seco día<sup>-1</sup> a una dosis de 8 t ha<sup>-1</sup> en 2019 y de  $\sim 146,4 \mu\text{g g}^{-1}$  suelo seco día<sup>-1</sup> a una dosis de 16 t ha<sup>-1</sup> en 2020, respectivamente (**Figura 20A y 20B**).

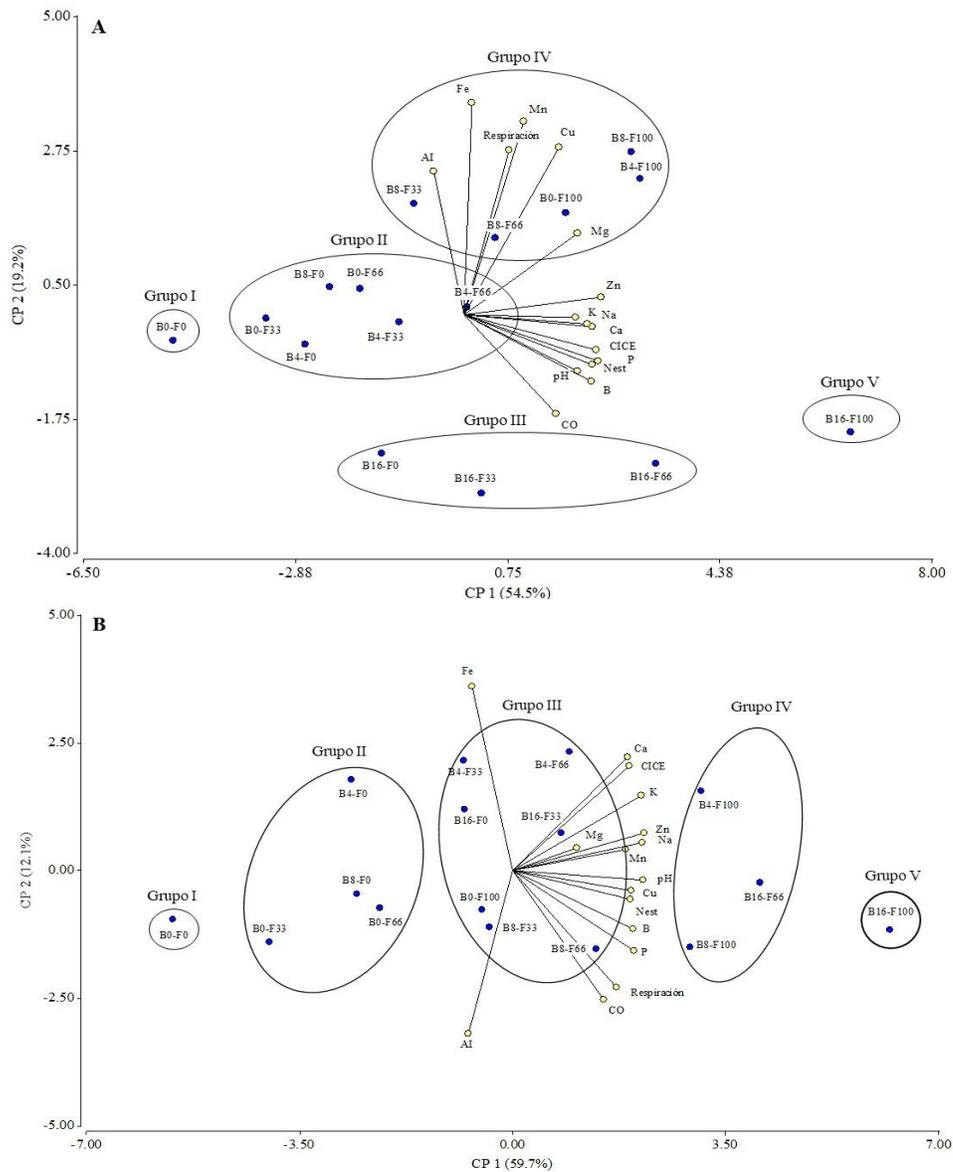
El ACP muestra que los tratamientos son representados por puntos y las variables mediante vectores (**Figura 21**). En general, se encontró que el PCA1 y PCA2 representaron el 54,5 y 19,2 % de la variación de los diferentes parámetros analizados para el año 2019 (**Figura 21A**); mientras que para el año 2020 el PCA1 y PCA2 representaron el 59,7 y 12,1 % de la variación (**Figura 21B**), respectivamente. En este sentido, los vectores de Mg, Zn, K, Na, Ca, CICE, P, Nest, pH y B tienen ángulos cercanos al origen, mostrando una alta correlación entre las variables del suelo evaluadas para el año 2019. Se identificó que las plantas con 16 t ha<sup>-1</sup> BC en 100% NF se ubicaron en el sector extremo derecho del análisis biplot (grupo V). Por lo contrario, la aplicación de 0 t ha<sup>-1</sup> BC y 0% NF (grupo I), se ubicaron en el sector opuesto al grupo V, evidenciando un efecto negativo de las dosis de biocarbón y niveles de fertilización sobre las variables analizadas. También, tres efectos diferenciales fueron también encontrados en las dosis BC y NF en el suelo del cultivo de café: a) 0 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% y 66% NF; 4 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% y 33% NF; 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% NF (grupo II) se comportaron en la misma tendencia del grupo I; b) 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 0%, 33% y 66% NF (grupo III) tuvo un menor efecto negativo sobre las variables de suelo estudiadas. Por último, c) suelos con 0, 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 100% NF; 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% y 66% NF (grupo IV) registraron una mejor respuesta mostrando una tendencia similar al grupo V.

En cuanto al año 2020, los vectores de Ca, CICE, K, Zn, Na, Mn, pH, Cu, Nest, B y P registraron ángulos cercanos al origen, evidenciando una alta correlación entre las

variables del suelo analizadas para el año 2020 (**Figura 21B**). Similares tendencias fueron identificadas en el grupo I y V, los cuales fueron representados por los mismos tratamientos observados en el año 2019. Asimismo, tres respuestas diferenciales fueron obtenidas por las dosis BC y NF en el suelo del cultivo de café: a) 0 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% y 66% NF; 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% (grupo II) se comportaron hacia la misma dirección del grupo I; b) 0 t ha<sup>-1</sup> BC + 100% NF; 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% NF; 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 66% NF; 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% y 33% NF (grupo III) representaron un menor efecto negativo sobre las variables de suelo evaluadas. Por último, c) suelos con 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 100% NF; 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 66% NF (grupo IV) obtuvieron una mejor respuesta representada en una tendencia similar al grupo V. Finalmente, el ACP permitió identificar que el tratamiento de 16 t ha<sup>-1</sup> BC y 100% FQ presentó similar tendencia en los dos años de estudio (2019 y 2020), indicando un mayor efecto positivo sobre las variables químicas y respiración microbiana del suelo.



**Figura 20.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre la respiración microbiana del suelo en el cultivo de café en los años 2019 (A) y 2020 (B). Los putos representan ± error estándar (n = 4). Las barras representan la media de cuatro bloques ± error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$



**Figura 21.** Biplot de Análisis de Componente Principal (PCA) de diferentes variables de suelo del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) bajo diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización. Respiración: respiración microbiana del suelo; pH: pH del suelo; CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva; Al: acidez intercambiable; contenido de nutrientes en el suelo; CO: carbono orgánico; Nest: nitrógeno estimado; Ca: calcio; Mg: magnesio; K: potasio; Na: sodio; P: contenido de fósforo; Cu: cobre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Zn: zinc y, B: boro. B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>. F0: 0% de los requerimientos nutricionales; F33: 33% de los requerimientos nutricionales; F66: 66% de los requerimientos nutricionales; F100: 100% de los requerimientos nutricionales. **A)** Período de evaluación del año 2019. **B)** Período de evaluación del año 2020.

## 5.4 Discusión

La aplicación de biocarbón (BC) ha sido documentada como una alternativa para mejorar las características físicas, químicas y biológicas del suelo (Al-Wabel *et al.*, 2017). En el presente estudio, se encontró que aplicaciones de BC en el suelo de un cultivo comercial de café principalmente con dosis de 8 o 16 t ha<sup>-1</sup> y niveles de fertilización química del 66 o 100% favorecieron ciertas variables físicas, químicas y biológicas del suelo estudiado (agregados estables, densidad aparente ( $\rho_a$ ), contenido de agua en punto de saturación y capacidad de campo, pH, CO y respiración microbiana del suelo). Otras investigaciones también muestran que el BC (entre 3 y 300 t ha<sup>-1</sup>) registró valores más altos de pH, mejoró la retención de agua en el suelo, incrementó el contenido de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) (Codling y Perry, 2013; Zhang *et al.*, 2015; Mahmood *et al.*, 2017). También, se ha evidenciado que la interacción entre la aplicación de BC y FQ favorece la absorción de N, mayor eficiencia del fertilizante químico y reducción de la lixiviación de nutrientes (Sadaf *et al.*, 2017; Saha *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2019).

El BC afecta las propiedades físicas del suelo (Inal *et al.*, 2015), lo cual se observó en esta investigación donde BC aplicado causó un incremento gradual de la capacidad de retención de agua, DMP y agregados estables del suelo a dosis de 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC de pulpa de café. Herath *et al.* (2013) observaron que la utilización entre 10 y 17 t ha<sup>-1</sup> BC (de residuos de maíz) favoreció a una mayor capacidad de retención de agua del suelo debido a una meso-porosidad más alta (poros con diámetros entre 2 y 50 nm). En adición, Obia *et al.* (2016) observaron que aplicaciones entre 2 y 6 t ha<sup>-1</sup> BC (producido de mazorcas de maíz) aumentó la estabilidad de agregados y redujo la  $\rho_a$  en un suelo franco arenoso como consecuencia al incremento de su porosidad. Sin embargo, se observó que suelos tratados con 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC presentaron menores valores de  $\rho_a$  en nuestro estudio. Verheijen *et al.* (2019) reportan que la utilización de BC modifica la  $\rho_a$  del suelo principalmente porque partículas pequeñas de BC se ubican en los poros del suelo generando una reducción de los macroporos entre agregados, lo cual implicaría un mayor volumen del suelo por la presencia de un material con densidad más baja (como el BC).

Respuestas positivas sobre variables químicas del suelo debido a la aplicación de BC también han sido reportados (Van Zwieten *et al.*, 2010; Coomes y Miltner, 2016). Se

registraron una menor AI y mayor pH, CO y CICE de suelos tratados con 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC. En este sentido, Yuan y Xu (2012) señalan que la aplicación del 1% (p/p) de diferentes BC (obtenidos de diversos residuos de cultivos) aumentaron el pH (entre el 12% y 32%) y la CIC (entre el 13% y 20%) del suelo. Los cambios observados en pH y CIC del suelo fueron asociados principalmente al pH de los BC (valores entre 8,88 a 10,35) y a su contenido de cationes base, sugiriendo que la incorporación de BC ayudó a mejorar la acidez y la fertilidad del suelo. Jien y Wang (2013) registraron un mayor pH, CIC y CO en un suelo arcillo limoso cuando se utilizó entre 2,5% y 5,0% p/p BC de residuos de madera de *Leucaena leucocephala*. Asimismo, este BC aplicado ayudó incrementar los agregados estables y redujo la  $\rho_a$  (tendencias observadas en nuestra investigación). En adición, Tanure *et al.* (2019) informan que el BC mejora la acidez intercambiable y la fertilidad del suelo debido a la presencia de hidróxidos y óxidos de los metales alcalinos en las cenizas del BC que se disuelven fácilmente y aumentan el pH; y, a los grupos carboxilo, fenólicos e hidroxilos del BC de carga negativa que se unen a iones H<sup>+</sup>, los cuales alcalinizan el pH y reducen su actividad en la solución del suelo.

La disponibilidad de nutrientes ha sido afectada positivamente en suelos tratados con BC (El-Naggar *et al.*, 2015; Karimi *et al.*, 2020). Lo anterior fue registrado en el presente estudio donde los suelos tratados con 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC al igual que aplicación de fertilizantes con un 66 y 100% NF evidenciaron valores mayores en el contenido de nutrientes. Tendencias similares fueron también encontradas por Borchard *et al.* (2014), quienes evidenciaron aumentos en la disponibilidad de N, K y C en un suelo limoso tratado BC (obtenido de residuos de madera de *Fagus* sp.) con una tasa de aplicación 15 g kg<sup>-1</sup> de suelo. Usman *et al.* (2016) también observaron que aplicaciones entre el 4 y 8% de BC (obtenido de residuos de madera de *Conocarpus*) incrementaron la concentración de P, K, Fe, Mn, Zn y Cu en un suelo arenoso. Los autores sugieren que el uso de BC genera una mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo para las plantas debido a: i) el incremento del pH (efecto de encalado); ii) el BC actúa como fertilizante mejorando las propiedades físico-químicas del suelo; iii) aumentan las cantidades solubles y / o retenidas de nutrientes como respuesta a las características de carga y área superficial del BC; y, iv) al aporte de nutrientes del BC en forma de cenizas, generando un aumento del contenido y la absorción de nutrientes de las plantas.

La respiración microbiana del suelo también fue condicionada por los tratamientos de BC, principalmente, con 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC al 66% NF en esta investigación. Resultados similares fueron también observados por Karimi *et al.* (2020) en suelos de baja fertilidad tratados con 2% p/p BC (obtenido de residuos de maíz), aumentando significativamente la respiración y la biomasa microbiana del suelo. No obstante, resultados contrastantes son reportados por Ge *et al.* (2020), quienes encontraron que aplicaciones de BC (5 y 10 t ha<sup>-1</sup>) fabricado con ramas de bambú en combinación con fertilización nitrogenada (50 kg·ha<sup>-1</sup> de NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) generaron una reducción en la respiración del suelo como consecuencia de un efecto de compensación de la adición de N, resultando en una mayor disponibilidad de este nutriente. En adición, Zhou *et al.* (2017) informan que generalmente las aplicaciones de BC generan un incremento de la respiración del suelo debido a su efecto primario sobre la descomposición del C procedente del suelo a través de medios abióticos o bióticos y a la mineralización de C más lábil, lo cual estimularía la renovación de la materia orgánica del suelo.

El presente estudio muestra una serie de ventajas para el manejo de la nutrición del sistema productivo del cultivo del café. Es importante indicar que la aplicación de biocarbón al suelo en combinación de fertilizantes de síntesis química es una alternativa interesante para la nutrición del café como se ha utilizado en otras especies con el objetivo de mejorar sus condiciones de crecimiento (El-Naggar *et al.*, 2019; Ge *et al.*, 2020). En adición, esta investigación sugiere que el uso de BC puede mejorar la fisiología de la planta debido a un efecto directo como una mejor retención de agua en el suelo (mayor contenido de agua en punto de capacidad de campo). Estos resultados proporcionan información para recomendar la transformación de residuos del cultivo de café, como la pulpa fresca, mediante el proceso de pirólisis para obtener biocarbón y favorecer el reciclaje de nutrientes a suelos de las zonas cafeteras, ayudando a la sostenibilidad del sistema productivo porque esta enmienda muestra un impacto positivo sobre la relación planta-suelo (Lehman *et al.*, 2011).

En conclusión, el uso de BC a partir de pulpa de café combinado con fertilización inorgánica genera un efecto positivo sobre el comportamiento de las diferentes características de un suelo cafetero. La aplicación de 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC en combinación con niveles de fertilización química 66 y 100% favoreció el pH, la retención de agua en el suelo, los agregados estables y respiración microbiana del suelo. Los anteriores resultados sugieren que el uso

de BC fabricado con pulpa de café (aplicaciones entre 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) puede ser una alternativa en las estrategias usadas para mejorar la calidad de los suelos cafeteros y ayuda en el manejo de residuos sólidos. Finalmente, el BC también proporciona una opción complementaria de la nutrición de este cultivo que permitiría reducir los niveles de fertilización química.

## 5.5 Bibliografía

- Alef, K., y P. Nannipieri. 1995. Methods in applied soil microbiology and biochemistry (No. 631.46 M592ma). Academic Press.
- Al-Wabel, M.I., Q. Hussain, A.R. Usman, M. Ahmad, A. Abduljabbar, A.S. Sallam y Y.S. Ok. 2017. Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. *Land Degradation & Development*, 29(7), 2124-2161.
- Asegid, A. 2020. Impact of climate change on production and diversity of coffee (*Coffea arabica* L.) in Ethiopia. *Int J Res Stud Sci Eng Technol*, 7, 31-38.
- Borchard, N., J. Siemens, B. Ladd, A. Möller y W. Amelung. 2014. Application of biochars to sandy and silty soil failed to increase maize yield under common agricultural practice. *Soil and Tillage Research*, 144, 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.07.016>
- Chan, K.Y., L. Van Zwieten, I. Meszaros, A. Downie y S. Joseph. 2008. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Soil Research*, 45(8), 629-634.
- Ch'ng, H.Y., O.H. Ahmed y N.M.A. Majid. 2015. Improving phosphorus availability, nutrient uptake and dry matter production of *Zea mays* L. on a tropical acid soil using poultry manure biochar and pineapple leaves compost. *Experimental Agriculture*, 52(03), 447-465.
- Codling, E. y A. Perry. 2013. The real dirt on biosolids as soil amendments. *Agricultural research magazine*. 6. University of Nebraska–Lincoln <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1005&context=usdaagresmag/>.
- Coomes, O.T. y B.C. Miltner. 2016. Indigenous charcoal and biochar production: Potential for soil improvement under shifting cultivation systems. *Land Degradation & Development*. n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/ldr.2500>

- Di Rienzo J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo. 2016. InfoStatversion 2016. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- El-Naggar, A., S.S. Lee, J. Rinklebe, M. Farooq, H. Song, A.K. Sarmah y S. Ok. 2019. Biochar application to low fertility soils: a review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536-554.
- Gaskin, J.W., R.A. Speir, K. Harris, K.C. Das, R.D. Lee, L.A. Morris, y D.S. Fisher. 2010. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agronomy Journal*, 102, 623–633. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0083>
- Gautam, D.K., R.M. Bajracharya y B.K. Sitaula. 2017. Effects of biochar and farm yard manure on soil properties and crop growth in an agroforestry system in the Himalaya. *Sustainable Agriculture Research*, 6(526-2017-2695).
- Herath, H.M.S.K., M. Camps-Arbestain y M. Hedley. 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An Alfisol and an Andisol. *Geoderma*, 209–210, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.016>
- Igalavithana, A.D., Y.S. Ok, N.K. Niazi, M. Rizwan, M.I. Al-Wabel, A.R.A. Usman y S.S. Lee. 2017. Effect of corn residue biochar on the hydraulic properties of sandy-loam soil. *Sustainability*, 9, 266. <https://doi.org/10.3390/su9020266>
- Inal, A., A. Gunes, O.Z.G.E. Sahin, M.B. Taskin y E.C. Kaya. 2015. Impacts of biochar and processed poultry manure, applied to a calcareous soil, on the growth of bean and maize. *Soil Use and Management*, 31(1), 106-113.
- Jien, S.-H. y C.S. Wang. 2013. Effects of biochar on soil properties and erosion potential in a highly weathered soil. *Catena*, 110, 225–233.
- Karimi, A., A. Moezzi, M. Chorom y N. Enayatizamir. 2020. Application of biochar changed the status of nutrients and biological activity in a calcareous soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(2), 450-459.
- Kufa, T., T. Shimber, B. Bellachew, E. Taye y G. Adugna. 2008. Coffee diversity & knowledge. Ethiopian Institute of Agricultural Research.
- Kuzyakov Y., I. Subbotina, H. Chen, I. Bogomolova y X. Xu. 2009 Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by <sup>14</sup>C labeling. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 210–219.
- Lemma, D.T. y H.G. Megersa. 2021. Impact of climate change on East African coffee production and its mitigation strategies. *World Journal of Agricultural Sciences*, 17(2), 81-89.

