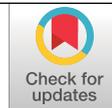


# EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA APLICACIÓN DE UNA FUENTE CARBONATADA EN PLANTAS DE CAFÉ EN ALMÁCIGO

Natalia Catalina Flechas Bejarano \*, José Ricardo Acuña Zornosa 

Flechas-Bejarano, N., & Acuña-Zornosa, J. R. (2022). Evaluación del efecto de la aplicación de una fuente carbonatada en plantas de café en almácigo. *Revista Cenicafé*, 73(1), e73104. <https://doi.org/10.38141/10778/73104>



La aplicación controlada de CO<sub>2</sub> y fertilizantes a través de partículas de liberación lenta, ha sido una estrategia innovadora y promisoría de fertilización para los cultivos, pues permite la liberación controlada de CO<sub>2</sub> en el mesófilo de las hojas vía estomas o epidermis. Se evaluó el efecto de la aplicación de un producto enriquecido con CO<sub>2</sub> en tres concentraciones diferenciales con base en la dosis óptima (TTO1-50%, TTO2-100% y TTO3-200%) en el contenido de biomasa seca, intercambio gaseoso, la Eficiencia real del Fotosistema II y la nutrición mineral en las plantas de café. Se asperjaron las plantas con una frecuencia de 15 días desde la emergencia del primer par de hojas verdaderas (30 DDS- BBHC12) hasta los seis meses (180 DDS-BBCH19) en almácigo estándar. Se cuantificó la biomasa total de 15 plantas por cada tratamiento y el control a los 180 DDS. No hubo evidencia estadística de diferencias significativas en el contenido de biomasa total ( $gl=3$ , 56;  $F= 0,669$ ;  $p=0,575$ ,  $\alpha=0,05$ ). El intercambio gaseoso y la PSII fueron influenciados principalmente por la fenología, más que por la aplicación de los tratamientos (conductancia estomática-  $gs$ :  $p=2,85 \times 10^{-5}$ , tasa de asimilación neta-  $A$ :  $p=9,01 \times 10^{-16}$ , transpiración-  $E$ :  $p=8,63 \times 10^{-4}$  y PSII:  $p=1,93 \times 10^{-19}$ ). El contenido de macro y micronutrientes foliares del café fueron afectados tras la aplicación del CO<sub>2</sub> carbonatado. La aplicación del producto carbonatado no aumentó el contenido de biomasa seca total de las plantas de café durante su establecimiento en almácigo estándar.

**Palabras clave:** Biomasa, fenología, intercambio gaseoso, Fotosistema II, nutrición mineral.

## EVALUATION OF THE EFFECT OF THE APPLICATION OF A CARBONATED SOURCE ON COFFEE NURSERIES

The controlled application of CO<sub>2</sub> and fertilizers through slow-release particles has been an innovative and promising fertilization strategy for crops as it allows the controlled release of CO<sub>2</sub> in the leaf mesophyll via stomata or epidermis. The effect of the application of a CO<sub>2</sub>-enriched product in three differential concentrations based on the optimal dose (TTO1-50%, TTO2-100% and TTO3-200%) on dry biomass content, gas exchange, actual Photosystem II Efficiency and mineral nutrition was evaluated in coffee plants. The plants were sprayed with a frequency of 15 days from the emergence of the first pair of true leaves (30 DDS- BBHC12) to six months (180 DDS-BBCH19) in a standard nursery. The total biomass of 15 plants was quantified for each treatment and control at 180 DDS. There was no statistical evidence of significant differences in total biomass content ( $gl=3$ , 56;  $F= 0.669$ ;  $p=0.575$ ,  $\alpha=0.05$ ). Gas exchange and PSII were mainly influenced by phenology, rather than by the application of treatments (stomatal conductance-  $gs$ :  $p=2.85 \times 10^{-5}$ , net assimilation rate-  $A$ :  $p=9.01 \times 10^{-16}$ , transpiration-  $E$ :  $p=8.63 \times 10^{-4}$  and PSII:  $p=1.93 \times 10^{-19}$ ). The macro and micronutrient foliar content of coffee was affected after the application of carbonated CO<sub>2</sub>. The application of the carbonated product did not increase the total dry biomass content of coffee plants during their establishment in standard nursery.

**Keywords:** Biomass, phenology, gas exchange, Photosystem II, mineral nutrition.

\* Asistente de Investigación e Investigador Científico III, respectivamente. Disciplina de Fisiología Vegetal, Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. <https://orcid.org/0000-0002-3080-4988>; <https://orcid.org/0000-0001-6935-2264>



El efecto del CO<sub>2</sub> a elevadas concentraciones (e[CO<sub>2</sub>]) se ha estudiado ampliamente en plantas de *Coffea arabica* L., a través de experimentos de atmósfera enriquecida en el campo con la tecnología FACE, la cual consiste en la emisión gaseosa de CO<sub>2</sub> de concentración conocida y controlada dentro de un área seleccionada, donde hay una parcela porción de un cultivo agrícola, un arreglo forestal o un bosque (Ainsworth & Long, 2021; Norby & Zak, 2011).

