



## Bioestimulación radical y radiación solar en plantas de *Coffea arabica* L. en etapa de vivero\*

### Root biostimulation and solar irradiation in *Coffea arabica* L. nursery plants

Jesús Mao Aguilar-Luna<sup>1</sup>, Liliana Hernández-Vargas<sup>1</sup>, Rodolfo Hernández-Ángel<sup>1</sup>

\* Recepción: 16 de mayo, 2024. Aceptación: 4 de septiembre, 2024. Este trabajo formó parte de la tesis de licenciatura del tercer autor para obtener el título de Ingeniero Agroforestal en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México.

<sup>1</sup> Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Tetela de Ocampo, Puebla, México. [mao.aguilar@correo.buap.mx](mailto:mao.aguilar@correo.buap.mx) (autor para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0002-7012-4848>); [hernandezvargasliliana4@gmail.com](mailto:hernandezvargasliliana4@gmail.com) (<https://orcid.org/0009-0008-3813-4895>); [kulche@hotmail.com](mailto:kulche@hotmail.com) (<https://orcid.org/0000-0002-4368-3628>).

## Resumen

**Introducción.** En etapa de vivero se pueden conformar plantas de *Coffea arabica* L. con calidad que reduzcan los efectos estresantes después del trasplante, aumenten la eficiencia fotosintética y mantengan una tasa de crecimiento constante. **Objetivo.** Evaluar el efecto de bioestimulantes y radiación solar en el crecimiento y la fisiología de plantas de *Coffea arabica* en etapa de vivero. **Materiales y métodos.** Los experimentos se realizaron dentro de un microtúnel en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México, con una duración de 270 días, en los años 2018 y 2022. Se utilizó un diseño factorial en bloques con tres factores: bioestimulantes (testigo, hongos micorrízicos, algas marinas y polímeros orgánicos), radiación (81, 168, 278 y 440  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y variedades de *Coffea arabica* (Costa Rica 95, Marsellesa, Caturra Roja y Garnica). Se determinó la colonización micorrízica (CM), la proporción del sistema radical (PSR), la tasa de crecimiento (TC), la proporción de parte aérea (PPA), las clorofilas y el contenido nutricional. A los datos se les aplicó un análisis de varianza para detectar diferencias entre tratamientos. **Resultados.** A los 270 días después de la siembra, la variedad Marsellesa, bioestimulada con hongos micorrízicos y expuesta a una irradiación de  $168 \pm 36 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , alcanzó valores altos de CM con 36,51 % y TC con 0,175  $\text{g g}^{-1} \text{ día}$ . En Costa Rica 95 y Marsellesa, la bioestimulación con polímeros y una irradiación de  $440 \pm 59 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  se relacionaron significativamente ( $p \leq 0,05$ ) con incrementos de 3,08  $\text{mg g}^{-1}$  PMF (peso de la materia fresca) en clorofila total. En Marsellesa, la bioestimulación con polímeros y una irradiación de  $168 \pm 36 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  resultaron en mayores contenidos de N, P, K, Ca y Mg. **Conclusiones.** La bioestimulación radical con hongos micorrízicos y niveles de radiación de 168 a 278  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  propiciaron un mejor desarrollo en plantas de café.

**Palabras clave:** algas marinas, clorofila total, micorrizas, polímeros orgánicos.

## Abstract

**Introduction.** In the nursery stage, quality *Coffea arabica* L. plants can be developed, which reduces the stressful effects after transplanting, increases photosynthetic efficiency, and maintains a constant growth rate. **Objective.** To evaluate the effect of biostimulants and solar irradiation on the growth and physiology of *Coffea arabica* plants during



the nursery stage. **Materials and methods.** The experiments were carried out in a greenhouse at the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Mexico, over a period of 270 days, in 2018 and 2022. A factorial block design was used, with three factors: biostimulants (control, mycorrhizal fungi, seaweed, and organic polymers), irradiation (81, 168, 278 and 440  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), and varieties (Costa Rica 95, Marsellesa, Caturra Roja and Garnica). Mycorrhizal colonization (MC), root system proportion (RSP), growth rate (GR), aerial proportion (AP), chlorophylls, and nutritional content were determined. An analysis of variance was performed on the data to detect differences between treatments. **Results.** At 270 days after sowing, the Marsellesa variety, biostimulated with mycorrhizal fungi and exposed to an irradiation of  $168 \pm 36 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , reached higher values in MC with 36.51 %, and GR with 0.175  $\text{g g}^{-1} \text{day}$ . In Costa Rica 95 and Marsellesa, biostimulation with polymers and an irradiation of  $440 \pm 59 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  were significantly related ( $p \leq 0.05$ ) to increases of 3.08  $\text{mg g}^{-1}$  FMW (fresh matter weight) in total chlorophyll. In Marsellesa, biostimulation with polymers and  $168 \pm 36 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  irradiation resulted in higher contents of N, P, K, Ca, and Mg. **Conclusions.** Root biostimulation with mycorrhizal fungi and irradiation levels of 168 to 278  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  led to better development in coffee plants.