- Mahmood, F., I. Khan, U. Ashraf, T. Shahzad, S. Hussain, M. Shahid, M. Abid y S. Ullah, 2017. Effects of organic and inorganic manures on maize and their residual impact on soil physico-chemical properties. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 17, 22–32. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000002>.
- Obia, A., J. Mulder, V. Martinsen, G. Cornelissen y T. Børresen. 2016. In-situ effects of biochar on aggregation, water retention and porosity in light-textured tropical soils. *Soil Till. Res.* 155, 35–44
- Owsianiak, M., H. Lindhjem, G. Cornelissen, S.E. Hale, E. Sørmo y M. Sparrevik. 2021. Environmental and economic impacts of biochar production and agricultural use in six developing and middle-income countries. *Science of the Total Environment*, 755, 142455.
- Pla, I. 1983. Metodologías para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Revista de la Facultad de Agronomía. Alcance* N° 32. Universidad Central de Venezuela. 91p.
- Reichembach, L.H. y C.L. de Oliveira-Petkowicz. 2020. Extraction and characterization of a pectin from coffee (*Coffea arabica* L.) pulp with gelling properties. *Carbohydrate Polymers*, 116473.
- Sadaf, J., G.A. Shah, K. Shahzad, N. Ali, M. Shahid, S. Ali y M.I. Rashid. 2017. Improvements in wheat productivity and soil quality can accomplish by co-application of biochars and chemical fertilizers. *Science of the Total Environment*, 607, 715-724.
- Sadeghian, S. 2013. Nutrición de cafetales. En: *Manual del Cafetero Colombiano, Investigación y Tecnología para la Sostenibilidad de la Caficultura- Postcosecha y subproductos del café*. Gast, F., Benavides, P., Sanz, J. R., Herrera, J. C., Ramírez, V. H., Cristancho, M. A., & Marín, S. M. Federación Nacional de Cafeteros, Cenicafé. 354 pp.
- Saha, A., B.B. Basak, N.A. Gajbhiye, K.A. Kalariya y P. Manivel. 2019. Sustainable fertilization through co-application of biochar and chemical fertilizers improves yield, quality of *Andrographis paniculata* and soil health. *Industrial Crops and Products*, 140, 111607.
- Salamanca-Jimenez, A. 2017. Coffee crop fertilization in Colombia: A Mini-. *International Potash Institute*, 50, 22–30.
- Sánchez-Reinoso, A.D., E.A. Ávila-Pedraza y H. Restrepo-Díaz. 2020. Use of biochar in agricultura. *Acta Biológica Colombiana*, 25(2), 327-338.

- Sorrenti, G., C.A. Masiello y M. Toselli. 2016. Biochar interferences with kiwifruit Fe-nutrition in calcareous soil. *Geoderma*, 272, 10-19.
- Tanure, M.M.C., L.M. da Costa, H.A. Huiz, R.B.A. Fernandes, P.R. Cecon, J.D.P. Junior y J.M.R. da Luz. 2019. Soil water retention, physiological characteristics, and growth of maize plants in response to biochar application to soil. *Soil and Tillage Research*, 192, 164-173.
- Usman, A.R.A., M.I. Al-Wabel, Y.S. Ok, A. Al-Harbi, M. Wahb-Allah, A.H. El-Naggar y A. Al-Omran. 2016. Conocarpus biochar induces changes in soil nutrient availability and tomato growth under saline irrigation. *Pedosphere*, 26, 27–38. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(15\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(15)60019-4)
- Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K.Y. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph y A. Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and soil*, 327(1-2), 235-246.
- Verheijen, F.G., A. Zhuravel, F.C. Silva, A. Amaro, M. Ben-Hur y J.J. Keizer. 2019. The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment. *Geoderma*, 347, 194-202.
- Wariyo, A., H. Gebreselassie, W. Gerbatsedik y K. Belachew. 2021. Current status on coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) in Sidama and Gedeo zone, southern Ethiopia. *International Journal of Agricultural Extension*, 9(1), 01-11.
- Yazhini, G., R. Abishek, T. Ilakiya, S. Shanmugapriya y R.S. Piriya. 2020. Beneficial Effects of biochar on agriculture and environments. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 74-88.
- Yuan, J.H. y R.K. Xu. 2012. Effects of biochars generated from crop residues on chemical properties of acid soils from tropical and subtropical China. *Soil Research*, 50, 570–578. <https://doi.org/10.1071/SR12118>
- Zhang, D., G. Pan, G. Wu, G.W. Kibue, L. Li, X. Zhang y X. Liu. 2016. Biochar helps enhance maize productivity and reduce greenhouse gas emissions under balanced fertilization in a rainfed low fertility inceptisol. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.04.088>
- Zhang, Q., W. Zhou, G. Liang, X. Wang, J. Sun y P. He. 2015. Effects of different organic manures on the biochemical and microbial characteristics of albic paddy soil in a short-term experiment. *PLoS One* 10 (4), e0124096. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124096>.

- Zhang, M., R. Muhammad, L. Zhang, H. Xia, M. Cong y C. Jiang. 2019. Investigating the effect of biochar and fertilizer on the composition and function of bacteria in red soil. *Applied Soil Ecology*, 139, 107-116.
- Zhou, G., X. Zhou, T. Zhang, Z. Du, Y. He, X. Wang y C. Xu. 2017. Biochar increased soil respiration in temperate forests but had no effects in subtropical forests. *Forest Ecology and Management*, 405, 339-349.

# Capítulo 6 Evaluación de compuestos volátiles de granos de café (*Coffea arabica* L.) en respuesta a aplicaciones de biocarbón usando una nariz electrónica.

## Resumen.

La calidad del café es afectada por las características del suelo (profundidad, acidez / alcalinidad y fertilidad). El uso de biocarbón (BC) puede ser una prometedora alternativa para el manejo de residuos de manera eficiente y respetuosa con el ambiente que podría ayudar en el reciclaje de nutrientes y ayudar a una producción agrícola más limpia. El objetivo de esta investigación fue evaluar el perfil aromático de granos de (*Coffea arabica* L.) café y parámetros de calidad en taza en respuesta a la aplicación de cuatro diferentes dosis de biocarbón (obtenido de la pulpa de café) y cuatro niveles de fertilización química. Mediante un diseño en parcelas divididas con bloques al azar fueron evaluadas cuatro dosis de BC (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y cuatro niveles de fertilización química (FQ) (0, 33, 66 y 100% de los requerimientos nutricionales). Una nariz electrónica fue utilizada para analizar los compuestos volátiles y su relación con parámetros de calidad de la bebida de café como sólidos solubles totales (SST), pH y acidez titulable. Aplicaciones de 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC y 66 y 100% fertilización química registró mayor sensibilidad a los compuestos aromáticos de granos tostados de café en los sensores W1C, W3C y W5C. Enmiendas de BC entre 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> y FQ entre el 66% y 100% incrementó el contenido de SST (FQ 66%: 1,32°Brix y FQ 100%: 1,38 °Brix), redujo el pH (FQ 66%: 4,95 y FQ 100%: 4,88) e incrementó la acidez titulable (FQ 66%: 697,88 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> y FQ 100%: 662,56 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>) en bebidas de granos de café en el año 2020. En conclusión, la co-aplicación de BC como un complemento a la fertilización química mostró un efecto positivo sobre el perfil aromático obtenido para los granos tostados de café y atributos de calidad en taza. La aceptación de esta metodología en la producción de café podría representar un enfoque original para caracterizar acorde al estado nutricional del cultivo, ayudando en factores enfocados a la calidad y la trazabilidad.

**Palabras clave:** calidad en taza, perfil aromático, sólidos solubles, nutrición mineral.

## Abstract

Coffee quality is affected by the characteristics of the soil (depth, acidity / alkalinity and fertility). The use of biochar (BC) can be a promising alternative for waste management in an efficient and respectful way with the environment that could help in the recycling of nutrients and help a cleaner agricultural production. The objective of this research was to evaluate the aromatic profile of coffee beans (*Coffea arabica* L.) and quality parameters in the cup in response to the application of four different doses of biochar (obtained from coffee pulp) and four levels of fertilization. chemistry. By means of a design in divided plots with random blocks, four doses of BC (0, 4, 8 and 16 t ha<sup>-1</sup>) and four levels of chemical fertilization (CF) (0, 33, 66 and 100% of the nutritional requirements) were evaluated. An electronic nose was used to analyze volatile compounds and their relationship with coffee drink quality parameters such as total soluble solids (TSS), pH and titratable acidity. Applications of 8 and 16 t ha<sup>-1</sup> BC and 66 and 100% CF registered greater sensitivity to the aromatic compounds of roasted coffee beans in the W1C, W3C and W5C sensors. BC amendments between 8 and 16 t ha<sup>-1</sup> and CF between 66% and 100% increased the SST content (CF 66%: 1.32 ° Brix and CF 100%: 1.38 ° Brix), reduced the pH (CF 66%: 4.95 and CF 100%: 4.88) and increased titratable acidity (CF 66%: 697.88 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> and CF 100%: 662.56 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>) in coffee bean drinks in the year 2020. In conclusion, the co-application of BC as a complement to chemical fertilization showed a positive effect on the aromatic profile obtained for roasted coffee beans and cup quality attributes. The acceptance of this methodology in coffee production could represent an original approach to characterize according to the nutritional status of the crop, helping factors focused on quality and traceability.

**Keywords:** cup quality, aromatic profile, soluble solids, mineral nutrition.

## 6.1 Introducción

El café es una de las bebidas más populares consumida por cerca de un tercio de la población mundial (Chinchilla-Soto *et al.*, 2021). Este producto se exporta y comercializa como grano verde deshidratado con el fin de mantener su sabor al tostarlo (Correira *et al.*, 2020). La industria del café constituye un sector importante de la economía global, generando ingresos para alrededor de 25 millones de pequeños agricultores (García-Freites *et al.*, 2020). En Colombia, el café es uno de los principales cultivos agrícolas del país, obteniendo una cosecha de 833.400 t de café verde (cerca del 8,4% de la producción mundial) en un área de 853.700 ha en el año 2020 (International Coffee Organization, 2021; Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, 2021). El café colombiano es famoso y mundialmente conocido por sus atributos organolépticos (sabor y aroma suave),

por lo que hay una amplia investigación en este campo en el país (Castro *et al.*, 2021). En adición, cerca del 99% de la producción de café es obtenida principalmente de dos especies: café arábico (*Coffea arabica* L.) y café robusto (*C. canephora*). Sin embargo, el café arábico tiene una demanda relativamente mayor (superior al 70% del mercado mundial) debido a su alta calidad de bebida (Chemura *et al.*, 2021).

La dependencia del sector agrícola del cambio climático es una preocupación muy importante para el desarrollo económico, especialmente para la población que vive en zonas rurales (Chandio *et al.*, 2020). Chemura *et al.* (2021) informan que los perfiles de calidad del café están fuertemente afectados por factores como la oferta ambiental (lluvia, temperatura, humedad y radiación), la topología del terreno (elevación, ángulo de pendiente y aspecto) y características del suelo (profundidad, acidez / alcalinidad y fertilidad). En adición, se ha documentado que el cambio climático afecta negativamente el rendimiento de los cultivos y es una amenaza para el futuro de la seguridad alimentaria, lo cual ha convertido a la agricultura en una industria muy sensible al cambio climático (Cui, 2020). No obstante, la agricultura aporta significativamente al cambio climático a través de la producción de gases efecto invernadero (GEI) como resultado de las diferentes prácticas en el manejo agronómico de los cultivos (con cerca del 17% de las emisiones de GEI) y también contribuyendo en el cambio en el uso de la tierra llegando a ser entre el 7 al 14% (Israel *et al.*, 2020). Para garantizar la seguridad alimentaria bajo la amenaza del cambio climático, es pertinente realizar cambios importantes en las prácticas agrícolas, uso de la tecnología y las actitudes de la población mundial de una forma rápida y eficaz (Anderson *et al.*, 2020).

La industria del café genera una gran cantidad de subproductos y residuos a lo largo del cultivo, cosecha y procesamiento que conlleva a problemas medioambientales, sanitarios y económicos (García-Freites *et al.*, 2020). La pulpa, la cáscara, el mucílago y el pergamino son los principales subproductos del café, los cuales representan alrededor del 45-50% de los frutos cosechados e implican un gran problema ambiental para los países productores (Gemechu, 2020). En adición, la pulpa de café presenta altos niveles de ácidos fenólicos y cafeína que causan efectos negativos en el medio ambiente ya que son sustancias tóxicas para los mamíferos y organismos acuáticos; además, se han reportado efectos negativos en las plantas y en el crecimiento de bacterias y hongos (Hoseini *et al.*, 2021). En este sentido, el futuro del cultivo de café requiere de un enfoque más sostenible en la

utilización de los subproductos de la cadena productiva (Murthy y Naidu, 2012). Ante este complejo escenario, el manejo de subproductos como la pulpa de café a través de la transformación a biocarbón por el proceso de pirólisis y su posterior incorporación al suelo puede ser una alternativa importante como un complemento en la nutrición mineral de los cultivos agrícolas que puede aportar numerosos beneficios en términos de rendimiento y calidad.

El biocarbón (BC) es definido por el Instituto Internacional de Biocarbón (IBI) como “un material sólido obtenido de la transformación termoquímica de biomasa en un ambiente limitado en oxígeno, diseñado para ser utilizado para el manejo ambiental” y, posee una variedad de aplicaciones como agente para la adecuación del suelo (Sørmo *et al.*, 2020). Actualmente, el BC parece ser una prometedora alternativa para el manejo de residuos de manera eficiente y respetuosa con el ambiente (Srivatsav *et al.*, 2020). Generar productos de valor agregado como el BC a través de la pirólisis de residuos agrícolas y su posterior aplicación al suelo podría ayudar en el ciclo de reciclaje de nutrientes y garantizar una producción agrícola más limpia (Kizito *et al.*, 2019). En este sentido, Agbede *et al.* (2020) concluyen que aplicaciones de BC (entre 10 y 30 t ha<sup>-1</sup>) fabricado a partir de maderas duras como *Parkia biglosa*, *Khaya senegalensis*, *Prosopis africana* y *Terminalia glaucescens* mejoró los parámetros de rendimiento y calidad en plantas de *Xanthosoma sagittifolium* Schott. Zhang *et al.* (2020) reportaron que plantas de arándano tratadas con 1.5% y 3.0% (p/p) de BC (obtenido a partir de una mezcla de residuos de madera recolectados de las fábricas de muebles) incrementaron su rendimiento y calidad nutricional del fruto posiblemente debido a un aumento en la disponibilidad de nutrientes del suelo. Almaroai y Eissa (2020) informan que aplicaciones de BC (entre 5 y 10 t ha<sup>-1</sup>) fabricado a partir de tallos de maíz mejoró el contenido de sólidos solubles totales (SST) (4,5 vs 3,5 °Brix), acidez total (0,40% vs 0,30%) y contenido de licopeno (16,5 vs 13,3 mg g<sup>-1</sup> PF) de frutos de tomate en comparación con plantas no tratadas con BC, respectivamente.

La calidad del café es un rasgo complejo que envuelve características del grano, contenidos de compuestos bioquímicos y atributos sensoriales; es influenciada por aspectos ambientales (geografía, topografía, suelo, clima), factores de manejo (recolección y procesamiento de cerezas, sombrero), entre otros (Yadessa *et al.*, 2020). En este sentido, Tassew *et al.* (2021) indican que, a excepción por el alto porcentaje de

molibdeno y arcilla del suelo, las cantidades reducidas de la mayoría de los nutrientes del suelo, el pH y el porcentaje de limo tuvieron un efecto importante en la calidad del café. En adición, Yadessa *et al.* (2020) reportan que el contenido de materia orgánica del suelo, el N total y el contenido de arena registraron una correlación inversamente proporcional con respecto al contenido de cafeína; mientras que un mayor contenido de arcilla y P disponible evidenciaron una correlacionaron positivamente con la cafeína. No obstante, el análisis de los atributos de calidad del café, como el contenido de cafeína, generalmente son de alto costo, requiere de muchos procedimientos que usualmente se realizan a través métodos químicos destructivos y tardan mucho tiempo para obtener resultados (Kya *et al.*, 2020). Ante este panorama, es necesario el desarrollo de métodos instrumentales que apoyen la determinación del aroma del café y permitan a los productores identificar cafés de alta calidad (Knysak, 2017). En las últimas décadas ha sido incrementado el uso de los dispositivos de nariz electrónica debido a que es una herramienta no invasiva, simple y rápida para evaluar la calidad de los productos biológicos. Asimismo, mediante la utilización de técnicas para el análisis de grandes conjuntos de datos obtenidos de transductores electroquímicos, han facilitado un uso más amplio de la nariz electrónica para el análisis de sustancias volátiles (Rusinek *et al.*, 2019).

El uso de dispositivos como la Nariz Electrónica en el análisis de compuestos volátiles ha sido utilizado en productos como mieles (Zuluaga-Domínguez *et al.*, 2018), granos de café (Marek *et al.*, 2020), caña de azúcar (Xu *et al.*, 2021), aceites esenciales en clavo (Graboski *et al.*, 2021), entre otros. No obstante, para el caso del café, el principal uso de la nariz electrónica ha sido enfocado en la identificación de la presencia de compuestos volátiles característicos en granos de café de diferentes regiones de cultivo y su correlación con el lugar de procedencia (Marek *et al.*, 2020). En adición, aunque en los últimos años el estudio de los efectos de la aplicación de BC sobre la fisiología de las plantas ha adquirido importancia (Vijayaraghavan, 2021), la información acerca de las respuestas del cultivo de café al uso de enmiendas de BC en el suelo en co-aplicación con fertilizantes sigue siendo una limitante (Bommaraju, 2016), especialmente en parámetros de calidad del grano. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el perfil aromático de granos de café (*Coffea arabica* L. var. Castillo El Tambo) en respuesta a la aplicación de cuatro diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) obtenido de la pulpa de café y cuatro niveles de fertilización química (0, 33, 66 y 100% de los requerimientos nutricionales) con la ayuda de una nariz

electrónica y su relación con parámetros típicamente empleados para evaluar la calidad de la bebida de café como: sólidos solubles totales, pH, acidez titulable.

## 6.2 Materiales y métodos

### 6.2.1 Material vegetal y condiciones de crecimiento

El experimento se realizó en la finca Luxemburgo, municipio de Chaparral (Tolima, Colombia) (Lat. 3°49'39,2" N, Long. 75°34'07,1" O, altitud: 1.875 msnm), entre agosto de 2018 a agosto de 2020. Las condiciones de crecimiento fueron: temperatura diurna/nocturna 27.4/20.7 °C, precipitación promedio (entre los años 2017 y 2019) de 763 mm anuales, humedad relativa de 55,4 a 84,8%, y fotoperiodo natural de 12 h, con radiación directa activa de 2.050,9/4.619,6 W m<sup>-2</sup>, dependiendo de las condiciones climatológicas (periodos de lluvias). El experimento se llevó a cabo en árboles de café (*Coffea arabica* L.) de tres años de edad. También, todos los árboles estaban espaciados a 1,70 m × 1,30 m (4.500 árboles/ha). Las características del suelo fueron las siguientes: i) pH de 5,50; ii) Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) 11,51 meq/100g; iii) Conductividad Eléctrica 0,17 dS/m; iv) Características químicas: Nitrógeno total: 0,27%, Ca: 7,85%, K: 0,50%, Mg: 2,52%, Na: 0,15 meq 100 g<sup>-1</sup>, P: 0,98 mg kg<sup>-1</sup>; Cu: 1,40 mg kg<sup>-1</sup>, Fe: 124 mg kg<sup>-1</sup>, Mn: 65 mg kg<sup>-1</sup>, B: 0,07 mg kg<sup>-1</sup> y Zn: 2,90 mg kg<sup>-1</sup> y v) textura Franco (46% de Arcilla, 30% de limo y 46% arena).