El incremento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha sido benéfico para las plantas de café, principalmente en condiciones de estrés abiótico en floración y producción, respectivamente (Verhage et al., 2017), pues se ha encontrado que, bajo esta condición, *C. arabica* es más tolerante a temperaturas elevadas (37/30°C y 42/34°C) sin evidencia de aclimatación fotosintética (DaMatta et al., 2018; Martins et al., 2016; Rodrigues, 2017). También se han reportado cambios en la partición de la materia seca en eventos de estrés cruzado como las elevadas temperaturas con el déficit hídrico, pues se reportó que a un e[CO<sub>2</sub>] se mejora la asimilación de carbono, disminuye la presión oxidativa y se promueve el crecimiento y la profundidad de la raíz (Ávila, Cardoso, et al., 2020; Ávila, de Almeida, et al., 2020). Otros beneficios encontrados en *C. arabica* son el mantenimiento y aumento de las tasas fotosintéticas, incremento en el uso eficiente de la luz y mayor producción de café cereza (DaMatta et al., 2018; Rakocevic et al., 2018).

La aplicación de CO<sub>2</sub> ha sido una estrategia propuesta para mejorar el crecimiento y la producción agrícola por amplificación del rendimiento fisiológico (Ahmed & Ahmad, 2019). Esto ha impulsado en el mercado, la innovación y la generación de fertilizantes de liberación lenta que permiten al CO<sub>2</sub> ingresar directamente al mesófilo de las hojas, aprovechando las condiciones fisicoquímicas

de la cavidad subestomática, para su liberación prolongada y controlada sin necesidad de emitir un volumen considerado de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Wang et al., 2019). La aplicación como fertilizante ha sido efectiva para incrementar la tasa de asimilación neta, el contenido de clorofilas totales y el aumento en la tasa de crecimiento relativo en plantas de tabaco y tomate (Wei et al., 2018; Ya et al., 2018).

En *C. arabica* se desconoce el efecto en el crecimiento, atributos de la fotosíntesis y de intercambio gaseoso tras la aplicación del CO<sub>2</sub> en forma particulada, pues hasta la fecha se han realizado evaluaciones de naturaleza descriptiva de la apariencia en el verdor de las plantas juveniles, contenido de materia seca y altura, en combinación con otros productos de aplicación edáfica como la zeolita (Leyton Araújo & Manrique Castro, 2019).

El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la aplicación de una fuente particulada de CO<sub>2</sub> en plantas de café establecidas en almácigo convencional. Se obtuvo información del contenido de materia seca, algunas variables de intercambio gaseoso y de contenido nutricional en hojas a los 180 días después de siembra (DDS), que corresponde al estado fenológico BBCH19 (Arcila-Pulgarín et al., 2002).

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Material vegetal.** Se sembró 1,0 kg de semilla de *C. arabica* variedad Cenicafé 1 en germinador de arena y se cosecharon 2.500 plántulas (chapolas) seleccionadas, las cuales fueron sembradas en bolsas con capacidad aproximada de 2,0 kg (17 x 23 cm) de suelo con relación 9:1 de materia orgánica (Sadeghian & Ospina P., 2021) y 10 mL de micorrizas, de acuerdo con lo establecido por Cenicafé (Gaitán et al., 2013). Las plántulas de café se instalaron en almácigo con un sombrío del

50%, conforme con lo descrito por Farfán et al. (2015). El almácigo se ubicó en la sede Cenicafé- La Granja con coordenadas 4°59'34"N- 75°35' 50"W, a una altitud de 1.219 m, temperatura promedio de 22°C, humedad relativa de 75,08% y precipitación acumulada hasta junio del 2021, de 1.453 mm.

**Tratamientos.** Se realizó el ajuste de la dosis de la fuente de CO<sub>2</sub> (56% de CaCO<sub>3</sub> y 43% de MgCO<sub>3</sub>), de acuerdo con lo sugerido por diversas casas comerciales (10 kg/100 L de agua, en plantas de café con una densidad de siembra de 7.000 plantas/ha). Se determinó un total de tres tratamientos más el control para la evaluación de la eficacia del producto. Las dosis calculadas para cada uno de los tratamientos fueron de 0,005 g mL<sup>-1</sup>, 0,010 g mL<sup>-1</sup> y 0,020 g mL<sup>-1</sup> por planta para los tratamientos TTO1, TTO2 y TTO3, respectivamente; se tomaron como control aquellas plantas a las que no se les aplicó el producto. La aplicación se realizó a partir de la emergencia del primer par de hojas verdaderas, desde los 30 días después de siembra (DDS-BBCH12) hasta los 180 DDS- BBCH19, con una frecuencia de 15 días por el envés de las hojas, dado que los estomas de las plantas de café son hipostomáticos.

**Unidad experimental (UE).** Estuvo compuesta por un total de 20 plantas de café. De acuerdo con la varianza de 0,36 obtenida en estudios preliminares de la biomasa seca en almácigos, asociada a un promedio de 5,54 g de peso seco, diferencia mínima aceptable de 0,80 g, nivel de significancia del 5% y una confiabilidad mayor del 95%, se determinó un total de 15 UE por cada tratamiento.