**Keywords:** seaweed, total chlorophyll, mycorrhizae, organic polymers.

## Introducción

La etapa de vivero del cafeto (*Coffea arabica* L.) puede durar de 6 a 12 meses y es fundamental para la conformación de plantas destinadas a la producción de este cultivo a escala industrial (Encalada Córdova et al., 2016). Al momento del trasplante, las plántulas deben tener entre cuatro y seis pares de hojas, así como un sistema radical vigoroso y bien desarrollado. Un problema a considerar es que hasta un 86 % de las plantas con un sistema radical poco desarrollado presentan clorosis general y mueren en el primer año después del trasplante (Farfán Valencia, 2011).

Las plantas de cafeto deben mantener un balance entre el área fotosintética activa para la elaboración de fotoasimilados y el volumen del sistema radical disponible para la absorción de agua y nutrientes (Montoya Restrepo et al., 2017). El volumen de absorción debe exceder la superficie fotosintetizadora. Sin embargo, la proporción del sistema radical con respecto a la parte aérea puede disminuir con la edad (Poorter et al., 2014).

La bioestimulación radical incluye formulaciones de macro y micronutrientes, compuestos liberados por microorganismos, plantas y animales, nanomateriales y nanocompuestos de origen biológico o químico. Esta práctica puede acelerar el desarrollo y tener diversos efectos en la fisiología de las plantas jóvenes, incluso en condiciones desfavorables (Husen, 2024). También favorece una mayor tolerancia al estrés, lo cual está relacionado con su capacidad para influir en los procesos metabólicos, celulares y fisiológicos (Elhakem, 2019; ur-Rehman et al., 2019).

La bioestimulación radical está asociada a los mecanismos de defensa antioxidante de las plantas, la eficiencia fotosintética y la relación hídrica (Trejo et al., 2011), a través de la acumulación de osmolitos y osmoprotectores, que ayudan a mantener el potencial osmótico celular, así como una mayor absorción y movilidad de nutrientes (Aguilar-Luna et al., 2022). Aunque la bioestimulación en etapa de vivero es poco frecuente, es importante porque genera plantas más tolerantes a situaciones adversas, tales como estrés por sequía, temperaturas altas o bajas del suelo, pH extremos, desbalance nutricional y presencia de elementos tóxicos (Hernández-Acosta et al., 2018).

Otro de los factores que influye en el desarrollo de las plantas jóvenes de cafeto es la radiación solar. Por tratarse de una especie umbrófila solo necesita de 4 a 5 h de luz al día para desarrollarse (De Beenhouwer et al., 2013). Una intensidad de luz excesiva puede afectar su desarrollo, reducir su metabolismo y disminuir la actividad

del sistema antioxidante (Flores et al., 2022). Más de un 60 % de sombra incrementa la presencia de roya (*Hemileia vastatrix*) e incapacita de forma parcial o total a las plantas en su función fotosintetizadora.

El manejo adecuado de la radiación solar puede favorecer una adecuada proporción del sistema radical y el sistema aéreo en cafeto, con diversas implicaciones fisiológicas en diferentes cultivos. Por ejemplo, una intensidad de  $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  es la más apropiada para el crecimiento de *Ocimum basilicum*, con aumento en la clorofila y el peso seco (Pennisi et al., 2020). Intensidades de  $220 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  y fertilización con N ( $7 \text{ mmol L}^{-1}$ ) mejoraron la fotosíntesis y los rendimientos en *Lactuca sativa* (Fu et al., 2017). La altura de planta, la biomasa aérea y la clorofila en *Apium graveolens* se incrementaron al usar una intensidad de  $200 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Qin et al., 2024).

Aunque se cuenta con información básica acerca de la producción de plantas de cafeto en vivero, es necesario complementarla en aspectos como la intensidad de radiación solar óptima para disminuir problemas de plagas y enfermedades; el uso de bioestimulantes para contrarrestar las variaciones ocasionadas por el cambio climático en el crecimiento de las plantas, y la producción de variedades para ambientes intermedios y de altura, que no generen incertidumbre sobre su desempeño, antes del trasplante definitivo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de bioestimulantes y radiación solar en el crecimiento y la fisiología de plantas de *Coffea arabica* en etapa de vivero.