### 6.2.2 Tratamientos de biocarbón y niveles de fertilización

Los tratamientos de BC se establecieron cuatro meses después de la última cosecha de los árboles de café (agosto del 2018) usando cuatro diferentes dosis de BC. Las dosis de biocarbón (BC) utilizadas fueron 0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> (BC0 = 0,0 kg/árbol; BC4 = 0,75 kg/árbol; BC8 = 1,50 kg/árbol y BC16 = 3,00 kg/árbol). Las dosis fueron establecidas con base a las respuestas agronómicas que se han observado en otras especies de plantas cultivadas (Sánchez-Reinoso *et al.*, 2020). El BC fue aplicado a un radio de 30 cm desde la base del tallo del árbol de café y posteriormente fue cubierto con una capa suelo. El biocarbón

utilizados se obtuvo de pulpa de café, la cual tuvo una pirolización media a 500 °C con la ayuda de un horno rotatorio (6 m de largo x 0,7 m de diámetro interno, Tecsol, Bogotá, Colombia). Finalmente, el BC presentó las siguientes características: cenizas 20,8%; CIC: 103 meq / 100g; pH: 9,42; conductividad eléctrica 19,4: dS / m; carbono orgánico (OC): 46,4%; N: 2,81%; P: 1,11%; Ca: 0,97%; K: 4,37%; Mg: 0,43%; Cu: 53,5 mg kg<sup>-1</sup>; Fe: 2.795 mg kg<sup>-1</sup>; Zn: 110 mg kg<sup>-1</sup>; B: 99,3 mg kg<sup>-1</sup>; CO/N: 16,5.

Los tratamientos de fertilización se desarrollaron de forma fraccionada (dos veces en el año de evaluación), según a las sugerencias reportadas por Sadeghian (2013). La aplicación de nutrientes se realizó usando un fertilizante compuesto de grado 17N-6P-18K-2Mg (Nutrimon-Café Producción, Monómeros S.A., Colombia) como fuente de nitrógeno, fósforo, potasio y magnesio; y un fertilizante simple 46N (Urea, Yara, Colombia). Los niveles de fertilización empleados fueron: i) 100% (114 kg ha<sup>-1</sup>N, 24 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 73 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 8 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0,8 Zn kg ha<sup>-1</sup>); 66% (75 kg ha<sup>-1</sup>N, 16 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 48 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 5 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0,5 Zn kg ha<sup>-1</sup>); ) 33% (38 kg ha<sup>-1</sup>N, 8 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 24 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 3 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0,3 Zn kg ha<sup>-1</sup>); y 0% (0 kg ha<sup>-1</sup>N, 0 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 0 kg ha<sup>-1</sup>K<sub>2</sub>O, 0 kg ha<sup>-1</sup> MgO-S-B y 0 Zn kg ha<sup>-1</sup>) de los requerimientos nutricionales para el café. Los tratamientos de fertilización fueron suministrados con los siguientes fertilizantes comerciales: y F100 = 90 g/árbol de 17N-6P-18K-2Mg y 22 g/árbol de UREA); F66 = 60 g/planta de 17N-6P-18K-2Mg y 14 g/árbol de UREA; F33 = 30 g/árbol de 17N-6P-18K-2Mg y 7 g/árbol de UREA; y F0 = 0 g/árbol de 17-6-18-2 y 0 g/árbol de UREA, respectivamente.

Las dosis anteriores se seleccionaron con base al análisis físico y químico del suelo y a los requerimientos nutricionales reportados por Salamanca-Jiménez (2017). La frecuencia de aplicación de nutrientes fue de seis meses (mayo y octubre). En adición, los tratamientos fueron dispuestos en un diseño de parcelas divididas en bloques completamente al azar, las parcelas grandes fueron las cuatro dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y las parcelas pequeñas correspondieron a los cuatro niveles de fertilización (0, 33, 66 y 100% de los requerimientos nutricionales). La unidad experimental estaba compuesta por cinco árboles rodeados de árboles guarda y cada tratamiento se repitió cuatro veces (cuatro bloques), utilizando un total de 320 árboles en todo el experimento.

### 6.2.3 Tostado y preparación de la bebida

Dos métodos de torrefacción de granos de café fueron realizados con el fin de evaluar los atributos de calidad de la bebida de café: i) el primer método se llevó a cabo únicamente para la cosecha realizada en el año 2019. Una muestra de 1 kg de café pergamino seco (CPS) de cada unidad experimental fue utilizada para la operación de trilla y así remover la capa externa del grano (pergamino) con la ayuda de una descascaradora de laboratorio (ING-C-200, Ingesecc, Bogotá, Colombia). Después de separar todos los granos defectuosos, submuestras de 200 g de cada unidad experimental fueron preparadas para torrefacción. El café se tostó a 195 °C durante 15 minutos y 45 segundos con la ayuda de un tostador de tambor comercial (KN-8828P-2 coffee roaster; Hottop, USA); ii) El segundo método de torrefacción se realizó únicamente en la cosecha recolectada en el año 2020. Muestras de 1 kg de CPS de cada unidad experimental fueron usadas para el proceso de trilla y así remover la capa externa del grano (pergamino) con la ayuda de una descascaradora de laboratorio (ING-C-200, Ingesecc, Bogotá, Colombia). Después de separar todos los granos defectuosos, los granos fueron tostados a 195 °C durante 10 minutos con la ayuda de un tostador de tambor comercial (GT12, Inmcaff, Bogotá, Colombia).

Las bebidas se prepararon mediante una extracción de 7 g de café tostado y molido con 100 ml de agua destilada caliente (90°C), durante 4 minutos. Seguidamente, los sólidos fueron eliminados y se dejaron sedimentar los residuos al fondo del recipiente (NTC 3566).

### 6.2.4 Perfil aromático

Un análisis de perfil aromático fue realizado en los granos de café tostados para las cosechas realizadas en los dos periodos de evaluación con la ayuda de una Nariz Electrónica Portable (PEN3, Airsense Analytics, Alemania). El equipo constaba de tres componentes: i) una unidad de muestreo automática; ii) una unidad detectora que contiene la matriz de sensores; y iii) un software para el reconocimiento de patrones. La matriz estaba compuesta por 10 sensores semiconductores de óxido metálico (MOS) no específicos diferentes: W1C (aromático), W3C (aromático), W5C (arom-aliph), W1S (metano amplio), W2S (alcohol amplio), W3S (metanoalifado), W5S (rango amplio), W6S

(hidrógeno), W1W (azufre orgánico), W2W (sulfhidrato), que se mantuvieron a 400–500 °C durante todas las mediciones. Para cada muestra fueron pesados 0,5 g y se colocaron en un vial de 20 ml con una tapa de silicona. Después de un tiempo de equilibrado de 20 min a temperatura ambiente, se inició la secuencia de medición con los siguientes parámetros: tiempo de análisis 120 s, tiempo de lavado 360 s, flujo de gas 150 ml min<sup>-1</sup> y un factor de dilución automático. La secuencia de medición consistió en bombear aire de referencia sobre los sensores (aire ambiente que fue filtrado a través de carbón activo), a un caudal constante (1 ml s<sup>-1</sup>) durante 10 s, con el fin de obtener una línea base estable. Luego, el espacio de cabeza de gas evaluado fue bombeado con una jeringa sobre las superficies del sensor durante 120 s. Posteriormente, los sensores fueron expuestos a aire de referencia para recuperar la línea de base. El tiempo total del ciclo para cada medición fue de 8 min. No se experimentó ninguna desviación del sensor durante el período de medición. Cada muestra fue evaluada tres veces y se utilizó el promedio de los resultados para el análisis. Finalmente, el valor del coeficiente medio diferencial (vcmd) fue calculado para crear una matriz bidimensional  $n \times s$ , definiendo la respuesta de la curva de cada sensor acorde a la metodología propuesta por Yin y Tian (2007) usando la ecuación 1:

$$vcmd = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{x_{i+1} - x_i}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde vcmd es el valor característico del perfil para cada sensor y para cada muestra;  $N$  es el número de intervalos de tiempo analizados;  $x_i$  y  $x_{i+1}$  corresponde al resultado de conductancia en los tiempos  $i$  e  $i+1$ ;  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo entre los datos de conductancia, que generalmente es igual a 1. Los resultados obtenidos permiten reflejar la velocidad promedio de las respuestas de cada sensor y representan sus principales rasgos. La transformación mencionada de los datos de nariz electrónica permitió la reducción del tamaño de la matriz a dos dimensiones consideradas como  $n \times s \times t$  (donde  $n$  es el número de filas,  $s$  el número de sensores y  $t$  el número de veces que el sistema recopiló datos).

### 6.2.5 Atributos de calidad de granos de café

Una gota de la bebida de café fue usada para el análisis de los sólidos solubles totales a través del método refractométrico con la ayuda de un refractómetro digital manual (PAL 1, Atago Co Ltd, Bellevue, WA, USA) a 22 °C. Los valores fueron expresados como % de sólidos solubles o °Brix (Método oficial AOAC 932.012). El pH y la acidez titulable fueron determinados con la ayuda de un pHmetro Hanna (HI 8424, HANNA instruments, Woonsocket, RI, USA). El pH fue cuantificado usando 50 ml de la bebida previamente preparada, teniendo en cuenta el valor estabilizado después de la inmersión del electrodo (Método oficial AOAC 918.12). La acidez titulable fue hallada acorde a la metodología descrita por Puerta (2000), registrando la cantidad de mililitros de NaOH necesarios para la titulación de 50 ml de la bebida de café hasta pH = 8,3 y a 25°C. Los valores fueron expresados en mg de CaCO<sub>3</sub>/L de bebida.

### 6.2.6 Análisis de los datos

Se realizó un análisis de varianza con medidas repetidas. Posteriormente, cuando se presentaron diferencias significativas, se empleó la prueba comparativa de medias de Tukey a  $P \leq 0,05$ . Los datos se analizaron usando el programa Statistix v 9,0 (software analítico, Tallahassee, FL, US). Adicionalmente, la extracción de los datos de la nariz electrónica se llevó a cabo utilizando el software MATLAB (R2021a, Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.). Finalmente, se realizó un análisis de componentes principales utilizando el programa InfoStat 2016 (Di Rienzo *et al.*, 2016).

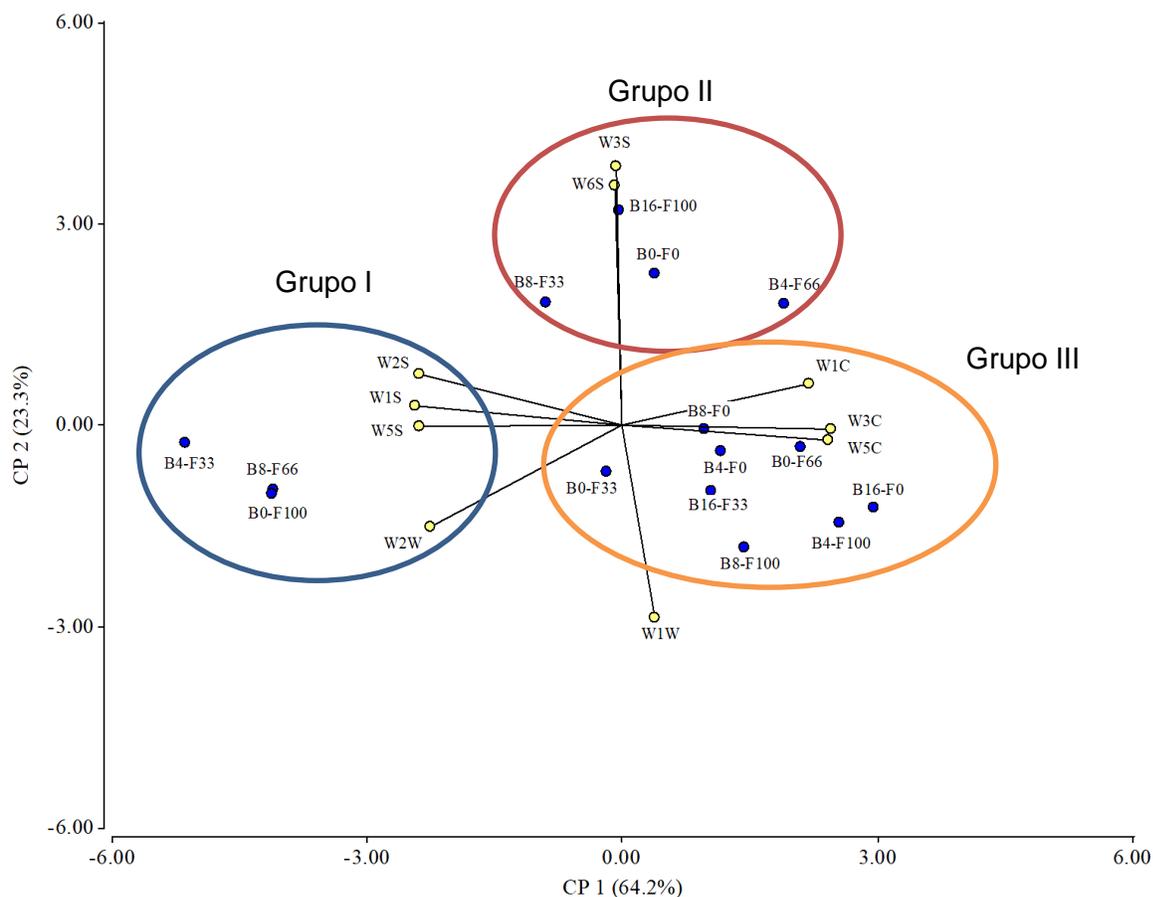
## 6.3 Resultados

### 6.3.1 Perfil aromático y análisis de correlación de Pearson

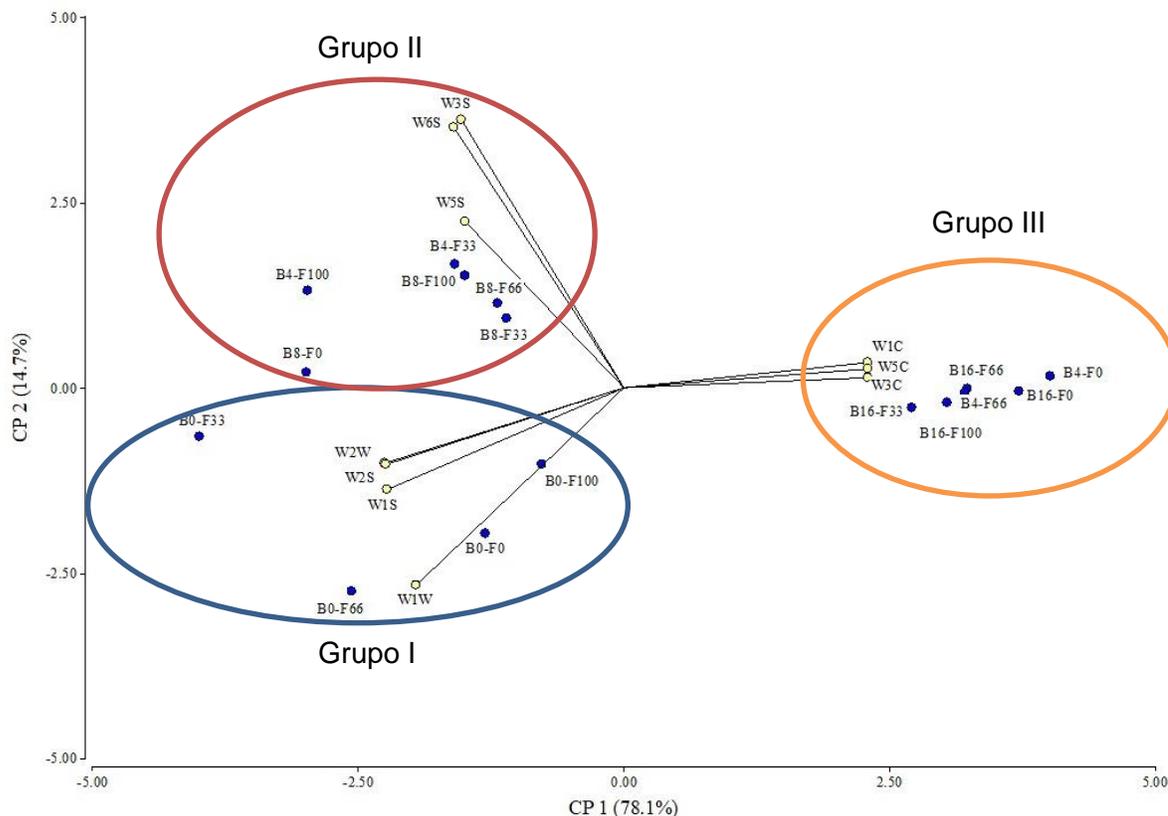
El ACP muestra que los diferentes sensores de la Nariz Electrónica son representados por vectores mientras que los tratamientos de BC y FQ son señalados por puntos, (**Figura 22** y **Figura 23**). En general, se encontró que el PCA1 y PCA2 comprendieron el 64,2 y 23,3

% de la varianza total explicada de los diferentes sensores de la Nariz Electrónica estudiados en el año 2019 (**Figura 22**); mientras que en el año 2020 el PCA1 y PCA2 indicaron el 78,1 y 14,7 % de la varianza (**Figura 23**), respectivamente. En este sentido, los vectores de los sensores W1C, W5C y W3C tienen ángulos cercanos al origen, mostrando una mayor correlación entre las variables evaluadas en el año 2019. Los granos de café provenientes de árboles tratados con 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC y 0% NF; 0 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% NF; 0 t ha<sup>-1</sup> BC y 66% NF; 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC en 100% NF, árboles con 4 y 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 66% NF se ubicaron en el sector del extremo derecho del análisis biplot (grupo III). Sin embargo, la aplicación de 0 t ha<sup>-1</sup> BC y 100% NF; 4 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% NF y 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 66% NF (grupo I), se ubicaron en el lado opuesto al grupo I, indicando un efecto negativo de dichos tratamientos de fertilización de los árboles de café sobre los parámetros estudiados (grupo III). Finalmente, un tercer efecto diferencial fue observado con respecto a las dosis BC y NF en las respuestas los sensores de la Nariz Electrónica de los granos tostados de café: 0 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% NF; 4 t ha<sup>-1</sup> BC + 66% NF; 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 100% NF (grupo II) mostraron un menor efecto negativo sobre el comportamiento del perfil aromático de los granos tostados de café.