**Variable respuesta.** Se cosecharon 15 plantas de café por cada tratamiento a los 180 DDS, se colocaron en estufa durante un período de siete días a temperatura de 65°C, se obtuvo el contenido de biomasa seca total y por órgano,

en una balanza analítica ADVENTURER OHAUS (±0,001 g).

**Intercambio gaseoso.** Con el analizador de gases infrarrojo CIRAS-3 PPSYSTEMS (Amesbury- MA), se realizaron mediciones bajo condiciones de cámara controladas (radiación fotosintéticamente activa saturante (RAF) de 1.000 μmol fotón m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>, temperatura de 25°C, humedad relativa de 50% y déficit de presión de vapor (DPV) de 1,0 kPa, en dos hojas de cinco plantas por tratamiento, desde las 06:00 hasta las 12:00, a los 30 DDS y 180 DDS, respectivamente. Las variables obtenidas fueron: tasa de asimilación neta (*A*) μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>, conductancia estomática (*g<sub>s</sub>*) mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> y transpiración (*E*) mmol H<sub>2</sub>O m<sup>-2</sup>.

**Fluorescencia de la clorofila.** Simultáneamente con la medición de las variables de intercambio gaseoso y con el fluorómetro modulado PAM CMF-3 acoplado al CIRAS-3 PPSYSTEMS (Amesbury- MA), se realizaron mediciones de la eficiencia real del fotosistema II (ΦPSII) con un pulso de 9.000 μmol fotón m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup> de luz actínica. El ΦPSII fue calculado con base a lo estimado por Baker (2008) (Ecuación <1>).

$$\Phi PSII = \frac{(F'_m - F_s)}{F'_m} \quad <1>$$

Donde: F<sub>m</sub>' es la fluorescencia máxima bajo condiciones lumínicas y la F<sub>s</sub> es la fluorescencia en estado estable bajo iluminación de la hoja (1.000 μmol fotón m<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>).

**Minerales foliares.** Se efectuaron análisis químicos foliares de tres plantas de 180 DDS por tratamiento, según la norma NTC 5752-2010 para el análisis de tejido vegetal, digestión y mineralización de muestras, teniendo en cuenta las recomendaciones técnicas para café (Sadeghian, 2020). Los análisis se realizaron

con la totalidad de las láminas foliares de las plantas.

**Análisis estadístico.** Se realizó un análisis de varianza de una sola vía (ANOVA), con el objetivo de evaluar la diferencia de la media de la biomasa seca total de las plantas sometidas a los diferentes tratamientos, en contraste con el control a los 180 DDS, con una significancia del 5%. Se realizó una prueba *t* al 5% para evaluar las diferencias en estos parámetros con base a la fenología, y su magnitud con el criterio *d* de Cohen. Los paquetes utilizados fueron Tidyverse (Wickham et al., 2019), rstatix (Kassambara, 2021) y ggpubr (Kassambara, 2020), con el IDE RStudio® (RStudio Team, 2020).

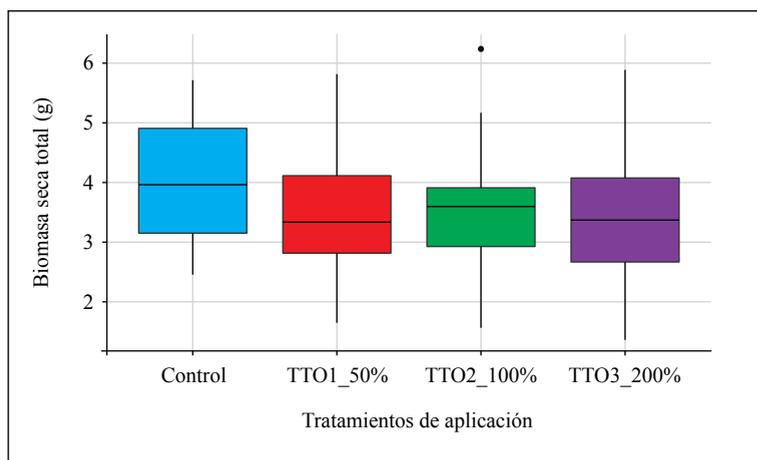
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Contenido de biomasa seca total

En la Figura 1 se observa el diagrama de cajas y bigotes del contenido total de biomasa seca por UE. No hubo evidencia estadística de diferencias significativas en el contenido de biomasa seca entre los tratamientos de aplicación en contraste con el control ( $gI=3,56$ ;  $F=0,669$ ;  $p=0,575$ ).

El contenido de materia seca total de las plantas de café no aumentó significativamente tras la aplicación del CO<sub>2</sub> particulado, lo cual ha sido observado en estudios de crecimiento temprano de *C. arabica* bajo concentraciones atmosféricas de 550 y 600 ppm de CO<sub>2</sub>; no obstante, se ha descrito un aumento en la actividad del metabolismo secundario, debido a que en el mesófilo de las hojas se amplificó la síntesis de cafeína, arginina, ácidos orgánicos y almidón, lo cual se ha relacionado con el sostenimiento de la actividad fotosintética y la disminución del estrés en la planta por variaciones abióticas; esta respuesta ayuda a soportar estados fenológicos tardíos como la floración y la fructificación en el campo, además de favorecer el crecimiento de hojas y raíces cuando las plantas están bajo estrés hídrico y/o elevadas temperaturas (Catarino et al., 2021; Rakocevic et al., 2020; Sanches et al., 2020).