Similares tendencias fueron registradas para el periodo de evaluación del año 2020, los vectores de W1C, W5C y W3C presentaron ángulos cercanos al origen, indicando que estos son los sensores que mayor sensibilidad tienen a compuestos aromáticos de los granos de café (Figura 2). En adición, tres efectos diferenciales fueron observados entre las dosis BC y NF en los granos tostados de café: i) El grupo III estuvo conformado por los granos de árboles tratados con 4 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% y 66% NF; 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 0%, 33%, 66% y 100% NF, los cuales se localizaron en el extremo derecho del análisis biplot. ii) 0 t ha<sup>-1</sup> BC + 0%, 33%, 66% y 100% NF (grupo I) se comportaron hacia el extremo opuesto del grupo I; ii) 4 t ha<sup>-1</sup> BC + 33% y 66% NF; 8 t ha<sup>-1</sup> BC + 0%, 33%, 66% y 100% NF (grupo II) evidenciaron un menor efecto negativo en las variables estudiadas. Finalmente, el uso de la Nariz Electrónica (especialmente los sensores W1C, W5C y W3C) son herramientas o variables del perfil aromático útiles para evaluar la respuesta de los granos café a tratamientos de fertilización, enmiendas con BC, o la interacción de ambos.



**Figura 22.** Biplot de Análisis de Componente Principal (PCA) de los sensores de la Nariz Electrónica en granos tostados de café (*Coffea arabica* L.) bajo diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización para la cosecha del año 2019: W1C (aromático), W3C (aromático), W5C (arom-aliph), W1S (metano amplio), W2S (alcohol amplio), W3S (metanoalifado), W5S (rango amplio), W6S (hidrógeno), W1W (azufre orgánico), W2W (sulfhidrato). B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>. F0: 0% de los requerimientos nutricionales; F33: 33% de los requerimientos nutricionales; F66: 66% de los requerimientos nutricionales; F100: 100% de los requerimientos nutricionales.



**Figura 23.** Biplot de Análisis de Componente Principal (PCA) de los sensores de la Nariz Electrónica en granos tostados de café (*Coffea arabica* L.) bajo diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización para la cosecha del año 2020: W1C (aromático), W3C (aromático), W5C (arom-aliph), W1S (metano amplio), W2S (alcohol amplio), W3S (metanoalifado), W5S (rango amplio), W6S (hidrógeno), W1W (azufre orgánico), W2W (sulfhidrato). B0: dosis de biocarbón de 0 t h<sup>-1</sup>; B4: dosis de biocarbón de 4 t h<sup>-1</sup>; B8: dosis de biocarbón de 8 t h<sup>-1</sup>; B16: dosis de biocarbón de 16 t h<sup>-1</sup>. F0: 0% de los requerimientos nutricionales; F33: 33% de los requerimientos nutricionales; F66: 66% de los requerimientos nutricionales; F100: 100% de los requerimientos nutricionales.

El análisis de varianza indica que diferencias también fueron encontradas entre los factores de Biocarbón, Nivel de Fertilización y su interacción sobre los sensores de la Nariz Electrónica en el 2019 y 2020 (**Tabla 14** y **Tabla 15**). En general, las tendencias evidenciadas en el ACP biplot son corroboradas para los sensores W1C, W5C y W3C en los dos años de evaluación. En este sentido, tratamientos con 0, 4 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 0%, 33% y 100% FQ mostraron los valores más altos para los sensores anteriormente mencionados (W1C: -3,80 y -1,48 × 10<sup>-4</sup>; W5C entre 9,83 × 10<sup>-4</sup> y 1,17 × 10<sup>-3</sup>; W3C entre 4,55 y 8,37 × 10<sup>-4</sup>) en el año 2019 (**Tabla 14**); mientras que para el año 2020 los tratamientos de 4 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% y 66% FQ y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 0%, 33%, 66% y 100% FQ registraron los valores más altos en W1C (entre -7,68 × 10<sup>-5</sup> y 1,69 × 10<sup>-4</sup>), W5C (entre -7,29 × 10<sup>-5</sup> y 1,79 × 10<sup>-4</sup>) y W3C (entre -7,72 × 10<sup>-4</sup> y 1,91 × 10<sup>-4</sup>) (**Tabla 15**). No obstante,

los sensores W5S, W6S, W1S, W1W, W2S, W2W y W3S no mostraron una tendencia clara a la aplicación de BC y niveles de FQ para el año 2019. En adición, una tendencia contraria fue observada en W5S, W6S, W1S, W1W, W2S y W2W, mostrando que aplicaciones de  $16 \text{ t ha}^{-1}$  BC registraron los valores más bajos con respecto a los demás tratamientos de nutrición del cultivo de café en 2020; mientras que los más altos fueron encontrados en los granos de café tostados cosechados de árboles que contaron con 4 y  $8 \text{ t ha}^{-1}$  BC en los diferentes niveles de fertilización química (**Tabla 15**), corroborando lo encontrado en el ACP biplot.

**Tabla 14.** Resumen del análisis de la varianza del efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) sobre los sensores de la nariz electrónica en granos tostados de café durante el año 2019.

Tratamiento	W1C	W5C	W3C	W5S	W6S	W1S	W1W	W2S	W2W	W3S
Biocarbón										
0 t ha <sup>-1</sup>	-3,50 × 10 <sup>-4</sup> a	7,61 × 10 <sup>-4</sup> ab	3,15 × 10 <sup>-4</sup> ab	3,44 × 10 <sup>-4</sup> ab	2,43 × 10 <sup>-5</sup> ab	-2,09 × 10 <sup>-3</sup> ab	1,46 × 10 <sup>-4</sup> b	-1,57 × 10 <sup>-3</sup> ab	1,23 × 10 <sup>-4</sup> bc	2,21 × 10 <sup>-4</sup> b
4 t ha <sup>-1</sup>	-3,41 × 10 <sup>-4</sup> a	8,75 × 10 <sup>-4</sup> a	3,92 × 10 <sup>-4</sup> a	2,17 × 10 <sup>-4</sup> b	3,15 × 10 <sup>-6</sup> b	-2,22 × 10 <sup>-3</sup> b	1,52 × 10 <sup>-4</sup> b	-1,67 × 10 <sup>-3</sup> b	9,99 × 10 <sup>-5</sup> c	2,32 × 10 <sup>-4</sup> ab
8 t ha <sup>-1</sup>	-3,73 × 10 <sup>-4</sup> ab	7,03 × 10 <sup>-4</sup> b	2,62 × 10 <sup>-4</sup> b	2,73 × 10 <sup>-4</sup> ab	1,06 × 10 <sup>-5</sup> b	-2,06 × 10 <sup>-3</sup> a	1,53 × 10 <sup>-4</sup> b	-1,56 × 10 <sup>-3</sup> ab	1,52 × 10 <sup>-4</sup> ab	2,06 × 10 <sup>-4</sup> b
16 t ha <sup>-1</sup>	-4,63 × 10 <sup>-4</sup> b	8,29 × 10 <sup>-4</sup> ab	3,25 × 10 <sup>-4</sup> b	3,84 × 10 <sup>-4</sup> a	-3,29 × 10 <sup>-6</sup> a	-2,15 × 10 <sup>-3</sup> a	2,13 × 10 <sup>-4</sup> a	-1,63 × 10 <sup>-3</sup> a	1,82 × 10 <sup>-4</sup> a	1,90 × 10 <sup>-4</sup> a
Significancia	.	.	.	.	.	.	***	.	**	.
Nivel de fertilización										
0%	-2,22 × 10 <sup>-4</sup> a	1,01 × 10 <sup>-3</sup> a	5,36 × 10 <sup>-4</sup> a	-7,63 × 10 <sup>-5</sup> c	2,09 × 10 <sup>-5</sup>	-2,44 × 10 <sup>-3</sup> d	1,39 × 10 <sup>-4</sup> b	-1,85 × 10 <sup>-3</sup> d	4,66 × 10 <sup>-5</sup> c	2,06 × 10 <sup>-4</sup> b
33%	-4,80 × 10 <sup>-4</sup> b	6,65 × 10 <sup>-4</sup> b	2,02 × 10 <sup>-4</sup> b	4,97 × 10 <sup>-4</sup> a	3,36 × 10 <sup>-5</sup>	-2,00 × 10 <sup>-3</sup> b	1,75 × 10 <sup>-4</sup> a	-1,48 × 10 <sup>-3</sup> b	1,64 × 10 <sup>-4</sup> ab	2,61 × 10 <sup>-4</sup> a
66%	-4,68 × 10 <sup>-4</sup> b	5,22 × 10 <sup>-4</sup> b	9,09 × 10 <sup>-5</sup> b	5,38 × 10 <sup>-4</sup> a	4,38 × 10 <sup>-6</sup>	-1,76 × 10 <sup>-3</sup> a	1,52 × 10 <sup>-4</sup> b	-1,25 × 10 <sup>-3</sup> a	2,00 × 10 <sup>-4</sup> a	2,35 × 10 <sup>-4</sup> ab
100%	-3,69 × 10 <sup>-4</sup> b	9,09 × 10 <sup>-4</sup> a	4,16 × 10 <sup>-4</sup> a	3,19 × 10 <sup>-4</sup> b	3,92 × 10 <sup>-5</sup> NS	-2,21 × 10 <sup>-3</sup> c	1,78 × 10 <sup>-4</sup> a	-1,70 × 10 <sup>-3</sup> c	1,33 × 10 <sup>-4</sup> b	2,18 × 10 <sup>-4</sup> b
Significancia	***	***	***	***	NS	***	***	***	***	**
Interacción										
0 t ha <sup>-1</sup> × 0%	-2,21 × 10 <sup>-4</sup> ab	7,89 × 10 <sup>-4</sup> bc	3,96 × 10 <sup>-4</sup> cd	2,04 × 10 <sup>-4</sup> def	1,03 × 10 <sup>-4</sup> b	-2,17 × 10 <sup>-3</sup> cd	9,55 × 10 <sup>-5</sup> gh	-1,55 × 10 <sup>-3</sup> cd	7,28 × 10 <sup>-6</sup> ef	3,28 × 10 <sup>-4</sup> bc
0 t ha <sup>-1</sup> × 33%	-5,15 × 10 <sup>-4</sup> bcd	9,91 × 10 <sup>-4</sup> abc	4,38 × 10 <sup>-4</sup> bcd	4,83 × 10 <sup>-4</sup> cd	3,19 × 10 <sup>-6</sup> bcd	-2,36 × 10 <sup>-3</sup> def	2,09 × 10 <sup>-4</sup> abc	-1,88 × 10 <sup>-3</sup> defgh	1,56 × 10 <sup>-4</sup> cd	2,41 × 10 <sup>-4</sup> cde
0 t ha <sup>-1</sup> × 66%	-1,48 × 10 <sup>-4</sup> a	1,17 × 10 <sup>-3</sup> ab	6,78 × 10 <sup>-4</sup> abc	-1,92 × 10 <sup>-4</sup> gh	-1,15 × 10 <sup>-5</sup> cd	-2,56 × 10 <sup>-3</sup> defg	1,41 × 10 <sup>-4</sup> efgh	-1,95 × 10 <sup>-3</sup> fgh	4,40 × 10 <sup>-5</sup> def	1,78 × 10 <sup>-4</sup> def
0 t ha <sup>-1</sup> × 100%	-5,17 × 10 <sup>-4</sup> bcd	8,82 × 10 <sup>-5</sup> de	-2,51 × 10 <sup>-4</sup> e	8,80 × 10 <sup>-4</sup> b	-2,61 × 10 <sup>-5</sup> cd	-1,28 × 10 <sup>-3</sup> b	1,39 × 10 <sup>-4</sup> efgh	-8,79 × 10 <sup>-4</sup> b	2,85 × 10 <sup>-4</sup> bc	1,36 × 10 <sup>-4</sup> f
4 t ha <sup>-1</sup> × 0%	-3,07 × 10 <sup>-4</sup> abc	1,01 × 10 <sup>-3</sup> abc	4,77 × 10 <sup>-4</sup> abcd	-6,02 × 10 <sup>-5</sup> fgh	1,65 × 10 <sup>-6</sup> bcd	-2,51 × 10 <sup>-3</sup> defg	1,66 × 10 <sup>-4</sup> cde	-1,91 × 10 <sup>-3</sup> efgh	6,97 × 10 <sup>-5</sup> def	1,91 × 10 <sup>-4</sup> def
4 t ha <sup>-1</sup> × 33%	-6,81 × 10 <sup>-4</sup> de	1,34 × 10 <sup>-5</sup> de	-3,68 × 10 <sup>-4</sup> e	1,08 × 10 <sup>-3</sup> b	1,62 × 10 <sup>-6</sup> bcd	-1,16 × 10 <sup>-3</sup> b	1,61 × 10 <sup>-4</sup> cdef	-7,18 × 10 <sup>-4</sup> b	3,21 × 10 <sup>-4</sup> b	2,44 × 10 <sup>-4</sup> cde
4 t ha <sup>-1</sup> × 66%	-1,57 × 10 <sup>-4</sup> a	1,12 × 10 <sup>-3</sup> ab	6,55 × 10 <sup>-4</sup> abc	-7,31 × 10 <sup>-5</sup> fgh	2,35 × 10 <sup>-6</sup> bcd	-2,46 × 10 <sup>-3</sup> defg	8,91 × 10 <sup>-5</sup> h	-1,83 × 10 <sup>-3</sup> defg	-3,47 × 10 <sup>-5</sup> f	3,41 × 10 <sup>-4</sup> ab
4 t ha <sup>-1</sup> × 100%	-2,17 × 10 <sup>-4</sup> ab	1,36 × 10 <sup>-3</sup> a	8,04 × 10 <sup>-4</sup> ab	-8,15 × 10 <sup>-5</sup> fgh	-4,37 × 10 <sup>-5</sup> d	-2,74 × 10 <sup>-3</sup> fg	1,94 × 10 <sup>-4</sup> abcd	-2,22 × 10 <sup>-3</sup> h	4,37 × 10 <sup>-5</sup> def	1,51 × 10 <sup>-4</sup> ef
8 t ha <sup>-1</sup> × 0%	-2,42 × 10 <sup>-4</sup> abc	8,89 × 10 <sup>-4</sup> bc	4,33 × 10 <sup>-4</sup> bcd	-1,99 × 10 <sup>-4</sup> gh	1,20 × 10 <sup>-6</sup> bcd	-2,34 × 10 <sup>-3</sup> cde	1,25 × 10 <sup>-4</sup> efgh	-1,77 × 10 <sup>-3</sup> def	7,70 × 10 <sup>-5</sup> def	1,69 × 10 <sup>-4</sup> def
8 t ha <sup>-1</sup> × 33%	-3,45 × 10 <sup>-4</sup> abc	5,95 × 10 <sup>-4</sup> c	2,09 × 10 <sup>-4</sup> d	3,26 × 10 <sup>-4</sup> de	7,96 × 10 <sup>-6</sup> bc	-1,96 × 10 <sup>-3</sup> c	1,12 × 10 <sup>-4</sup> fgh	-1,40 × 10 <sup>-3</sup> c	1,01 × 10 <sup>-4</sup> de	3,48 × 10 <sup>-4</sup> ab
8 t ha <sup>-1</sup> × 66%	-5,59 × 10 <sup>-4</sup> cd	1,20 × 10 <sup>-4</sup> d	-2,48 × 10 <sup>-4</sup> e	8,45 × 10 <sup>-4</sup> bc	-3,57 × 10 <sup>-5</sup> d	-1,33 × 10 <sup>-3</sup> b	1,46 × 10 <sup>-4</sup> defg	-9,08 × 10 <sup>-4</sup> b	3,01 × 10 <sup>-4</sup> b	1,59 × 10 <sup>-4</sup> ef
8 t ha <sup>-1</sup> × 100%	-3,47 × 10 <sup>-4</sup> abc	1,21 × 10 <sup>-3</sup> ab	6,54 × 10 <sup>-4</sup> abc	1,20 × 10 <sup>-4</sup> defg	-1,34 × 10 <sup>-5</sup> cd	-2,62 × 10 <sup>-3</sup> efg	2,29 × 10 <sup>-4</sup> a	-2,14 × 10 <sup>-3</sup> gh	1,30 × 10 <sup>-4</sup> de	1,48 × 10 <sup>-4</sup> ef
16 t ha <sup>-1</sup> × 0%	-1,16 × 10 <sup>-4</sup> a	1,37 × 10 <sup>-3</sup> a	8,37 × 10 <sup>-4</sup> a	-2,51 × 10 <sup>-4</sup> h	-4,76 × 10 <sup>-5</sup> d	-2,75 × 10 <sup>-3</sup> g	1,71 × 10 <sup>-4</sup> bcde	-2,18 × 10 <sup>-3</sup> gh	3,22 × 10 <sup>-5</sup> def	1,37 × 10 <sup>-4</sup> f
16 t ha <sup>-1</sup> × 33%	-3,80 × 10 <sup>-4</sup> abcd	1,06 × 10 <sup>-3</sup> ab	5,31 × 10 <sup>-4</sup> abcd	9,44 × 10 <sup>-5</sup> efgh	6,72 × 10 <sup>-6</sup> bcd	-2,52 × 10 <sup>-3</sup> defg	2,19 × 10 <sup>-4</sup> ab	-1,92 × 10 <sup>-3</sup> fgh	7,70 × 10 <sup>-5</sup> def	2,11 × 10 <sup>-4</sup> def
16 t ha <sup>-1</sup> × 66%	-1,01 × 10 <sup>-3</sup> e	-3,30 × 10 <sup>-4</sup> e	-7,22 × 10 <sup>-4</sup> f	1,57 × 10 <sup>-3</sup> a	4,12 × 10 <sup>-6</sup> bcd	-7,07 × 10 <sup>-4</sup> a	2,33 × 10 <sup>-4</sup> a	-2,96 × 10 <sup>-4</sup> a	4,90 × 10 <sup>-4</sup> a	2,63 × 10 <sup>-4</sup> bcd
16 t ha <sup>-1</sup> × 100%	-3,94 × 10 <sup>-4</sup> abcd	9,83 × 10 <sup>-4</sup> abc	4,55 × 10 <sup>-4</sup> abcd	3,56 × 10 <sup>-4</sup> de	2,40 × 10 <sup>-4</sup> a	-2,21 × 10 <sup>-3</sup> cd	1,49 × 10 <sup>-4</sup> def	-1,56 × 10 <sup>-3</sup> cde	7,14 × 10 <sup>-5</sup> def	4,36 × 10 <sup>-4</sup> a
Significancia	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
CV (%) <sup>x</sup>	-28,15	18,23	25,04	37,43	142,59	-5,97	10,34	-7,33	32,33	13,26

<sup>1</sup>Los datos representan el promedio de 3 muestras por tratamiento (n = 3). ., \* y \*\*\* difieren significativamente en 0,05, 0,01 y 0,001. Las mismas letras dentro de la columna indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a p ≤ 0,05. <sup>x</sup> Coeficiente de variación.

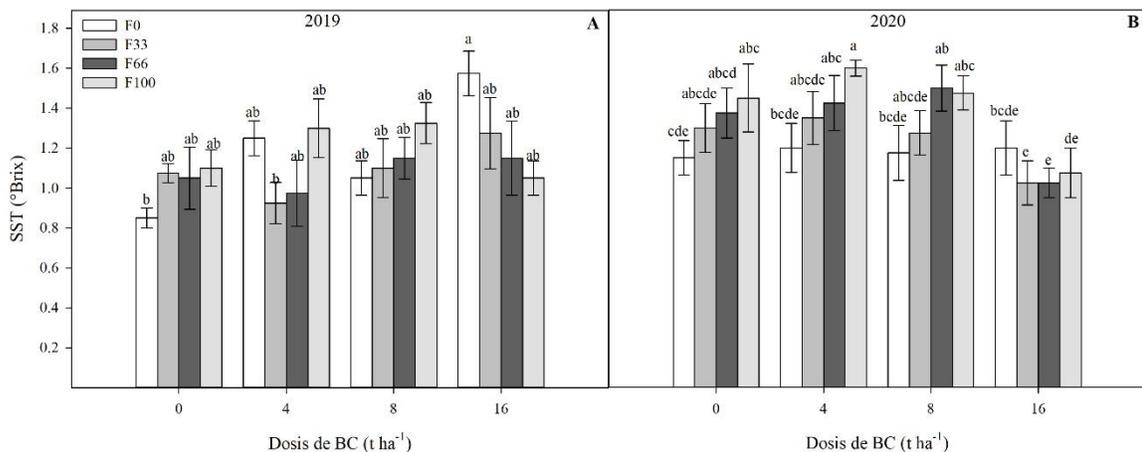
**Tabla 15.** Resumen del análisis de la varianza del efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) sobre los sensores de la Nariz Electrónica en granos tostados de café durante el año 2020.

Tratamiento	W1C	W5C	W3C	W5S	W6S	W1S	W1W	W2S	W2W	W3S
Biocarbón										
0 t ha <sup>-1</sup>	-2,17 × 10 <sup>-3</sup> c	-2,21 × 10 <sup>-3</sup> c	-2,35 × 10 <sup>-3</sup> c	-2,07 × 10 <sup>-3</sup> b	-2,50 × 10 <sup>-5</sup> c	2,54 × 10 <sup>-3</sup> a	2,04 × 10 <sup>-4</sup> a	4,57 × 10 <sup>-3</sup> a	1,07 × 10 <sup>-3</sup> a	5,43 × 10 <sup>-5</sup> c
4 t ha <sup>-1</sup>	-1,03 × 10 <sup>-3</sup> b	-1,09 × 10 <sup>-3</sup> b	-1,18 × 10 <sup>-3</sup> b	-2,05 × 10 <sup>-3</sup> b	6,58 × 10 <sup>-5</sup> b	-1,98 × 10 <sup>-4</sup> c	7,44 × 10 <sup>-5</sup> c	1,88 × 10 <sup>-3</sup> c	5,51 × 10 <sup>-4</sup> c	2,92 × 10 <sup>-4</sup> b
8 t ha <sup>-1</sup>	-1,90 × 10 <sup>-3</sup> c	-1,95 × 10 <sup>-3</sup> c	-2,14 × 10 <sup>-3</sup> c	-9,42 × 10 <sup>-4</sup> a	1,52 × 10 <sup>-4</sup> a	1,50 × 10 <sup>-3</sup> b	1,13 × 10 <sup>-4</sup> b	3,54 × 10 <sup>-3</sup> b	7,57 × 10 <sup>-4</sup> b	4,72 × 10 <sup>-4</sup> a
16 t ha <sup>-1</sup>	-6,63 × 10 <sup>-4</sup> a	-7,62 × 10 <sup>-4</sup> a	-8,43 × 10 <sup>-4</sup> a	-2,11 × 10 <sup>-3</sup> b	-2,60 × 10 <sup>-5</sup> d	-7,34 × 10 <sup>-4</sup> d	3,82 × 10 <sup>-5</sup> d	8,64 × 10 <sup>-4</sup> d	2,85 × 10 <sup>-4</sup> d	-3,61 × 10 <sup>-6</sup> d
Significancia	***	***	***	*	***	***	***	***	***	***
Nivel de fertilización										
0%	-1,06 × 10 <sup>-3</sup> a	-1,10 × 10 <sup>-3</sup> a	-1,18 × 10 <sup>-3</sup> a	-2,53 × 10 <sup>-3</sup> c	-3,85 × 10 <sup>-5</sup> b	3,27 × 10 <sup>-4</sup> c	9,91 × 10 <sup>-5</sup>	2,23 × 10 <sup>-3</sup> bc	5,16 × 10 <sup>-4</sup> b	4,13 × 10 <sup>-5</sup> b
33%	-1,70 × 10 <sup>-3</sup> b	-1,81 × 10 <sup>-3</sup> b	-1,96 × 10 <sup>-3</sup> b	-6,05 × 10 <sup>-4</sup> a	5,82 × 10 <sup>-5</sup> a	1,11 × 10 <sup>-3</sup> a	1,07 × 10 <sup>-4</sup>	2,95 × 10 <sup>-3</sup> a	7,32 × 10 <sup>-4</sup> a	2,46 × 10 <sup>-4</sup> a
66%	-1,13 × 10 <sup>-3</sup> a	-1,14 × 10 <sup>-3</sup> a	-1,24 × 10 <sup>-3</sup> a	-2,60 × 10 <sup>-3</sup> c	-1,16 × 10 <sup>-5</sup> b	3,71 × 10 <sup>-4</sup> bc	1,04 × 10 <sup>-4</sup>	2,19 × 10 <sup>-3</sup> c	5,68 × 10 <sup>-4</sup> ab	5,12 × 10 <sup>-5</sup> b
100%	-1,56 × 10 <sup>-3</sup> b	-1,63 × 10 <sup>-3</sup> b	-1,77 × 10 <sup>-3</sup> b	-1,75 × 10 <sup>-3</sup> b	7,66 × 10 <sup>-5</sup> a	7,33 × 10 <sup>-4</sup> ab	1,01 × 10 <sup>-4</sup>	2,68 × 10 <sup>-3</sup> ab	7,20 × 10 <sup>-4</sup> a	2,75 × 10 <sup>-5</sup> a
Significancia	***	***	***	***	***	***	NS	***	**	***
Interacción										
0 t ha <sup>-1</sup> × 0%	-1,92 × 10 <sup>-3</sup> bcd	-1,92 × 10 <sup>-3</sup> cdef	-2,05 × 10 <sup>-3</sup> cde	-3,60 × 10 <sup>-3</sup> de	-3,47 × 10 <sup>-5</sup> cd	2,26 × 10 <sup>-3</sup> abc	1,98 × 10 <sup>-4</sup> abc	4,27 × 10 <sup>-3</sup> abc	9,32 × 10 <sup>-4</sup> abcd	-3,67 × 10 <sup>-5</sup> fg
0 t ha <sup>-1</sup> × 33%	-2,73 × 10 <sup>-3</sup> e	-2,91 × 10 <sup>-3</sup> g	-3,06 × 10 <sup>-3</sup> f	1,74 × 10 <sup>-3</sup> a	-4,20 × 10 <sup>-6</sup> bcd	3,22 × 10 <sup>-3</sup> a	2,05 × 10 <sup>-4</sup> ab	5,17 × 10 <sup>-3</sup> a	1,28 × 10 <sup>-3</sup> ab	2,17 × 10 <sup>-4</sup> e
0 t ha <sup>-1</sup> × 66%	-2,38 × 10 <sup>-3</sup> cde	-2,38 × 10 <sup>-3</sup> defg	-2,52 × 10 <sup>-3</sup> def	-2,80 × 10 <sup>-3</sup> cde	-5,69 × 10 <sup>-5</sup> d	3,23 × 10 <sup>-3</sup> a	2,40 × 10 <sup>-4</sup> a	5,07 × 10 <sup>-3</sup> a	1,31 × 10 <sup>-3</sup> a	-1,94 × 10 <sup>-4</sup> hi
0 t ha <sup>-1</sup> × 100%	-1,64 × 10 <sup>-3</sup> b	-1,64 × 10 <sup>-3</sup> c	-1,78 × 10 <sup>-3</sup> c	-3,63 × 10 <sup>-3</sup> e	-4,20 × 10 <sup>-6</sup> bcd	1,47 × 10 <sup>-3</sup> bcd	1,72 × 10 <sup>-4</sup> abcd	3,76 × 10 <sup>-3</sup> bc	7,60 × 10 <sup>-4</sup> cd	2,31 × 10 <sup>-4</sup> e
4 t ha <sup>-1</sup> × 0%	1,69 × 10 <sup>-4</sup> a	1,79 × 10 <sup>-4</sup> a	1,91 × 10 <sup>-4</sup> a	-3,30 × 10 <sup>-3</sup> de	-8,80 × 10 <sup>-5</sup> d	-1,85 × 10 <sup>-3</sup> e	2,80 × 10 <sup>-5</sup> gh	-9,13 × 10 <sup>-5</sup> d	4,76 × 10 <sup>-5</sup> h	-8,21 × 10 <sup>-5</sup> igh
4 t ha <sup>-1</sup> × 33%	-1,84 × 10 <sup>-3</sup> bcd	-1,90 × 10 <sup>-3</sup> cdef	-2,10 × 10 <sup>-3</sup> cde	-9,74 × 10 <sup>-4</sup> bc	2,06 × 10 <sup>-4</sup> a	9,03 × 10 <sup>-4</sup> d	9,19 × 10 <sup>-5</sup> fgh	3,12 × 10 <sup>-3</sup> c	7,81 × 10 <sup>-4</sup> bcd	6,31 × 10 <sup>-4</sup> a
4 t ha <sup>-1</sup> × 66%	-1,91 × 10 <sup>-4</sup> a	-1,59 × 10 <sup>-4</sup> ab	-1,89 × 10 <sup>-4</sup> ab	-3,54 × 10 <sup>-3</sup> de	-9,27 × 10 <sup>-5</sup> d	-1,39 × 10 <sup>-3</sup> e	5,27 × 10 <sup>-5</sup> fgh	6,06 × 10 <sup>-4</sup> d	1,57 × 10 <sup>-4</sup> gh	2,91 × 10 <sup>-5</sup> f
4 t ha <sup>-1</sup> × 100%	-2,26 × 10 <sup>-3</sup> bcde	-2,46 × 10 <sup>-3</sup> efg	-2,61 × 10 <sup>-3</sup> def	-3,85 × 10 <sup>-4</sup> ab	2,38 × 10 <sup>-4</sup> a	1,54 × 10 <sup>-3</sup> bcd	1,25 × 10 <sup>-4</sup> cdef	3,88 × 10 <sup>-3</sup> bc	1,22 × 10 <sup>-3</sup> abc	5,89 × 10 <sup>-4</sup> ab
8 t ha <sup>-1</sup> × 0%	-2,39 × 10 <sup>-3</sup> de	-2,51 × 10 <sup>-3</sup> fg	-2,68 × 10 <sup>-3</sup> ef	-1,24 × 10 <sup>-4</sup> ab	9,80 × 10 <sup>-5</sup> abc	2,54 × 10 <sup>-3</sup> ab	1,53 × 10 <sup>-4</sup> bcde	4,71 × 10 <sup>-3</sup> ab	9,97 × 10 <sup>-4</sup> abcd	4,01 × 10 <sup>-4</sup> d
8 t ha <sup>-1</sup> × 33%	-1,71 × 10 <sup>-3</sup> bc	-1,72 × 10 <sup>-3</sup> cde	-1,90 × 10 <sup>-3</sup> cd	-1,47 × 10 <sup>-3</sup> bcde	1,40 × 10 <sup>-4</sup> ab	1,25 × 10 <sup>-3</sup> cd	1,01 × 10 <sup>-4</sup> efg	3,29 × 10 <sup>-3</sup> c	6,30 × 10 <sup>-4</sup> defg	4,55 × 10 <sup>-4</sup> cd
8 t ha <sup>-1</sup> × 66%	-1,70 × 10 <sup>-3</sup> bc	-1,69 × 10 <sup>-3</sup> cd	-1,90 × 10 <sup>-3</sup> cd	-1,31 × 10 <sup>-3</sup> bcde	1,69 × 10 <sup>-4</sup> a	1,10 × 10 <sup>-3</sup> cd	1,07 × 10 <sup>-4</sup> def	3,03 × 10 <sup>-3</sup> c	6,93 × 10 <sup>-4</sup> def	4,92 × 10 <sup>-4</sup> bcd
8 t ha <sup>-1</sup> × 100%	-1,82 × 10 <sup>-3</sup> bcd	-1,87 × 10 <sup>-3</sup> cdef	-2,07 × 10 <sup>-3</sup> cde	-8,70 × 10 <sup>-4</sup> bc	2,01 × 10 <sup>-4</sup> a	1,10 × 10 <sup>-3</sup> d	9,24 × 10 <sup>-5</sup> efgh	3,14 × 10 <sup>-3</sup> c	7,08 × 10 <sup>-4</sup> de	5,42 × 10 <sup>-4</sup> abc
16 t ha <sup>-1</sup> × 0%	-7,68 × 10 <sup>-5</sup> a	-1,36 × 10 <sup>-4</sup> ab	-1,58 × 10 <sup>-4</sup> ab	-3,08 × 10 <sup>-3</sup> cde	-1,29 × 10 <sup>-4</sup> d	-1,64 × 10 <sup>-3</sup> e	1,79 × 10 <sup>-5</sup> h	4,03 × 10 <sup>-5</sup> d	8,57 × 10 <sup>-5</sup> h	-1,17 × 10 <sup>-4</sup> gh
16 t ha <sup>-1</sup> × 33%	-5,08 × 10 <sup>-4</sup> a	-7,29 × 10 <sup>-4</sup> b	-7,72 × 10 <sup>-4</sup> b	-1,72 × 10 <sup>-3</sup> bcde	-1,10 × 10 <sup>-4</sup> d	-9,39 × 10 <sup>-4</sup> e	2,80 × 10 <sup>-5</sup> gh	2,17 × 10 <sup>-4</sup> d	2,34 × 10 <sup>-4</sup> efgh	-3,18 × 10 <sup>-4</sup> j
16 t ha <sup>-1</sup> × 66%	-2,50 × 10 <sup>-4</sup> a	-3,12 × 10 <sup>-4</sup> ab	-3,69 × 10 <sup>-4</sup> ab	-2,76 × 10 <sup>-3</sup> cde	-6,55 × 10 <sup>-5</sup> d	-1,46 × 10 <sup>-3</sup> e	1,43 × 10 <sup>-5</sup> h	6,39 × 10 <sup>-5</sup> d	1,14 × 10 <sup>-4</sup> h	-1,22 × 10 <sup>-4</sup> gh
16 t ha <sup>-1</sup> × 100%	-5,11 × 10 <sup>-4</sup> a	-5,67 × 10 <sup>-4</sup> ab	-6,14 × 10 <sup>-4</sup> b	-2,10 × 10 <sup>-3</sup> bcde	-1,27 × 10 <sup>-4</sup> d	-1,18 × 10 <sup>-3</sup> e	1,54 × 10 <sup>-5</sup> h	-3,87 × 10 <sup>-5</sup> d	1,92 × 10 <sup>-4</sup> fgh	-2,61 × 10 <sup>-4</sup> ij
Significancia	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
CV (%) <sup>x</sup>	-15,26	-15,64	-14,19	-35,83	178,07	55,06	23,99	16,02	24,24	25,42

<sup>1</sup>Los datos representan el promedio de 3 muestras por tratamiento (n = 3). \*, \*\* y \*\*\* difieren significativamente en 0,05, 0,01 y 0,001. Las mismas letras dentro de la columna indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a p ≤ 0,05.<sup>x</sup> Coeficiente de variación.

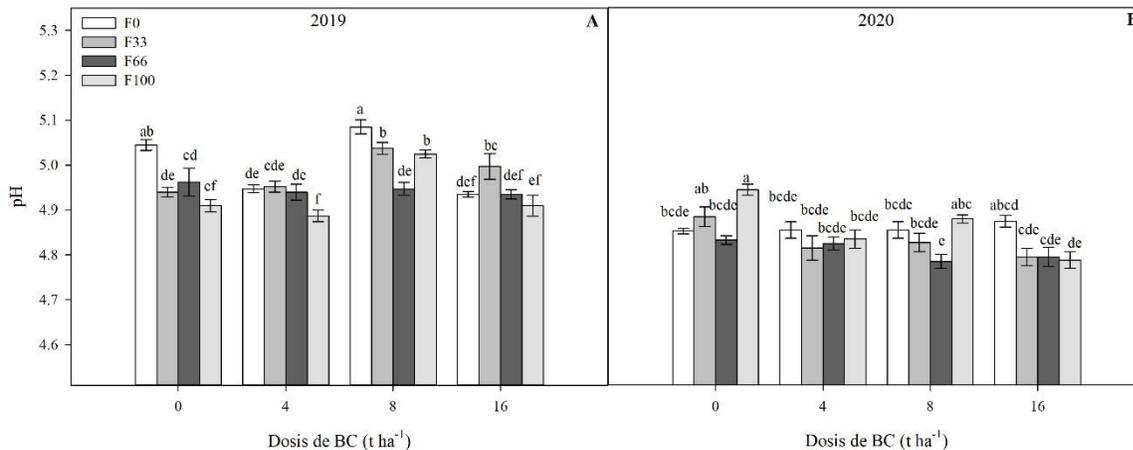
### 6.3.2 Atributos de calidad de grano de café

La **Figura 24** resume las diferencias en la interacción de las dosis de BC y los niveles de FQ ( $P \leq 0,05$ ) sobre el contenido de sólidos solubles totales (SST) en los dos periodos de evaluación (año 2019 y 2020). En resumen, los árboles tratados con  $0 \text{ t ha}^{-1}$  BC + 0% NF registraron los menores contenidos de SST (año 2019 =  $0,85 \text{ }^\circ\text{Brix}$  y año 2020 =  $1,15 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ) en comparación con los demás tratamientos en los dos años de evaluación. En general, el SST fue mayor en árboles de café tratados con un 66% y 100 % FQ en las diferentes dosis de BC con respecto a árboles sin fertilizantes en ambos años excepto en los árboles tratados con  $16 \text{ t ha}^{-1}$  BC durante el 2019 y 0% FQ, los cuales registraron los valores más altos de SST (aprox.  $1,57 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ) (**Figura 24A**). Un incremento fue observado en el contenido SST de los diferentes tratamientos de BC con respecto a las aplicaciones graduales de FQ en el año 2020 (FQ 0%:  $1,19 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ; FQ 33%:  $1,22 \text{ }^\circ\text{Brix}$ ; FQ 66%:  $1,32 \text{ }^\circ\text{Brix}$  y FQ 100%:  $1,38 \text{ }^\circ\text{Brix}$ , respectivamente); excepto para las bebidas de los tratamientos que contaron con  $16 \text{ t ha}^{-1}$  BC, cuyos valores más altos fueron registrados con 0% de nivel de fertilización (FQ 0%:  $1,20 \text{ }^\circ\text{Brix}$  vs FQ 100%:  $1,08 \text{ }^\circ\text{Brix}$ , respectivamente) (**Figura 24B**).