La baja sensibilidad de *C. arabica* a elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> se ha relacionado con su naturaleza alotetraploide ( $2n=4x=44$ ), pues esta multiplicación del genoma implica en términos evolutivos, la tolerancia genética hacia las variaciones ambientales (Marques et al., 2021; Van de Peer et al., 2021), por



**Figura 1.** Diagrama de cajas y bigotes del contenido de biomasa seca total en gramos por UE de cada uno de los tratamientos de aplicación del producto carbonatado (CaCO<sub>3</sub> + MgCO<sub>3</sub>), en contraste con el CONTROL a los 180 DDS- BBCH19.

lo tanto, *C. arabica* en condiciones óptimas de crecimiento vegetativo temprano, a pesar de las elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico, no evidencia cambios estructurales significativos. Sin embargo, a partir de los 203 DDS se ha observado que *C. arabica* incrementa la biomasa (g/planta), número de ramas y contenido de biomasa seca de las hojas (g) en concentraciones de CO<sub>2</sub> superiores a 416 ppm (Vega et al., 2020). Esto explica por qué la evaluación a los 180 DDS del contenido de materia seca, no es tiempo suficiente para cuantificar el efecto del CO<sub>2</sub> en plantas de café.

### **Intercambio gaseoso y eficiencia real del fotosistema II**

A los 60 DDS en todos los tratamientos y el control, se observaron valores más elevados para los parámetros de intercambio gaseoso, en contraste con las plantas evaluadas a los 180 DDS, cuyos valores de *A*, *g<sub>s</sub>* y *E* fueron inferiores, como se observa en la Tabla 1. Esta disminución en los parámetros de intercambio gaseoso, pueden ser explicados a partir de la fenología críptica, que describe aquellos procesos de crecimiento que son aparentemente “invisibles” por su difícil cuantificación con tendencia cíclica, como la tasa de recambio de la raíz (Albert et al., 2019). En otras especies, se ha encontrado una asociación directa del CO<sub>2</sub> atmosférico con el aumento del volumen de la raíz, que conduce a un incremento en la tasa de transpiración del dosel y en alteraciones en la adquisición de nutrientes de la solución del suelo (Thompson et al., 2017), que modifican el desarrollo y la respuesta hormonal de los estomas y, por ende, la respuesta de la planta ante el ambiente (Qi & Torii, 2018).

En café hubo un incremento independiente de la dosis y del tiempo (DDS) en el ΦPSII en contraste con el control, por lo que el CO<sub>2</sub> particulado tuvo un efecto benéfico

en la actividad estimada del fotosistema II (60 DDS:  $p=3,48 \times 10^{-19}$ ; 180 DDS:  $p=0,018$ ), pues hay evidencia de que el aumento de CO<sub>2</sub> favorece la maquinaria fotosintética por estimular la síntesis de la proteína D1, que mejora el rendimiento cuántico del fotosistema II de cultivos como tabaco y arroz (Chen et al., 2020). Otra respuesta asociada es la sobreexpresión de la subunidad S del fotosistema II, que conlleva a la modificación de la señal molecular del cloroplasto que afecta la apertura estomática hacia la luz, ejerciendo un mayor control en la pérdida de agua y en el aumento de la tasa de asimilación neta (Glowacka et al., 2018). Dado que la aplicación de la fuente carbonatada de CO<sub>2</sub> mejoró la eficiencia real del fotosistema II del café (Tabla 1), es posible que bajo condiciones de estrés térmico y por déficit hídrico, la aplicación del producto pueda conservar la función de la maquinaria fotosintética manteniendo el crecimiento y desarrollo (Pérez et al., 2021).

### **Contenido mineral foliar**

Con base en el análisis foliar realizado, se reportaron valores diferenciales de los macronutrientes y micronutrientes de las plantas de café sometidas a los tres tratamientos de aplicación de CO<sub>2</sub> en comparación con el control, como se observa en la Tabla 2.

En términos descriptivos, el porcentaje de macronutrientes fue mayor en las plantas del TTO2 y TTO3 en contraste con el control. En tanto que algunos micronutrientes como el Fe, Mn y B fueron inferiores en todos los tratamientos en contraste con el control, mientras que el Cu y Zn fueron superiores en concentración en los tratamientos TTO2 y TTO3. Los nutrientes Ca, Cu y Mn fueron inferiores en los tratamientos y el control en contraste con los valores de referencia de café en almacigo.