**Figura 24.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón ( $0, 4, 8$  y  $16 \text{ t ha}^{-1}$ ) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre los sólidos solubles totales (SST) de la bebida de granos de café en los años 2019 (A) y 2020 (B). Los putos representan  $\pm$  error estándar ( $n = 4$ ). Las barras representan la media de cuatro bloques  $\pm$  error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$

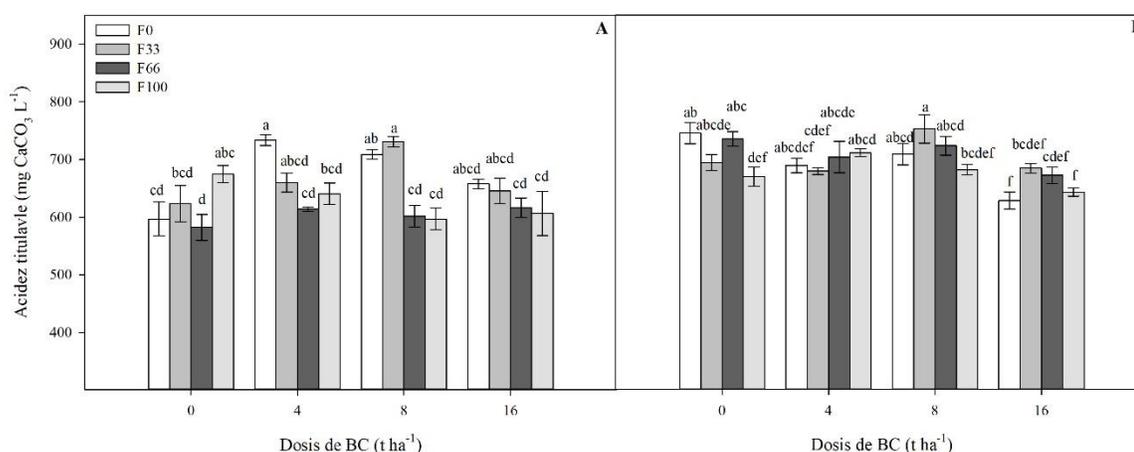
Diferencias también fueron encontradas entre los tratamientos de dosis de BC y nivel de FQ sobre el pH de la bebida de café (**Figura 25**). En general, el año 2019 presentó valores de pH más altos con respecto al año 2020 entre los diferentes tratamientos evaluados (4,97 vs 4,84). En adición, aplicaciones de 8 t ha BC registraron los valores más altos en pH de las bebidas de café; sin embargo, con la aplicación gradual de los diferentes niveles de fertilización el pH evidenció una reducción para este tratamiento (FQ 0%: 5,09; FQ 33%: 5,04; FQ 66%: 4,95 y FQ 100%: 4,93, respectivamente) (**Figura 25A**). En cuanto al año 2020, el pH de las bebidas de café de los tratamientos 0 y 8 t ha<sup>-1</sup> + 100% FQ (4,95, 4,88, respectivamente) y 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 0% FQ (aprox. 4,88) registraron los valores más altos. Adicionalmente, aplicaciones de 4 t ha<sup>-1</sup> BC presentó valores similares de pH entre los diferentes niveles de FQ (4,83); mientras que el pH de las bebidas de café preparadas con los granos de los tratamientos de 16 t ha<sup>-1</sup> BC + 33%, 66% y 100% FQ fue de alrededor de 4,79 (**Figura 25B**).



**Figura 25.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre el pH de la bebida de granos de café en los años 2019 (A) y 2020 (B). Los putos representan ± error estándar (n = 4). Las barras representan la media de cuatro bloques ± error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$

El análisis de varianza muestra que diferencias significativas fueron encontradas entre los tratamientos de BC y niveles de FQ sobre la acidez titulable en los años 2019 y 2020 (**Figura 26**). En general, las bebidas de granos de café tostados cuyos árboles fueron tratados con 0 t ha<sup>-1</sup> BC registraron un incremento en la acidez titulable con aplicaciones

graduales de FQ, especialmente con 100% NF (FQ 0%: 596,79 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> vs FQ 100%: 674,74 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, respectivamente). No obstante, aplicaciones graduales de BC (4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) mostraron altos valores en acidez titulable, especialmente, con bajos niveles de FQ (FQ 0%: 699,91 CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> y FQ 33%: 678,80 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, respectivamente) (**Figura 26A**). No obstante, bebidas de café preparadas con granos cosechados de árboles tratados con 0 t ha<sup>-1</sup> BC mostraron altos valores en acidez titulable, especialmente cuando contaron con 0% FQ en el año 2020 (**Figura 26B**). Una reducción en la acidez titulable fue registrada con respecto a la aplicación gradual entre el 33% y 100% de la fertilización química, especialmente en los tratamientos que contaron con 0, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> BC (FQ 33%: 718,58 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, FQ 66% 697,88 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> y 662,56 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, respectivamente).



**Figura 26.** Efecto de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón (0, 4, 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) y niveles de fertilización (0%, 33%, 66% y 100% de los requerimientos nutricionales) sobre la acidez titulable de la bebida de granos de café en los años 2019 (A) y 2020 (B). Los putos representan ± error estándar (n = 4). Las barras representan la media de cuatro bloques ± error estándar. Las mismas letras indican que las medias no son estadísticamente diferentes según prueba de Tuckey a  $p \leq 0,05$

Finalmente, la **Tabla 16** muestra los coeficientes ( $r$ ) que describen el grado de correlación entre las variables de calidad de la bebida de café y el perfil aromático obtenido por los sensores W1C, W5C y W3C de la Nariz Electrónica para los años 2019 y 2020. En resumen, los efectos de la aplicación de BC y NF fueron más significativos en el segundo año de evaluación (2020). En este sentido, W1C en respuesta a la aplicación de BC y NF mostró fuertes correlaciones positivas y significativas con W5C y W3C. No obstante, en el presente estudio, el contenido de SST, pH y acidez titulable tuvieron correlaciones débiles

positivas y no significativas ( $r < 0,3$ ,  $P > 0,05$ ) con respecto a la respuesta de los sensores de la nariz electrónica en granos de café árboles tratados con BC de pulpa de café y diferentes niveles de fertilización química en el año 2019. Respecto al año 2020, similares tendencias fueron registradas en W1C en respuesta a la aplicación de BC y NF (fuertes correlaciones positivas y significativas con W5C y W3C). En adición, el contenido de SST y acidez titulable tuvieron correlaciones negativas y significativas con W1C, W5C y W3C, indicando una correlación inversamente proporcional entre estas variables con respecto a la aplicación de BC y FQ.

**Tabla 16.** Coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) entre los diferentes atributos de calidad de taza y sensores de la nariz electrónica en respuesta a la aplicación de biocarbón y niveles de fertilización en árboles de café.

	2019				
	W1C	W3C	W5C	°Brix	pH
W3C	<b>0,881<sup>***</sup></b>				
W5C	<b>0,841<sup>***</sup></b>	<b>0,996<sup>***</sup></b>			
SST	0,089 <sup>NS</sup>	0,169 <sup>NS</sup>	0,191 <sup>NS</sup>		
pH	0,110 <sup>NS</sup>	0,079 <sup>NS</sup>	0,053 <sup>NS</sup>	-0,264 <sup>NS</sup>	
Acidez titulable	0,159 <sup>NS</sup>	0,202 <sup>NS</sup>	0,204 <sup>NS</sup>	0,167 <sup>NS</sup>	0,149 <sup>NS</sup>
	2020				
	W1C	W3C	W5C	°Brix	pH
W3C	<b>0,997<sup>***</sup></b>				
W5C	<b>0,996<sup>***</sup></b>	<b>0,999<sup>***</sup></b>			
SST	<b>-0,332<sup>*</sup></b>	<b>-0,321<sup>*</sup></b>	<b>-0,312<sup>*</sup></b>		
pH	-0,062 <sup>NS</sup>	-0,047 <sup>NS</sup>	-0,054 <sup>NS</sup>	0,055 <sup>NS</sup>	
Acidez titulable	<b>-0,436<sup>**</sup></b>	<b>-0,409<sup>**</sup></b>	<b>-0,405<sup>*</sup></b>	0,111 <sup>NS</sup>	-0,176 <sup>NS</sup>

<sup>\*</sup>, <sup>\*\*</sup> y <sup>\*\*\*</sup> difieren significativamente en 0,05, 0,01 y 0,001.

## 6.4 Discusión

Los nutrientes presentes en el suelo juegan un papel clave para el crecimiento y desarrollo de las plantas, y en la calidad del café (Yadessa *et al.*, 2019). Numerosos estudios han reportado que la aplicación conjunta de biocarbón y fertilizantes químicos mejora el rendimiento y la calidad de cultivos como hierba amarga *Andrographis paniculata* (Saha *et al.*, 2019), tomate (*Solanum lycopersicum*) (Ronga *et al.*, 2020), arándano (*Vaccinium myrtillus*) (Zhang *et al.*, 2020), soya (*Glycine max*) (Qian *et al.*, 2019), maíz (*Zea mays*) y

trigo (*Triticum aestivum*) (Ali *et al.*, 2015), entre otros. En la presente investigación, se encontró que árboles de café con enmiendas de BC (principalmente con dosis de 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>) favoreció los compuestos volátiles de granos de café tostados y parámetros de calidad en taza como el contenido de sólidos solubles totales, pH, acidez titulable; especialmente, con niveles de fertilización química entre el 66 y 100% de los requerimientos nutricionales. Además, dichas respuestas fueron más significativas en el segundo año del ensayo (2020). En este sentido, estudios recientes han concluido que el aumento en el rendimiento y parámetros de calidad de los cultivos como respuesta a la aplicación de BC es debida principalmente como una consecuencia a la mejora general de las propiedades del suelo generando un incremento en la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Saha *et al.*, 2019; Ronga *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2020).

Se ha reportado que los compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles del aroma acumulado en el espacio de cabeza donde miden los sensores de la nariz electrónica aportan significativamente al flavor del producto (Zuluaga-Dominguez *et al.*, 2017). En adición, Rodriguez *et al.* (2010) mencionan que la nariz electrónica se puede utilizar para el control de calidad en el sector cafetero, ya que permite clasificar diferentes muestras de café con defectos en la taza. En este sentido, los resultados de la presente investigación muestran que una mayor sensibilidad a los compuestos aromáticos de granos tostados de café fue evidenciada en los sensores W1C, W3C y W5C, los cuales estuvieron asociados a los tratamientos que contaron con enmiendas de BC entre 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> y FQ entre el 66% y 100% en 2019 y 2020, respectivamente (**Figura 22** y **Figura 23**). Dong *et al.* (2019) observaron similares tendencias en la clasificación de perfiles aromáticos de café tratados con diferentes métodos de secado, evidenciando que tres sensores de la nariz electrónica usados en el análisis presentaron mayor influencia en la capacidad de diferenciación de las muestras de café. También, Makimori y Bona, 2019 indican que la nariz electrónica pudo discriminar diferentes productos de café instantáneo, sugiriendo que puede ser una técnica con potencial aplicación en la industria del café como una herramienta rápida y eficiente en el control de calidad aromático.

Con respecto a los sólidos solubles totales, se ha reportado que ha sido utilizado como un criterio importante para evaluar la calidad del café que influye en las propiedades sensoriales de una infusión de café como el "cuerpo", "sensación en la boca" o "textura", mientras que los ácidos orgánicos regulan el pH y afectan el sabor del café (Dong *et al.*,

2017). En este sentido, nuestros resultados indican que los valores más bajos en SST fueron encontrados en los granos de café cuyos árboles contaron con bajos niveles de enmiendas de BC ( $0 \text{ t ha}^{-1}$ ) y FQ (0%); mientras que árboles de café que contaron con aplicaciones de 8 y  $16 \text{ t ha}^{-1}$  y 33% y 100% de FQ registraron mayor cantidad. Similares tendencias fueron encontradas en frutos de tomate (Ronga *et al.*, 2020), las cuales mostraron un incremento en SST y pH en plantas tratadas con biocarbón (dosis no aclarada por los autores) obtenido a partir de residuos de podas de viñedo. Los autores sugieren que estos resultados se deben a una asimilación más rápida de nitrógeno durante el ciclo de crecimiento del cultivo. En cuanto al pH, Sivetz y Desrosier (1979) indican que para los granos de café sin atributos de amargo ni acidez, los valores de pH deben estar entre 4,95 y 5,20. Los resultados de la presente investigación indican que para el año 2019 se encontraron en dicho rango, especialmente para los tratamientos que contaron con  $8 \text{ t ha}^{-1}$  BC; mientras que para el 2020 fueron ligeramente inferiores. No obstante, nuestros resultados concuerdan con lo reportado por Puerta-Quintero (2000), quién evaluó los atributos de calidad en taza de diferentes mezclas de variedades café (*Coffea arabica*) tostado y concluyó que el pH de las mejores mezclas varió entre 4,6 y 4,8, la acidez titulable fue en un rango de 820 a  $1000 \text{ mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  bebida y finalmente, los SST aproximadamente entre 1,25 y  $1,65 \text{ g} / 100 \text{ g}$ .

La información obtenida de esta investigación indica una serie de ventajas para el cultivo del café desde la perspectiva del manejo de la nutrición del cultivo mediante el uso de BC como complemento de la fertilización química y sus efectos sobre las variables de calidad del grano de café. Es importante señalar que la co-aplicación de BC con fertilizantes de síntesis química es una alternativa interesante que se ha implementado en otras especies cultivadas con el objetivo de incrementar el rendimiento de las plantas y mejorar la calidad de los órganos cosechados (Qian *et al.*, 2019; Ye *et al.*, 2019; Ronga *et al.*, 2020), lo cual está acorde con las tendencias similares registradas en los granos tostados de café. Otra contribución interesante de esta investigación es que el uso de BC puede mejorar la calidad de los granos de café evidenciada en un mayor contenido de SST y acidez titulable en las bebidas de café, probablemente debido al manejo nutricional de los árboles, especialmente en co-aplicación con la fertilización química. Nuestros resultados sirven como soporte para recomendar la obtención de BC a partir de la pulpa de café a través del proceso de pirólisis y su posterior uso en suelos de las zonas cafeteras. Estas enmiendas con BC han

mostrado un efecto positivo en la interacción suelo-planta al favorecer el reciclaje de nutrientes, lo cual podría representar una mejora en la sostenibilidad del cultivo (Moreira *et al.*, 2017; Das *et al.*, 2020; Razzaghi *et al.*, 2020).

En conclusión, la co-aplicación de BC obtenido a partir de la pirólisis de pulpa de café como un complemento a la fertilización química mostró un efecto positivo sobre el perfil aromático obtenido para los granos tostados de café y atributos de calidad en taza. La aplicación de 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> acompañadas con niveles de fertilización química de 66 y 100% de los requerimientos nutricionales incrementó el contenido de SST, redujo el pH e incrementó la acidez titulable en bebidas de granos de café variedad Castillo el Tambo. Nuestros resultados sugieren que el uso de BC producido con pulpa de café, especialmente entre 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>, puede ser una alternativa como complemento de la nutrición mineral de cultivos comerciales de café; en adición, ayuda al aprovechamiento de residuos provenientes de la misma cadena productiva y permite mitigar el uso de fertilizantes químicos en un mediano plazo. Finalmente, el análisis de componentes principales permitió identificar los sensores de la nariz electrónica más sensibles a los grupos funcionales correspondientes a compuestos volátiles de granos tostados de café y ayudaron al estudio de los efectos de las aplicaciones de diferentes dosis de BC y niveles de fertilización química en árboles de café. La aceptación de esta metodología en la producción de café podría representar un enfoque original para caracterizar acorde al estado nutricional del cultivo, ayudando en factores enfocados a la calidad y la trazabilidad.

## 6.5 Bibliografía

- Agbede, T. M., Adekiya, A. O., Odoja, A. S., Bayode, L. N., Omotehinse, P. O., & Adepehin, I. (2020). Effects of biochar and poultry manure on soil properties, growth, quality, and yield of cocoyam (*Xanthosoma sagittifolium* Schott) in degraded tropical sandy soil. *Experimental Agriculture*, 56(4), 528-543.
- Ali, K., Arif, M., Jan, M. T., Khan, M. J., & Jones, D. L. (2015). Integrated use of Biochar: A tool for improving soil and wheat quality of degraded soil under wheat-maiza cropping pattern. *Pakistan Journal of Botany*, 47(1), 233-240.
- Almaroai, Y. A., & Eissa, M. A. (2020). Effect of biochar on yield and quality of tomato grown on a metal-contaminated soil. *Scientia Horticulturae*, 265, 109210.

- Anderson, R., P.E. Bayer y D. Edwards. 2020. Climate change and the need for agricultural adaptation. *Current opinion in plant biology*, 56, 197-202.
- Binda, G., D. Spanu, R. Bettinetti, L. Magagnin, A. Pozzi y C. Dossi. 2020. Comprehensive comparison of microalgae-derived biochar from different feedstocks: A prospective study for future environmental applications. *Algal Research*, 52, 102103.
- Bommaraju, B.K. 2016. Use of biochar and compost as substrate alternatives in coffee plant production (Tesis de maestría). Università di Bologna. Italia.
- Castro, E., M. Quicazán, A. Mojica y C. Zuluaga-Domínguez. 2021. Bioactive and physicochemical profile of honey collected from Colombian organic and conventional coffee growing areas. *Journal of Apicultural Research*, 1-12.
- Chandio, A.A., Y. Jiang, A. Rehman y A. Rauf. 2020. Short and long-run impacts of climate change on agriculture: an empirical evidence from China. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*.
- Chemura, A., B.T. Mudereri, A.W. Yalew y C. Gornott. 2021. Climate change and specialty coffee potential in Ethiopia. *Scientific reports*, 11(1), 1-13.
- Chinchilla-Soto, C., A.M. Durán-Quesada, M. Monge-Muñoz y M.V. Gutiérrez-Soto. 2021. Quantifying the annual cycle of water use efficiency, energy and CO<sub>2</sub> fluxes using micrometeorological and physiological techniques for a coffee field in Costa Rica. *Forests*, 12(7), 889.
- Correia, P.F.C., J.G.M. Reis, F.A. Araujo, L.R. Bonette y A.E. Souza. 2020. Coffee production chain: A case study of the logistic flow of field grain for export. *NETLOG 2020*, Sao Pablo. 1-12.
- Cui, X. 2020. Climate change and adaptation in agriculture: Evidence from US cropping patterns. *Journal of Environmental Economics and Management*, 101, 102306.
- Das, S.K., G.K. Ghosh y R. Avasthe. 2020. Valorizing biomass to engineered biochar and its impact on soil, plant, water, and microbial dynamics: a review. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-17.
- Dong, W., J. Zhao, R. Hu, Y. Dong y L. Tan. 2017. Differentiation of Chinese robusta coffees according to species, using a combined electronic nose and tongue, with the aid of chemometrics. *Food chemistry*, 229, 743-751.
- Dong, W., R. Hu, Y. Long, H. Li, Y. Zhang, K. Zhu y Z. Chu. 2019. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by

- drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS. *Food chemistry*, 272, 723-731.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2021. Estadísticas cafeteras. Revisado en agosto de 2021. En: <https://federaciondefcafeteros.org/wp/179estadísticas-cafeteras/>.
- Garcia-Freites, S., M. Röder y P. Thornley. 2020. Environmental trade-offs associated with bioenergy from agri-residues in sub-tropical regions: A case study of the Colombian coffee sector. *Biomass and Bioenergy*, 140, 105581.
- Gemechu, F.G. 2020. Embracing nutritional qualities, biological activities and technological properties of coffee byproducts in functional food formulation. *Trends in Food Science & Technology*. 104, 235-261.
- Graboski, A.M., C.A. Zakrzewski, F.M. Shimizu, R.T. Paschoalin, A.C. Soares, J. Steffens y C. Steffens. 2020. Electronic nose based on carbon nanocomposite sensors for clove essential oil detection. *ACS sensors*, 5(6), 1814-1821.
- Hoseini, M., S. Cocco, C. Casucci, V. Cardelli y G. Corti. 2021. Coffee by-products derived resources. A review. *Biomass and Bioenergy*, 148, 106009.
- International Coffee Organization. 2021. Estadísticas del comercio. Revisado en septiembre del 2021. En: <https://www.ico.org/prices/po-production.pdf>
- Israel, M.A., J. Amikuzuno y G. Danso-Abbeam. 2020. Assessing farmers' contribution to greenhouse gas emission and the impact of adopting climate-smart agriculture on mitigation. *Ecological Processes*, 9(1), 1-10.
- Kizito, S., H. Luo, J. Lu, H. Bah, R. Dong y S. Wu. 2019. Role of nutrient-enriched biochar as a soil amendment during maize growth: exploring practical alternatives to recycle agricultural residuals and to reduce chemical fertilizer demand. *Sustainability*, 11(11), 3211.
- Knysak, D. 2017. Volatile compounds profiles in unroasted *Coffea arabica* and *Coffea canephora* beans from different countries. *Food Science and Technology*, 37, 444-448.
- Kyaw, E.M., I.W. Budiastra, S. Sutrisno, S. Samsudin y D.M. Mala. 2020. Prediction of caffeine content in *Liberica* coffee green bean by NIR spectroscopy using Kubelka-Munk Model. *Jurnal Tanaman Industri dan Penyegar*, 7(3), 119-126.
- Marek, G., B. Dobrzański, T. Oniszczyk, M. Combrzyński, D. Ćwikła y R. Rusinek. 2020. Detection and differentiation of volatile compound profiles in roasted coffee arabica beans from different countries using an electronic nose and GC-MS. *Sensors*, 20(7), 2124.

- Moreira, M.T., I. Noya y G. Feijoo. 2017. The prospective use of biochar as adsorption matrix—A review from a lifecycle perspective. *Bioresource technology*, 246, 135-141.
- Murthy, P.S. y M.M. Naidu. 2012. Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and recycling*, 66, 45-58.
- Norma Técnica Colombiana NTC 3566: Café verde, Preparación de muestras para análisis sensorial. 2002
- Qian, Z.H.U., L.J. Kong, Y.Z. Shan, X.D. Yao, H.J. Zhang, F.T. Xie y A.O. Xue. 2019. Effect of biochar on grain yield and leaf photosynthetic physiology of soybean cultivars with different phosphorus efficiencies. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(10), 2242-2254.
- Razzaghi, F., P.B. Obour y E. Arthur. 2020. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis. *Geoderma*, 361, 114055.
- Rodríguez, J., C. Durán y A. Reyes. 2010. Electronic nose for quality control of Colombian coffee through the detection of defects in “Cup Tests”. *Sensors*, 10(1), 36-46.
- Ronga, D., F. Caradonia, M. Parisi, G. Bezzi, B. Parisi, G. Allesina y E. Francia. 2020. Using digestate and biochar as fertilizers to improve processing tomato production sustainability. *Agronomy*, 10(1), 138.
- Rusinek, R., M. Gancarz, M. Krekora y A. Nawrocka. 2019. A novel method for generation of a fingerprint using electronic nose on the example of rapeseed spoilage. *J. Food Sci.* 84, 51–58.
- Sadeghian, S. 2013. Nutrición de cafetales. En: Manual del Cafetero Colombiano, Investigación y Tecnología para la Sostenibilidad de la Caficultura- Postcosecha y subproductos del café. Gast, F., Benavides, P., Sanz, J. R., Herrera, J. C., Ramírez, V. H., Cristancho, M. A., & Marín, S. M. Federación Nacional de Cafeteros, Cenicafé. 354 pp.
- Saha, A., B.B. Basak, N.A. Gajbhiye, K.A. Kalariya y P. Manivel. 2019. Sustainable fertilization through co-application of biochar and chemical fertilizers improves yield, quality of *Andrographis paniculata* and soil health. *Industrial Crops and Products*, 140, 111607.
- Salamanca-Jimenez, A. 2017. Coffee Crop Fertilization in Colombia: A Mini-. *International Potash Institute*, 50, 22–30.
- Sánchez-Reinoso, A.D., E.A. Ávila-Pedraza y H. Restrepo-Díaz. 2020. Use of biochar in agricultura. *Acta Biológica Colombiana*, 25(2), 327-338.

- Sivetz M. y N.W. Desrosier. 1979. *Coffee Technology*, Avi, Westport, CT, USA.
- Sørmo, E., E. Kämäräinen, Edvardsson M. y C. Maurice. 2020. Biochar for the improvement of soil and rock with acid potential. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 195, p. 06005). EDP Sciences.
- Srivatsav, P., B.S. Bhargav, V. Shanmugasundaram, J. Arun, K.P. Gopinath y A. Bhatnagar. 2020. Biochar as an eco-friendly and economical adsorbent for the removal of colorants (dyes) from aqueous environment: A review. *Water*, 12(12), 3561.
- Tassew, A.A., G.B. Yadessa, A.D. Bote y T.K. Obso. 2021. Influence of location, elevation gradients, processing methods, and soil quality on the physical and cup quality of coffee in the Kafa Biosphere Reserve of SW Ethiopia. *Heliyon*, e07790.
- Xu, M., J. Zhou y P. Zhu. 2021. An electronic nose system for the monitoring of water cane shoots quality with swarm clustering algorithm. *Journal of Food Safety*, 41(1), e12860.
- Yadessa, A., J. Burkhardt, E. Bekele, K. Hundera y H. Goldbach. 2019. The role of soil nutrient ratios in coffee quality: Their influence on bean size and cup quality in the natural coffee forest ecosystems of Ethiopia. *African Journal of Agricultural Research*, 14(35), 2090-2103.
- Yadessa, A., J. Burkhardt, E. Bekele, K. Hundera y H. Goldbach. 2020. The major factors influencing coffee quality in Ethiopia: The case of wild Arabica coffee (*Coffea arabica* L.) from its natural habitat of Southwest and Southeast Afromontane rainforests. *African Journal of Plant Science*, 14(6), 213-230.
- Yin, Y. y X. Tian. 2007. Classification of Chinese drinks by a gas sensors array and combination of the PCA with Wilks distribution. *Sensors and Actuators B* 124: 393–397.
- Zhang, Y., X. Wang, B. Liu, Q. Liu, H. Zheng, X. You y F. Li. 2020. Comparative study of individual and Co-Application of biochar and wood vinegar on blueberry fruit yield and nutritional quality. *Chemosphere*, 246, 125699.
- Zuluaga-Domínguez, C.M., A. Nieto-Velozá y M. Quicazán-de-Cuenca. 2017. Classification of Colombian honeys by electronic nose and physical-chemical parameters, using neural networks and genetic algorithms. *Journal of Apicultural Research*, 57(1), 145-152.

# Capítulo 7 Discusión final

El café es uno de los productos básicos más importantes en el comercio internacional, genera aproximadamente 90 mil millones de dólares al año y cerca de 120 millones de personas dependen de él como fuente de ingresos (Tounekti *et al.*, 2018). *Coffea arabica* L. es una de las especies ampliamente cultivada en diferentes países del mundo y enfrenta desafíos como el cambio climático (Montagnon *et al.*, 2021). En este sentido, las plantas de café pueden estar sometidas con frecuencia a períodos de estrés por déficit hídrico que ocasiona una reducción del crecimiento y la productividad como consecuencia de la alteración de varios procesos fisiológicos y bioquímicos (Gessese, 2019). En adición, el rendimiento de las plantas de *Coffea arabica* puede evidenciar una disminución debido a la baja fertilidad del suelo (Marbun *et al.*, 2020). La aplicación de fertilizantes para mejorar la disponibilidad de nutrientes en el suelo es una práctica rutinaria en la agricultura moderna (Rosi *et al.*, 2019). Asimismo, el biocarbón (BC) ha sido usado ampliamente como enmienda para mejorar la fertilidad del suelo (El-Naggar *et al.*, 2019). Esta investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la aplicación de biocarbón obtenido de pulpa de café sobre la fisiología y el comportamiento agronómico del cultivo de café (*Coffea arabica* L.) variedad Castillo el Tambo con el motivo de conocer los posibles mecanismos fisiológicos involucrados en plántulas y árboles de café en respuesta a diferentes niveles de enmiendas y fertilización química.

Los resultados mostrados en los capítulos 2 y 3 del presente estudio permiten afirmar que el desempeño agronómico de las plántulas de café es afectado por el manejo de la nutrición mineral del cultivo. En adición, la variedad Castillo el Tambo mostró características de susceptibilidad al estrés por déficit hídrico como resultado de un riego reducido. No obstante, aplicaciones de BC (especialmente a una dosis de 8 t ha<sup>-1</sup>) ayudaron a mitigar los efectos negativos del déficit hídrico, lo cual se vio reflejado en: *i*) una mejora del estatus hídrico de las plantas de café (menor reducción de la conductividad hidráulica de la raíz, conductancia estomática y uso eficiente del agua); *ii*) valores de fotosíntesis, acumulación de materia seca y eficiencia agronómica similares a los encontrados en plantas sin condiciones de estrés; *iii*) menor degradación de pigmentos fotosintéticos y parámetros de fluorescencia de la clorofila similares a los registrados en plantas sin déficit hídrico, indicando menor estrés oxidativo. La información señalada en la

presente investigación concuerda con lo reportado en numerosas especies de plantas cultivadas como *Triticum aestivum* (Danish y Zafar-ul-Hye, 2019), *Zea mays* (Danish *et al.*, 2020), *Glycine max* (Hafeez *et al.*, 2017), *Cicer arietinum* (Hashem *et al.*, 2019), *Beta vulgaris* (Durukan *et al.*, 2020), entre otros.

Se ha encontrado que usar como sustrato una mezcla entre BC y turba puede incrementar la tasa de fotosíntesis en plántulas de café como consecuencia de una mayor absorción de agua y nutrientes por parte de las plántulas (Bommaraju, 2016). Los resultados obtenidos en el presente estudio evidenciaron incrementos en variables fisiológicas como la conductancia estomática, conductividad hidráulica de la raíz, fotosíntesis y acumulación de materia seca, especialmente, en plántulas de café tratadas con 8 t ha<sup>-1</sup> BC y 66% y 100% FQ (capítulos 2 y 3). Similares tendencias también han sido reportadas en otras especies de plantas como *Torreya grandis* (Zhang *et al.*, 2019), plántulas de *Cucumis sativus* (Ma *et al.*, 2020), *Andrographis paniculata* (Saha *et al.*, 2019), *Vigna unguiculata* (Phares *et al.*, 2020), entre otros. En general, los autores concluyen que los efectos interactivos de las aplicaciones de BC (con dosis que variaron entre 1,5 t ha<sup>-1</sup> y 40 t ha<sup>-1</sup>) en complemento con fertilización química sobre la fisiología de las plantas evaluadas son debido principalmente a las modificaciones de las características del suelo o sustrato estudiado tales como el aumento del pH, la capacidad de intercambio catiónico, el carbono orgánico del suelo, el nitrógeno total, el fósforo disponible, el incremento de la retención de agua en el suelo o sustrato y mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas.

Por otro lado, los resultados presentados en los capítulos 4, 5 y 6 de esta investigación aportan información que explica los diferentes procesos fisiológicos involucrados en los árboles de café variedad Castillo el Tambo en respuesta a la aplicación de diferente dosis de BC de pulpa de café y niveles de fertilización química. En este sentido, se comprueba que los cambios en el desempeño agronómico de los árboles de café como consecuencia del aporte del BC al cultivo están relacionados con las mejoras de las características físicas, químicas y microbiológicas del suelo. Por otro lado, numerosos subproductos como desechos agrícolas y leñosos, plástico, desechos de neumáticos, lodos, algas, carbón, estiércol de ganado y otros, han sido utilizadas y estudiadas para producir biocarbón (Ahmed y Hameed, 2020). No obstante, los resultados presentados en esta investigación

permiten sugerir que la pulpa de café es una alternativa interesante a tener en cuenta en la producción de BC y su posterior utilización en la cadena productiva de café que se ajusta al enfoque del manejo de residuos de manera eficiente y respetuosa con el ambiente (recircularidad) como lo argumenta Srivatsav *et al.* (2020). En adición, la información obtenida en este estudio concuerda con otras investigaciones que reportan respuestas benéficas en suelos tratados con BC tales como: *i*) mayor disponibilidad de nutrientes (Song *et al.*, 2020), incremento del pH y Capacidad de Intercambio Catiónico (Singh *et al.*, 2019), biorremediación de sustancias tóxicas (Wahla *et al.*, 2020); *ii*) favorece las características físicas del suelo mejorando las estructuras de los poros del suelo y las características hidráulicas (Xiaoqin *et al.*, 2021), aumenta el agua disponible para las plantas y reduce la densidad aparente (Toková *et al.*, 2020) y *iii*) aumenta la actividad microbiana (Ali *et al.*, 2020).

El desempeño agronómico y fisiológico de los árboles de café es influenciado por el manejo de la nutrición mineral del cultivo. Por lo tanto, los árboles de café son afectados negativamente cuando no se realizan aplicaciones de enmiendas y fertilizantes (0 t ha<sup>-1</sup> BC y 0% FQ) y es reflejado en la reducción del rendimiento y las variables de calidad. En este sentido, Bote *et al.* (2018) indican que no aplicar fertilizantes en el cultivo de café reduce significativamente los valores de fotosíntesis, acumulación de materia seca y rendimiento como consecuencia de la deficiencia de nutrientes en las plantas. Sin embargo, los efectos de las dosis de BC y los niveles de FQ afectaron las respuestas de las variables estudiadas en la presente investigación, evidenciando que los resultados más favorables fueron observados principalmente con aplicaciones de 8 t ha<sup>-1</sup> BC y 66% y 100% FQ. Similares resultados han sido observados en cultivos de *Vaccinium myrtillus* (Zhang *et al.*, 2020), *Quercus serrata* (Ohtsuka *et al.*, 2021), *Malus domestica* (Safaei-Khorram *et al.*, 2018), *Citrus sinensis* (Abd El-Naby *et al.*, 2020), *Oryza Sativa* (Sadegh-Zadeh *et al.*, 2018), entre otros. Los autores señalan que estas respuestas positivas en términos de rendimiento y calidad demuestran una mayor efectividad de los tratamientos de co-aplicación de BC y fertilizantes como una consecuencia indirecta de una mejora de los niveles de nutrientes en el suelo. No obstante, las condiciones iniciales del suelo y las características propias del biocarbón influyen significativamente en los efectos sobre la fisiología de las plantas.

Se ha documentado que el BC contribuye al incremento de la capacidad de retención de nutrientes en el suelo debido a su porosidad, alta superficie específica, presencia de sitios superficiales polares y no polares, o como una fuente de nutrientes para plantas (contenido de cenizas). No obstante, el aporte nutricional depende principalmente de la naturaleza de las materias primas y de las condiciones durante su fabricación (temperatura y tiempo de residencia en el proceso de pirólisis) (Hossain *et al.*, 2020). Ante este escenario, la cantidad de BC aplicado tiene gran influencia sobre la productividad de los cultivos (Yudiastari *et al.*, 2019). Asimismo, se ha reportado que aplicaciones superiores a 10 t ha<sup>-1</sup> BC en algunos cultivos pueden no presentar un efecto significativo en rendimiento de las plantas o incluso llegar a ser adverso para el cultivo en especial por el incremento de la relación C/N del suelo (Ye *et al.*, 2019; Yudiastari *et al.*, 2019). Es importante señalar que el biocarbón obtenido a partir de pulpa de café podría ser considerado de alta calidad debido a los altos valores de nutrientes y cenizas en comparación con otros biocarbonos. Finalmente, la **Figura 27** muestra un esquema que explica a manera general los mecanismos fisiológicos de plántulas de café en condiciones de riego reducido en respuesta a aplicaciones de biocarbón. También, se resumen los principales resultados del manejo de la nutrición (BC y fertilización química) de árboles de café variedad Castillo el Tambo de tres años de edad.

## 7.1 Bibliografía

- Abd El-Naby, S.K.M., Abdelkhalek, A. Baiea, M.H.M. Amin O.A. y R.K.H.M. Khalifa. 2020. Management strategy of biochar and compost for improving the productivity of valencia orange grown on sandy soil. *Plant Archives*, 20(2), 2259-2264.
- Ahmed, M.J. y B.H. Hameed. (2020). Insight into the co-pyrolysis of different blended feedstocks to biochar for the adsorption of organic and inorganic pollutants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121762.
- Ali, A., S.M. Shaheen, D. Guo, Y. Li, R. Xiao, F. Wahid y Z. Zhang. 2020. Apricot shell-and apple tree-derived biochar affect the fractionation and bioavailability of Zn and Cd as well as the microbial activity in smelter contaminated soil. *Environmental Pollution*, 264, 114773.

- Bommaraju, B.K. 2016. Use of biochar and compost as substrate alternatives in coffee plant production. Alma Mater Studiorum - Università Di Bologna. Studiorum - Università di Bologna.
- Bote, A.D., Z. Zana, F.L. Ocho y J. Vos. 2018. Analysis of coffee (*Coffea arabica* L.) performance in relation to radiation level and rate of nitrogen supply II. Uptake and distribution of nitrogen, leaf photosynthesis and first bean yields. *European Journal of Agronomy*, 92, 107-114.
- Danish, S. y M. Zafar-ul-Hye. 2019. Co-application of ACC-deaminase producing PGPR and timber-waste biochar improves pigments formation, growth and yield of wheat under drought stress. *Scientific reports*, 9(1), 1-13.
- Danish, S., M. Zafar-ul-Hye, F. Mohsin y M. Hussain. 2020. ACC-deaminase producing plant growth promoting rhizobacteria and biochar mitigate adverse effects of drought stress on maize growth. *PLoS One*, 15(4), e0230615.
- Durukan, H., A. Demirbas y I. Turkekul. 2020. Effects of biochar rates on yield and nutrient uptake of sugar beet plants grown under drought stress. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(21), 2735-2745.
- El-Naggar, A., S.S. Lee, J. Rinklebe, M. Farooq, H. Song, A.K. Sarmah y Y.S. Ok. 2019. Biochar application to low fertility soils: A review of current status, and future prospects. *Geoderma*, 337, 536-554.
- Gessese, T.S. 2019. Variations Among Coffee (*Coffea arabica* L.) Genotypes for Sensitivity to Drought Induced by Soil Drying at Early stages of Growth in Ethiopia. *International Journal of Plant Breeding and Crop Science* Vol. 5(2), 453-462
- Hafeez, Y., S. Iqbal, K. Jabeen, S. Shahzad, S. Jahan y F. Rasul. 2017. Effect of biochar application on seed germination and seedling growth of *Glycine max* (L.) Merr. Under drought stress. *Pakistan Journal of Botany*, 49(51), 7-13.
- Hashem, A., A. Kumar, A.M. Al-Dbass, A.A. Alqarawi, A.B.F. Al-Arjani, G. Singh, y E.F. Abd\_Allah. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi and biochar improves drought tolerance in chickpea. *Saudi journal of biological sciences*, 26(3), 614-624.
- Hossain, M.Z., M.M. Bahar, B. Sarkar, S.W. Donne, Y.S. Ok, K.N. Palansooriya y N. Bolan. 2020. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*, 1-42.
- Ma, G., H. Mao, Q. Bu, L. Han, A. Shabbir y F. Gao. 2020. Effect of compound biochar substrate on the root growth of cucumber plug seedlings. *Agronomy*, 10(8), 1080.