**Tabla 1.** Media, error estándar e intervalo de confianza al 95% de la conductancia estomática ( $gs\ mmol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$ ), tasa de asimilación neta ( $A\ \mu mol\ CO_2\ m^{-2}\ s^{-1}$ ), transpiración ( $E\ mmol\ H_2O\ m^{-2}\ s^{-1}$ ) y de la eficiencia real del Fotosistema II ( $PSII$ ) de cinco plantas por tratamiento de aplicación (TTO1\_50%, TTO2\_100%, TTO3\_200%) y el control a los 60 DDS (BBCH12) y a los 180 DDS (BBCH19), respectivamente. El efecto de la fenología se describe a partir del criterio  $d$  de Cohen al 95%, siendo el color verde la representación de un efecto pequeño y el color amarillo de una respuesta moderada de los parámetros de intercambio gaseoso y fluorescencia de la clorofila evaluados.

Tiempo de evaluación	Tratamientos	Conductancia estomática (gs)				Tasa de asimilación neta (A)				Tasa de transpiración (E)				Eficiencia real del fotosistema II (PSII)			
		Media	E.E (+/-)	I.C		Media	E.E (+/-)	I.C		Media	E.E (+/-)	I.C		Media	E.E (+/-)	I.C	
60 DDS- BBCH12	TTO1 50%	123,89	7,65	[116,90-130,88]	10,9	0,22	[10,51-11,26]	2,82	0,092	[2,66-2,98]	0,184	0,003	[0,180-0,189]				
	TTO2 100%	88,29	4,16	[75,26-101,32]	9,59	0,29	[9,09-10,09]	2,01	0,17	[1,73-2,29]	0,151	0,005	[0,142-0,160]				
	TTO3 200%	80,33	7,75	[72,24-88,42]	7,73	0,37	[7,12-8,35]	1,77	0,085	[1,63-1,91]	0,132	0,004	[0,126-0,138]				
	CONTROL	167,67	4,81	[154,82-180,51]	9,85	0,42	[9,13-10,56]	3,17	0,11	[2,98-3,35]	0,148	0,005	[0,141-0,156]				
180 DDS- BBCH19	TTO1 50%	140,09	16,41	[112,51-167,67]	4,75	0,45	[3,99-5,51]	1,88	0,19	[1,56-2,21]	0,094	0,005	[0,087-0,102]				
	TTO2 100%	167,27	14,03	[143,68-190,85]	6,55	0,43	[5,82-7,27]	2,08	0,13	[1,85-2,30]	0,109	0,005	[0,100-0,118]				
	TTO3 200%	197,20	16,60	[169,30-225,10]	7,43	0,47	[6,63-8,22]	2,41	0,13	[2,16-2,66]	0,122	0,008	[0,108-0,135]				
	CONTROL	137,38	17,27	[104,99-169,76]	5,75	0,63	[4,68-6,80]	1,61	0,19	[1,28-1,93]	0,112	0,007	[0,099-0,123]				

**Tabla 2.** Contenido de macro y micronutrientes foliares de *C. arabica* a los 180 DDS. Se presentan las concentraciones en porcentaje (%) de nitrógeno (N), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), fósforo (P) y azufre (S), y en mg kg<sup>-1</sup> de hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn) y boro (B). El asterisco (\*) representa los rangos críticos de referencia para café en etapa de producción de acuerdo con Sadeghian (2020). Las flechas verdes indican concentraciones mayores del límite superior, las flechas amarillas indican valores normales y las flechas rojas señalan concentraciones inferiores de los rangos críticos estimados para café en almácigo.

Tratamientos	Macronutrientes (%)							Micronutrientes (mg Kg-1)				
	N	Ca	Mg	K	P	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	
TTO1 (50%)	↑ 3,26	↓ 0,25	→ 0,25	→ 1,72	→ 0,17	↓ 0,12	→ 83,52	↓ 55,1	↓ 6,4	→ 6,3	↓ 25,69	
TTO2 (100%)	↑ 3,99	↓ 0,3	→ 0,3	↑ 3,31	↑ 0,22	→ 0,15	→ 81,96	↓ 69,17	↓ 7,31	→ 7,13	↓ 27,07	
TTO3 (200%)	↑ 3,89	↓ 0,36	→ 0,36	↑ 3,35	↑ 0,22	→ 0,15	→ 87,66	↓ 61,71	↓ 7,43	→ 7,23	↓ 28,17	
CONTROL	↑ 3,43	↓ 0,26	→ 0,26	↑ 2,28	↑ 0,2	↓ 0,13	↑ 130,12	↓ 91,42	↓ 6,58	→ 6,05	→ 34,36	
*	[2.36-2.78]	[0.75-1.29]	[0.18-0.45]	[1.58-2.15]	[0.14-0.20]	[0.15-0.19]	[54-121]	[106-278]	[8-17]	[6-12]	[29-55]	

En el caso de los macronutrientes, en especial para el nitrógeno (N) bajo elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> en especies C3 (Rizopoulou & Nunes, 1981), previamente se había reportado que el incremento de CO<sub>2</sub> en el mesófilo, disminuye la asimilación de NO<sub>3</sub> por inhibición de la síntesis de malato en el cloroplasto, lo cual afecta la biosíntesis proteica. Sin embargo, se ha encontrado evidencia de que las concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> en la atmósfera promueven la retención de NO<sub>3</sub> en las raíces, además de aumentar la concentración de aminoácidos esenciales para la síntesis de proteínas en las hojas (Sardans et al., 2017). El balance nutricional y mineral del carbono y nitrógeno es resultante de la interacción planta-suelo independientemente de la fenología, y es proporcional a la concentración de CO<sub>2</sub> recibida por la planta, en especial cuando el suelo es fértil o está bajo régimen de fertilización (Terrer et al., 2019).