- Marbun, P., Z. Nasution, H. Hanum y H. Karim. 2020. The classification, characteristics, and assessment of soil profile fertility on *Coffea arabica* productivity in north Sumatra. *Bulg. J Agric Sci*, 26(3), 622-32.
- Montagnon, C., A. Mahyoub, W. Solano y F. Sheibani. 2021. Unveiling a unique genetic diversity of cultivated *Coffea arabica* L. in its main domestication center: Yemen. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 1-12.
- Ohtsuka, T., M. Tomotsune, M. Ando, Y. Tsukimori, H. Koizumi y S. Yoshitake. 2021. Effects of the application of biochar to plant growth and net primary production in an oak forest. *Forests*, 12(2), 152.
- Rossi, L., L.N. Fedenia, H. Sharifan, X. Ma y L. Lombardini. 2019. Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica* L.) plants. *Plant physiology and biochemistry*, 135, 160-166.
- Sadegh-Zadeh, F., Tolekolai, S.F. Bahmanyar M.A. y M. Emadi. 2018. Application of biochar and compost for enhancement of rice (*Oryza sativa* L.) grain yield in calcareous sandy soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 49(5), 552-566.
- Safaei-Khorram, M., G. Zhang, A. Fatemi, R. Kiefer, K. Maddah, M. Baqar y G. Li. 2019. Impact of biochar and compost amendment on soil quality, growth and yield of a replanted apple orchard in a 4-year field study. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(4), 1862-1869.
- Saha, A., B.B. Basak, N.A. Gajbhiye, K.A. Kalariya y P. Manivel. 2019. Sustainable fertilization through co-application of biochar and chemical fertilizers improves yield, quality of *Andrographis paniculata* and soil health. *Industrial Crops and Products*, 140, 111607.
- Singh, C., S. Tiwari y J.S. Singh. 2020. Biochar: a sustainable tool in soil pollutant bioremediation. In *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety* (pp. 475-494). Springer, Singapore
- Song, S., S. Arora, A.K.C. Laserna, Y. Shen, B.W. Thian, J.C. Cheong y C.H. Wang. 2020. Biochar for urban agriculture: Impacts on soil chemical characteristics and on *Brassica rapa* growth, nutrient content and metabolism over multiple growth cycles. *Science of the Total Environment*, 727, 138742.

- Srivatsav, P., B.S. Bhargav, V. Shanmugasundaram, J. Arun, K.P. Gopinath y A. Bhatnagar. 2020. Biochar as an eco-friendly and economical adsorbent for the removal of colorants (dyes) from aqueous environment: A review. *Water*, 12(12), 3561.
- Toková, L., D. Igaz, J. Horák y E. Aydin. 2020. Effect of biochar application and re-application on soil bulk density, porosity, saturated hydraulic conductivity, water content and soil water availability in a silty loam Haplic Luvisol. *Agronomy*, 10(7), 1005.
- Tounekti, T., M. Mahdhi, T.A. Al-Turki y H. Khemira. 2018. Water relations and photo-protection mechanisms during drought stress in four coffee (*Coffea arabica*) cultivars from southwestern Saudi Arabia. *South African journal of botany*, 117, 17-25.
- Wahla, A.Q., S. Anwar, J.A. Mueller, M. Arslan y S. Iqbal. 2020. Immobilization of metribuzin degrading bacterial consortium MB3R on biochar enhances bioremediation of potato vegetated soil and restores bacterial community structure. *Journal of hazardous materials*, 390, 121493.
- Xiaoqin, S., S. Dongli, F. Yuanhang, W. Hongde y G. Lei. 2021. Three-dimensional fractal characteristics of soil pore structure and their relationships with hydraulic parameters in biochar-amended saline soil. *Soil and Tillage Research*, 205, 104809.
- Ye, L., M. Camps-Arbestain, Q. Shen, J. Lehmann, B. Singh y M. Sabir. 2019. Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use and Management*, 36(1), 2-18.
- Yudiastari, N.M., N.K.E. Suwitari, L. Suariani y Y.P. Situmeang. 2019. The application of biochar in improving the nutrition quality and production of sorghum plant. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 347, No. 1, p. 012057). IOP Publishing.
- Zhang, R., Zhao, Y. Lin, J. Hu, Y. Hänninen H. y J. Wu. 2019. Biochar application alleviates unbalanced nutrient uptake caused by N deposition in *Torreya grandis* trees and seedlings. *Forest Ecology and Management*, 432, 319-326.
- Zhang, Y., X. Wang, B. Liu, Q. Liu, H. Zheng, X. Yo, y F. Li. 2020. Comparative study of individual and Co-Application of biochar and wood vinegar on blueberry fruit yield and nutritional quality. *Chemosphere*, 246, 125699.

# Capítulo 8 Conclusiones y recomendaciones

## 8.1 Conclusiones

En plantas de café bajo condiciones de riego reducido y sin aplicación de biocarbón, los diferentes procesos fisiológicos como el intercambio gaseoso de la hoja, la fluorescencia de la clorofila  $\alpha$ , acumulación de materia seca y estatus hídrico fueron afectados negativamente, indicando una susceptibilidad moderada al déficit hídrico. Adicionalmente, aplicaciones de  $8 \text{ t ha}^{-1}$  BC fabricado a partir de pulpa de café causan un efecto positivo sobre el comportamiento fisiológico, lo cual fue evidenciado principalmente en una estimulación de la fotosíntesis y un mejor sistema de raíces destinado a aumentar un uso eficiente del agua en plantas de café Castillo bien irrigadas y con riego reducido.

El uso de BC de pulpa de café combinado con fertilización inorgánica genera un efecto positivo sobre el comportamiento fisiológico de las plantas de café, principalmente a una dosis de  $8 \text{ t ha}^{-1}$  y acompañada con niveles de fertilización química entre 66% y 100%, las cuales favorecieron una acumulación de materia seca, conductividad hidráulica de la raíz y uso eficiente del agua.

En árboles de café variedad Castillo el Tambo, las aplicaciones de  $8 \text{ t ha}^{-1}$  BC obtenido a partir de pulpa de café como un complemento a la fertilización inorgánica entre el 66% y 100% de los requerimientos nutricionales evidenciaron un efecto positivo sobre las respuestas fisiológicas tales como el incremento del rendimiento en café pergamino seco, eficiencia agronómica, conductancia estomática, clorofilas, fluorescencia de la clorofila y contenido foliar de nutrientes.

Otros beneficios del uso de BC a partir de pulpa de café en complemento a la fertilización inorgánica, son los efectos positivos en el comportamiento de las diferentes características del suelo de un cultivo comercial de café. En este sentido,  $8$  y  $16 \text{ t ha}^{-1}$  BC en co-aplicación con fertilización química entre el 66% y 100% mejoró el pH, la

retención de agua en el suelo, los agregados estables y respiración microbiana del suelo, registrando valores más altos en comparación con plantas sin BC y sin fertilizantes.

El perfil aromático obtenido para los granos tostados de café y atributos de calidad en taza fueron favorecidos por la co-aplicación de BC de pulpa de café, especialmente con dosis de 8 y 16 t ha<sup>-1</sup> en complemento con niveles de fertilización química de 66% y 100% de los requerimientos nutricionales. Estos tratamientos aumentaron el contenido de SST, redujo el pH e incrementó la acidez titulable en bebidas de granos de café variedad Castillo el Tambo.

El análisis de componentes principales biplot permitió identificar rasgos fisiológicos (rendimiento, conductancia estomática, pigmentos fotosintéticos, fotosíntesis) y contenido foliar de nutrientes que ayudaron al estudio de los efectos de las aplicaciones de diferentes dosis de BC y niveles de fertilización química en plantas y árboles de café variedad Castillo El Tambo. En adición, este análisis ayudó a identificar los sensores de la nariz electrónica con mayor sensibilidad a los grupos funcionales correspondientes a compuestos volátiles de granos tostados de café y apoyaron al estudio de los efectos de las aplicaciones de diferentes dosis de BC en complemento a la fertilización química en árboles de café.

Los resultados obtenidos en la presente investigación indican que el uso de BC producido con pulpa de café, especialmente entre 8 y 16 t ha<sup>-1</sup>, puede ser una alternativa como complemento de la nutrición mineral de cultivos comerciales de café. Adicionalmente, estas estrategias de manejo del cultivo ayudan al aprovechamiento de residuos provenientes de la misma cadena productiva y permite mitigar el uso de fertilizantes químicos en un mediano plazo.

## 8.2 Recomendaciones

La información obtenida en la presente investigación permite recomendar el uso de BC como una alternativa interesante de manejo agronómico del cultivo del café en condiciones de déficit hídrico moderado.

En futuras investigaciones enfocadas en la evaluación del comportamiento fisiológico y desempeño agronómico del cultivo de café en respuesta a las aplicaciones de biocarbón, podría considerarse diferentes métodos y momentos de aplicación del BC; por ejemplo, en el trasplante de vivero al sitio definitivo en campo. En adición, tener en cuenta mezclas de biocarbón con compost.

Aunque los resultados de la presente investigación brindaron información que nos permiten sugerir la metodología de la pirólisis de la pulpa de café para la producción de biocarbón, es necesario el estudio de factibilidad económica y ambiental para la implementación de esta tecnología en la cadena productiva del café.

A pesar de los resultados obtenidos en el estudio de compuestos volátiles con la ayuda de la nariz electrónica en la caracterización de diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización en el cultivo de café, es recomendable profundizar con variables relacionadas con la calidad del grano y bebida del café como el panel sensorial o la cromatografía.

## Capítulo 9 Modelo conceptual

Este trabajo permitió evaluar en general un grupo respuestas fisiológicas de plantas y árboles de café a la aplicación de diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización química acorde a los requerimientos nutricionales. Estas respuestas son resumidas en el modelo conceptual que se muestra en la **Figura 27**.

En este modelo se pueden observar dos escenarios principales: *i*) estado de plántula bajo condición de riego reducido en presencia o ausencia de aplicación de biocarbón; *ii*) cultivo comercial de café en etapa de producción bajo diferentes dosis de biocarbón y niveles de fertilización química. En el primer escenario, las respuestas iniciales de las plantas de café ante una disminución del riego se dan a nivel de raíz, donde se han encontrado la recepción de señales al déficit hídrico y se sintetiza la hormona ácido abscísico (ABA). Al incrementar la concentración de ABA, el mecanismo de cierre de estomas es activado y se evidencia una reducción de la conductancia estomática ( $g_s$ ) que genera una limitación de la fotosíntesis neta ( $F_n$ ). No obstante, en plantas con aplicaciones de  $8 \text{ t ha}^{-1}$  BC, se observa que la conductividad hidráulica de la raíz ( $K_r$ ),  $g_s$  y  $F_n$  son mayores con respecto a plantas de café sin BC. Este comportamiento ha sido relacionado con la estrategia de la evitación a la sequía, la cual ha sido reportada ampliamente en especies como el frijol, arroz, trigo, maíz entre otras.

Por otro lado, las plantas en condiciones de sequía presentan estrés oxidativo debido a la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), las cuales generan daños que repercuten en limitaciones de la fotosíntesis de tipo no estomático. Entre los efectos negativos evidenciados en el presente trabajo en plantas de café sin BC se encuentra la degradación de pigmentos fotosintéticos ( $Chl$ ) y reducción de la eficiencia máxima del quantum en PSII ( $F_v/F_m$ ). Aplicaciones de BC mitigaron el efecto negativo del riego reducido en términos de contenido de  $Chl$  y valores de  $F_v/F_m$ , los cuales fueron mayores con respecto a plantas sin BC. Este comportamiento fisiológico ayudó a las plantas de café a conservar valores de  $F_n$  similares a aquellas que no contaron con estrés por déficit hídrico, repercutiendo en la acumulación de materia seca (MST) y eficiencia agronómica (EA).

Con respecto al segundo escenario, las principales respuestas mostradas en el modelo conceptual están orientadas a señalar los cambios en las características del suelo, desempeño fisiológico del cultivo y atributos relacionados con la calidad del grano y taza de café. En general, árboles que tuvieron 0 t ha<sup>-1</sup> BC evidenciaron un comportamiento agronómico asociado a condiciones de deficiencias nutricionales. En el suelo se observa que los valores de la densidad aparente ( $\rho_a$ ) fue mayor en comparación con los registrados en los suelos con aplicación de BC. Sin embargo, el contenido de humedad en capacidad de campo (CC), agregados estables (AE), respiración microbiana, pH y capacidad de intercambio catiónico estimada (CICE) fueron menores con respecto al suelo que contó con 8 t ha<sup>-1</sup> BC. Ante este panorama, las respuestas fisiológicas fueron afectadas negativamente, evidenciando valores bajos en  $g_s$ , contenido foliar de macro y micronutrientes, *Chl* y  $F_v/F_m$ . En consecuencia, la producción café pergamino seco (CPS) es menor y, por ende, la EA disminuye. Asimismo, los atributos de los granos tostados de café fueron relacionados con perfiles de baja calidad, un factor importante a tener en cuenta en la comercialización.

Por otro lado, el uso de enmiendas de BC, especialmente con 8 t ha<sup>-1</sup>, en complemento a la fertilización química presentó una tendencia opuesta a los resultados anteriormente mencionados. En resumen, la aplicación de BC genera efectos positivos en términos de calidad del suelo (variables físicas, químicas y microbiológicas) las cuales favorecen el desempeño agronómico del cultivo de café evidenciado en las diferentes variables fisiológicas estudiadas en la presente investigación. En adición, los parámetros de calidad fueron positivamente afectados por la co-aplicación de BC y fertilizantes, indicando que se podría considerar como una estrategia de manejo agronómico interesante a tener en cuenta en la cadena productiva del cultivo de café.



Capítulo 9 Modelo conceptual

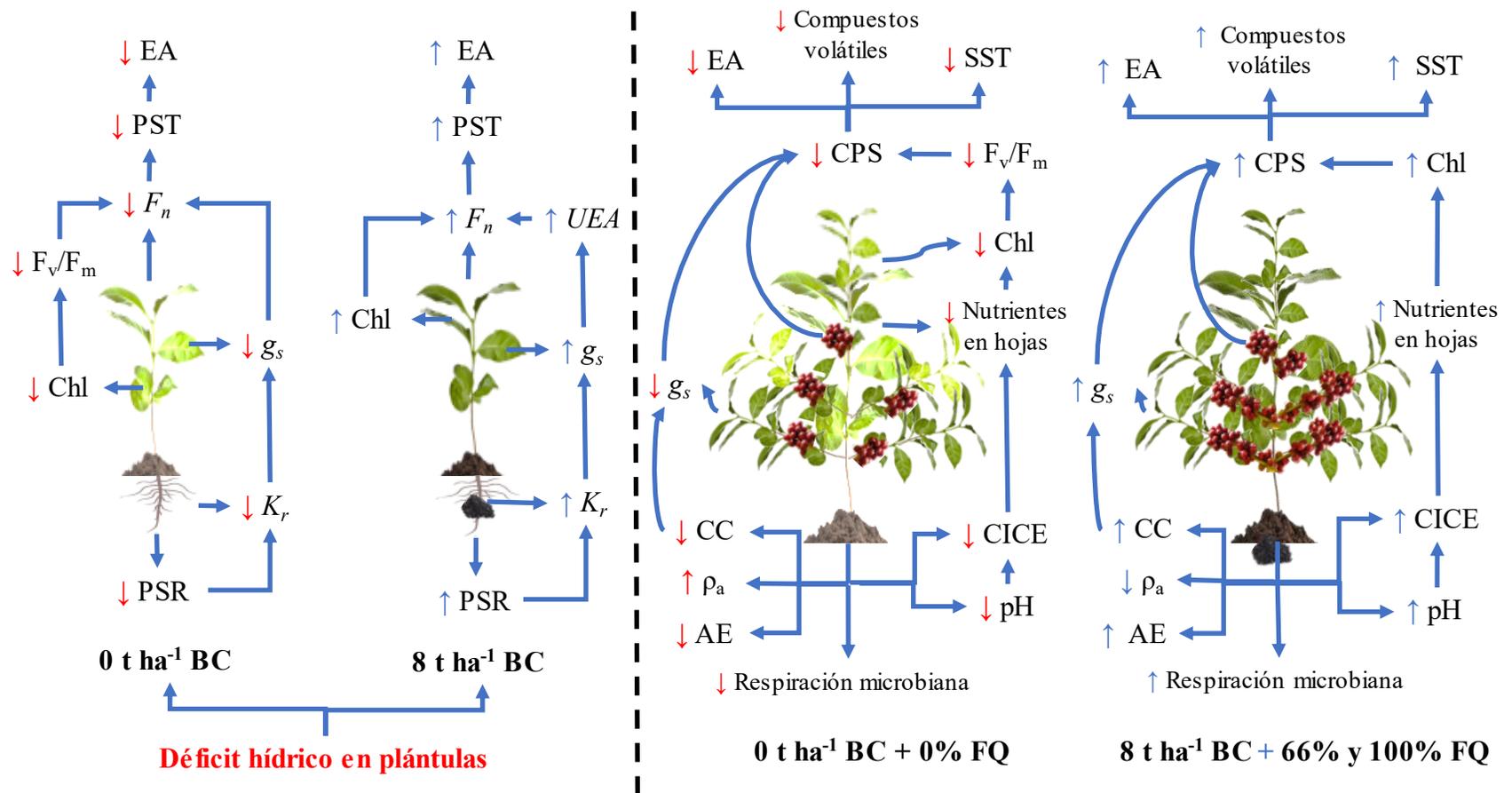


Figura 27. Modelo conceptual del comportamiento fisiológico de las plantas de café (*Coffea arabica* L.) variedad Castillo el Tambo en respuesta a aplicaciones de biocarbón

## Capítulo 9 Modelo conceptual

# Anexos

## Resumen artículo de revisión

**ACTA BIOLÓGICA COLOMBIANA**  
<http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/actabiol>

Facultad de Ciencias  
Departamento de Biología  
Sede Bogotá



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

ARTÍCULO DE REVISIÓN / REVIEW ARTICLE

BOTÁNICA

### USE OF BIOCHAR IN AGRICULTURE

### Uso de biocarbón en la agricultura

Alefsi David SÁNCHEZ-REINOSO<sup>1</sup>, Edgar Álvaro ÁVILA-PEDRAZA<sup>2</sup>, Hermann RESTREPO-DÍAZ<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá - Facultad de Ciencias Agrarias - Departamento de Agronomía - Carrera 30 No 45-03 Edificio 500, código postal 111321

<sup>2</sup>Departamento de Suelos y Aguas, Universidad del Tolima, Cl. 42 n°. 1b-1, Ibagué -Tolima, Colombia

\*For correspondence: hrestreped@unal.edu.co

Received: 02<sup>nd</sup> May 2019, Returned for revision: 02<sup>nd</sup> July 2019, Accepted: 25<sup>th</sup> July 2019.

Associate Editor: Magdi Abdelhamid.

Citation/Citar este artículo como: Sánchez-Reinoso AD, Ávila-Pedraza E.A., Restrepo-Díaz H. Use of Biochar in Agriculture. Acta biol. Colomb. 2020;25(2):327-338. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/abc.v25n2.79466>

#### ABSTRACT

The objective of this review is to show how biochar (BC) can be obtained and its effects on the physicochemical properties of soils and physiological behavior of cultivated plants. Biochar is a product rich in carbon that comes from the pyrolysis of biomass, generally of vegetable origin. It is obtained by the decomposition of organic matter exposed to temperatures between 200-900 °C in an atmosphere with low oxygen availability (pyrolysis), which can be slow, intermediate or fast. BC can contain varying levels of elements such as: carbon, nitrogen, oxygen, hydrogen, and sulfur. The primary sources to produce biochar are the forest, agroindustrial, and manure residues. BC quality and physical-chemical characteristics will depend on the type of waste or plant material for production. The high carbon contents present in organic matter, which are more resistant to biological and chemical decomposition, are stabilized by pyrolysis. BC remains stable into the soil for more extended periods (this allows BC to be considered as an essential component for the mitigation of the impacts of polluting substances). It has been found that BC application improves the physicochemical characteristics of the soil, including fertility. This improvement generates positive responses in the physiological behavior of plants such as: the increase of germination, accumulation of dry matter, photosynthesis, yield, and quality. Biochar opens essential doors for the sustainable management of agriculture in Colombia. It can be considered in agricultural regions exposed to heavy metals, in order to reduce its impact on human health.

**Keywords:** Carbon capture, mineralization, plant nutrition, pyrolysis.