Algunos nutrientes foliares como el Mg, Fe y Zn son más susceptibles a disminuir su concentración por el efecto de dilución, que por algún efecto metabólico en específico (Dong et al., 2018). Sin embargo, en las plantas juveniles de café se encontró que el Mg incrementó su concentración en conjunto con el S y Zn, señalando una mayor eficiencia en su absorción y mejora en la actividad fotosintética por disponibilidad de cofactores metabólicos, coenzimas y aminoácidos esenciales como la cisteína (Hawkesford et al., 2012).

Aún se desconoce la respuesta sistémica del café frente a la aplicación particulada de

acondicionadores que liberan CO<sub>2</sub> de forma controlada en el mesófilo. Sin embargo, se ha encontrado evidencia de que estas partículas liberadas dentro de la cavidad subestomática tienen una elevada movilidad desde las hojas hacia la raíz y viceversa, a través del xilema y del floema, siendo este tipo de aplicación promisorio para un mayor uso eficiente de nutrientes, frente a la elevada demanda en la producción y/o en condiciones limitantes por factores abióticos, donde la fertilización edáfica puede llegar a ser limitante y/o poco eficaz (Chhipa, 2017; Su et al., 2019; Usman et al., 2020; Zulfiqar et al., 2019).

En este estudio puede concluirse que la aplicación del producto carbonatado no incrementó el contenido de materia seca de las plantas juveniles de café de 180 DDS, sin embargo, se encontró que tiene efectos benéficos en la respuesta del Fotosistema II, lo cual es un rasgo promisorio frente a la respuesta fotosintética de las plantas de café.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC) y el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). Los autores agradecen a todos los integrantes de la Disciplina de Fisiología Vegetal, en especial al auxiliar Mario Franco Arcila por su contribución, colaboración y cooperación en el manejo del almacigo y en la aplicación de los tratamientos. Esta investigación se realizó bajo el código de Cenicafé FIS102008.

## LITERATURA CITADA

Ahmed, M., & Ahmad, S. (2019). Carbon Dioxide Enrichment and Crop Productivity. En M. Hasanuzzaman (Ed.), *Agronomic Crops* (pp. 31–46). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-32-9783-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9783-8_3)

Ainsworth, E. A., & Long, S. P. (2021). 30 years of free-air carbon dioxide enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology*, 27(1), 27–49. <https://doi.org/10.1111/gcb.15375>

- Albert, L. P., Restrepo-Coupe, N., Smith, M. N., Wu, J., Chavana-Bryant, C., Prohaska, N., Taylor, T. C., Martins, G. A., Ciais, P., Mao, J., Arain, M. A., Li, W., Shi, X., Ricciuto, D. M., Huxman, T. E., McMahon, S. M., & Saleska, S. R. (2019). Cryptic phenology in plants: Case studies, implications, and recommendations. *Global Change Biology*, 25(11), 3591-3608. <https://doi.org/10.1111/gcb.14759>
- Arcila-Pulgarin, 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.). *Annals of Applied Biology*, 141(1), 19–27. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2002.tb00191.x>
- Avila, R. T., Cardoso, A. A., de Almeida, W. L., Costa, L. C., Machado, K. L. G., Barbosa, M. L., de Souza, R. P. B., Oliveira, L. A., Batista, D. S., Martins, S. C. V., Ramalho, J. D. C., & DaMatta, F. M. (2020). Coffee plants respond to drought and elevated [CO<sub>2</sub>] through changes in stomatal function, plant hydraulic conductance, and aquaporin expression. *Environmental and Experimental Botany*, 177, 104148. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104148>
- Avila, R. T., de Almeida, W. L., Costa, L. C., Machado, K. L. G., Barbosa, M. L., de Souza, R. P. B., Martino, P. B., Juárez, M. A. T., Marçal, D. M. S., Martins, S. C. V., Ramalho, J. D. C., & DaMatta, F. M. (2020). Elevated air [CO<sub>2</sub>] improves photosynthetic performance and alters biomass accumulation and partitioning in drought-stressed coffee plants. *Environmental and Experimental Botany*, 177, 104137. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104137>
- Baker, N. R. (2008). Chlorophyll Fluorescence: A Probe of Photosynthesis In Vivo. *Annual Review of Plant Biology*, 59(1), 89–113. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092759>
- Catarino, I. C., Monteiro, G. B., Ferreira, M. J., Torres, L., Domingues, D. S., Centeno, D. C., Lobo, A. K. M., & Silva, E. A. (2021). Elevated [CO<sub>2</sub>] Mitigates Drought Effects and Increases Leaf 5-O-Caffeoylquinic Acid and Caffeine Concentrations During the Early Growth of *Coffea Arabica* Plants. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.676207>
- Chen, J.-H., Chen, S.-T., He, N.-Y., Wang, Q.-L., Zhao, Y., Gao, W., & Guo, F.-Q. (2020). Nuclear-encoded synthesis of the D1 subunit of photosystem II increases photosynthetic efficiency and crop yield. *Nature Plants*, 6(5), 570–580. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0629-z>
- Chhipa, H. (2017). Nanofertilizers and nanopesticides for agriculture. *Environmental Chemistry Letters*, 15(1), 15–22. <https://doi.org/10.1007/s10311-016-0600-4>
- DaMatta, F. M., Avila, R. T., Cardoso, A. A., Martins, S. C. V., & Ramalho, J. C. (2018). Physiological and Agronomic Performance of the Coffee Crop in the Context of Climate Change and Global Warming: A Review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(21), 5264–5274. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04537>
- Dong, J., Gruda, N., Lam, S. K., Li, X., & Duan, Z. (2018). Effects of Elevated CO<sub>2</sub> on Nutritional Quality of Vegetables: A Review. *Frontiers in Plant Science*, 9, 924. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00924>
- Farfán, F., Serna, C. A., & Sánchez, P. M. (2015). Almacigos para caicultura orgánica: alternativas y costos. *Avances Técnicos Cenicafé*, 452, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/556>
- Gaitán B., A. L., Villegas G., C., Rivillas O., C. A., Hincapié G., E., & Arcila P., J. (2013 ). Almacigos de café: Calidad fitosanitaria manejo y siembra en el campo [Technical Report]. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). <http://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/350>
- Gaitán, A., Villegas, C., Rivillas, C. A., Hincapié, E., & Arcila, J. (2011). Almacigos de café: Calidad fitosanitaria manejo y siembra en el campo. *Avances Técnicos Cenicafé*, 404, 1–8. <http://hdl.handle.net/10778/350>
- Głowacka, K., Kromdijk, J., Kucera, K., Xie, J., Cavanagh, A. P., Leonelli, L., Leakey, A. D. B., Ort, D. R., Niyogi, K. K., & Long, S. P. (2018). Photosystem II Subunit S overexpression increases the efficiency of water use in a field-grown crop. *Nature Communications*, 9(1), 868. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03231-x>
- Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Möller, I. S., & White, P. (2012). Chapter 6—Functions of Macronutrients. En P. Marschner (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (Third Edition)* (pp. 135–189). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384905-2.00006-6>
- Kassambara, A. (2020). ggpubr: «ggplot2» Based Publication Ready Plots (0.4.0) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>
- Kassambara, A. (2021). rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests (0.7.0) [Computer software]. <https://CRAN.R-project.org/package=rstatix>

- Leyton Aratújo, D. A., & Manrique Castro, D. C. (2019). *Evaluación del efecto de acondicionadores foliar y edáfico en almácigos de café en la finca La Sultana vereda Urubamba—Municipio de Timbío—Cauca* [Tesis de pregrado, Universidad del Cauca]. <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1635>
- Marques, I., Fernandes, I., Paulo, O. S., Lidon, F. C., DaMatta, F. M., Ramalho, J. C., & Ribeiro-Barros, A. I. (2021). A Transcriptomic Approach to Understanding the Combined Impacts of Supra-Optimal Temperatures and CO<sub>2</sub> Revealed Different Responses in the Polyploid *Coffea arabica* and Its Diploid Progenitor *C. canephora*. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(6), 3125. <https://doi.org/10.3390/ijms22063125>
- Martins, M. Q., Rodrigues, W. P., Fortunato, A. S., Leitão, A. E., Rodrigues, A. P., Pais, I. P., Martins, L. D., Silva, M. J., Reboredo, F. H., Partelli, F. L., Campostri, E., Tomaz, M. A., Scotti-Campos, P., Ribeiro-Barros, A. I., Lidon, F. J. C., DaMatta, F. M., & Ramalho, J. C. (2016). Protective Response Mechanisms to Heat Stress in Interaction with High [CO<sub>2</sub>] Conditions in *Coffea* spp. *Frontiers in Plant Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00947>
- Norby, R. J., & Zak, D. R. (2011). Ecological Lessons from Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) Experiments. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42(1), 181–203. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144647>
- Perez, T. M., Socha, A., Tserej, O., & Feeley, K. J. (2021). Photosystem II heat tolerances characterize thermal generalists and the upper limit of carbon assimilation. *Plant, Cell & Environment*, 44(7), 2321–2330. <https://doi.org/10.1111/pce.13990>
- Qi, X., & Torii, K. U. (2018). Hormonal and environmental signals guiding stomatal development. *BMC Biology*, 16(1), 21. <https://doi.org/10.1186/s12915-018-0488-5>
- Rakocevic, M., Braga, K. S. M., Batista, E. R., Maia, A. H. N., Scholz, M. B. S., & Filizola, H. F. (2020). The vegetative growth assists to reproductive responses of Arabica coffee trees in a long-term FACE experiment. *Plant Growth Regulation*, 91(2), 305–316. <https://doi.org/10.1007/s10725-020-00607-2>
- Rakocevic, M., Ribeiro, R. V., Ribeiro Marchiori, P. E., Filizola, H. F., & Batista, E. R. (2018). Structural and functional changes in coffee trees after 4 years under free air CO<sub>2</sub> enrichment. *Annals of Botany*, 121(5), 1065–1078. <https://doi.org/10.1093/aob/mcy011>
- Rizopoulou, S., & Nunes, M. A. (1981). Some Adaptive Photosynthetic Characteristics of a Sun Plant (*Cerantonia Siliqua*) and a Shade Plant (*Coffea Arabica*). En N. S. Margaris & H. A. Mooney (Eds.), *Components of productivity of Mediterranean-climate regions Basic and applied aspects* (Vol. 4, pp. 85–89). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-8683-1\\_13](https://doi.org/10.1007/978-94-009-8683-1_13)
- Rodrigues, W. P. (2017). *Effect of high temperatures and CO<sub>2</sub> concentration on physiological, biochemical and growth traits in Coffea sp.: Aspects related to the single leaf and whole canopy* [Tesis de Doctorado, Universidade Estadual do Norte Fluminense]. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/12225>
- RStudio Team. (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC. <http://www.rstudio.com/>
- Sadeghian, S. (2020). Análisis foliar: Una guía para evaluar el estado nutricional del café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 515, 1–4. <https://doi.org/10.38141/10779/0515>
- Sadeghian, S., & Ospina, C. (2021). Manejo nutricional de café durante la etapa de almácigo. *Avances Técnicos Cenicafé*, 532, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0532>
- Sanches, R. F. E., da Cruz Centeno, D., Braga, M. R., & da Silva, E. A. (2020). Impact of high atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations on the seasonality of water-related processes, gas exchange, and carbohydrate metabolism in coffee trees under field conditions. *Climatic Change*, 162(3), 1231–1248. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02741-2>
- Sardans, J., Grau, O., Chen, H. Y. H., Janssens, I. A., Ciais, P., Piao, S., & Peñuelas, J. (2017). Changes in nutrient concentrations of leaves and roots in response to global change factors. *Global Change Biology*, 23(9), 3849–3856. <https://doi.org/10.1111/gcb.13721>
- Su, Y., Ashworth, V., Kim, C., Adeleye, A. S., Rolshausen, P., Roper, C., White, J., & Jassby, D. (2019). Delivery, uptake, fate, and transport of engineered nanoparticles in plants: A critical review and data analysis. *Environmental Science: Nano*, 6(8), 2311–2331. <https://doi.org/10.1039/C9EN00461K>
- Thompson, M., Gamage, D., Hirotsu, N., Martin, A., & Seneweera, S. (2017). Effects of Elevated Carbon Dioxide on Photosynthesis and Carbon Partitioning: A Perspective on Root Sugar Sensing and Hormonal Crosstalk. *Frontiers in Physiology*, 8, 578. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00578>

- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., Rehman, H. ur, Ashraf, I., & Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of The Total Environment*, 721, 137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>
- Van de Peer, Y., Ashman, T.-L., Soltis, P. S., & Soltis, D. E. (2021). Polyploidy: An evolutionary and ecological force in stressful times. *The Plant Cell*, 33(1), 11–26. <https://doi.org/10.1093/plcell/koaa015>
- Vega, F. E., Ziska, L. H., Simpkins, A., Infante, F., Davis, A. P., Rivera, J. A., Barnaby, J. Y., & Wolf, J. (2020). Early growth phase and caffeine content response to recent and projected increases in atmospheric carbon dioxide in coffee (*Coffea arabica* and *C. canephora*). *Scientific Reports*, 10(1), 5875. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62818-x>
- Verhage, F. Y. F., Anten, N. P. R., & Sentelhas, P. C. (2017). Carbon dioxide fertilization offsets negative impacts of climate change on Arabica coffee yield in Brazil. *Climatic Change*, 144(4), 671–685. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2068-z>
- Wang, Y., Zhang, Y.-J., Han, J.-M., Li, C.-H., Wang, R.-J., Zhang, Y.-L., & Jia, X. (2019). Improve Plant Photosynthesis by a New Slow-Release Carbon Dioxide Gas Fertilizer. *ACS Omega*, 4(6), 10354–10361. <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b03086>
- Wei, Z., Du, T., Li, X., Fang, L., & Liu, F. (2018). Interactive Effects of Elevated CO<sub>2</sub> and N Fertilization on Yield and Quality of Tomato Grown Under Reduced Irrigation Regimes. *Frontiers in Plant Science*, 9, 328. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00328>
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Grolemond, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., ... Yutani, H. (2019). Welcome to the Tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Ya, Z., YongPing, Z., ShiWei, Z., Pan, Y., & Meng, Z. (2018). Effects of combined application of slow-release fertilizer and foliage fertilizer on growth, development and photosynthetic characteristics of tobacco plants. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 30(6), 67–70.
- Zulfiqar, F., Navarro, M., Ashraf, M., Akram, N. A., & Munné-Bosch, S. (2019). Nanofertilizer use for sustainable agriculture: Advantages and limitations. *Plant Science*, 289, 110270. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110270>