## Materiales y métodos

### Datos generales del estudio

Se realizaron experimentos similares en cuanto a metodología empleada y con una duración de 270 días (del 15 de febrero al 12 de noviembre de los años 2018 y 2022) dentro de un microtúnel, en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México ( $19^\circ 49' 01'' \text{ LN}$ ,  $97^\circ 47' 36'' \text{ LO}$ , a 1764 m de altitud). Las temperaturas promedio durante el día y la noche fueron de  $25 \pm 3^\circ \text{C}$  y  $16 \pm 2^\circ \text{C}$ , respectivamente, con una humedad relativa de 80 a 83 %, ambas medidas con un termómetro-higrómetro digital, donde la precisión de la temperatura fue de  $\pm 0,1^\circ \text{C}$  y de la humedad relativa fue de  $\pm 5\%$ .

Las semillas de cafeto se obtuvieron de la cosecha inmediata anterior de árboles sanos de 10 años en producción, adquiridas en la región cafetalera de Huitzilán de Serdán, Puebla, México. Las semillas sin endocarpio se lavaron con agua corriente y su cubierta seminal se desinfectó antes de la siembra. Se empleó el fungicida carboxamida [N-(triclorometilto) ciclohex-4-eno-1,2-dicarboximida] a una dosis de 1,50 g por cada kg de semilla.

El sustrato utilizado consistió en una mezcla reconstituida con suelo esterilizado de la región, turba (género *Sphagnum*) y arena de río esterilizada (3:2:1, v:v:v). El suelo fue de tipo luvisol, con las siguientes características: pH de 6,83, densidad aparente de  $0,14 \text{ g cm}^{-3}$ , capacidad de intercambio catiónico de  $0,50 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$ , 0,34 % de materia orgánica, 0,19 % de N total,  $0,80 \text{ mg kg}^{-1}$  de P extraíble,  $0,01 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$  de K intercambiable,  $0,03 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$  de Ca y  $0,03 \text{ Cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$  de Mg.

Las semillas se sembraron en bolsas negras de vivero ( $23 \times 30 \text{ cm}$ ). El sombreado durante la emergencia fue del 50 %, el cual se ajustó posteriormente según los objetivos de la investigación. El empleo de bioestimulantes y de los niveles de radiación se inició a partir del primer mes después de la siembra. A los tres meses (aparición de la primera rama en cruz), se eliminó la yema apical en el quinto par de hojas (técnicamente conocido como “colino descopado”), para estimular el brote de dos ejes verticales. Se aplicó un riego por semana y se cuidó la condición fitosanitaria del cultivo durante todo el experimento.

## Tratamientos

Los tratamientos consistieron en la combinación de tres factores. El primer factor fueron los bioestimulantes, que incluyeron algas marinas, hongos micorrízicos arbusculares (HMA) y polímeros orgánicos. Como testigo o tratamiento control, se utilizaron aquellas plantas que no recibieron bioestimulante, pero sí estuvieron sometidas a diferentes dosis de radiación solar. En 1 kg de polvo de algas marinas de las especies *Ascophyllum nodosum*, *Fucus serratus* y *Laminaria japonica*, hubo: 0,75 % de N, 0,50 % de  $P_2O_5$ , 1,20 % de  $K_2O$ , 0,090 % de Ca, 0,070 % de Mg, 0,0020 % de Fe, 0,0010 % de Zn, 0,001 % de Mn, 0,001 % de B, 0,0009 % de Cu, 0,10 % de S, 4,90 % de carbohidratos y 0,4100 % de aminoácidos.

Los HMA empleados fueron *Glomus geosporum*, *G. fasciculatum*, *G. constrictum*, *G. tortuosum* y *G. intraradices*. En 1 kg de polímeros orgánicos hubo 20,22 % de polímeros de proteínas y polisacáridos,  $1 \times 10^5$  UFC g de *Azospirillum brasilense*,  $1 \times 10^6$  esporas g de *Trichoderma harzianum*,  $1 \times 10^7$  UFC g de *Bacillus subtilis*, 3 % de P, 9000 ppm de auxinas, 14 000 ppm de Zn, 4160 ppm de B, 62 400 ppm de Ca, 0,102 ppm de Cu, 7,8 ppm de Fe, 31 200 ppm de Mg, 1,3 ppm de Mn y 0,102 ppm de Mo.

Los bioestimulantes fueron proporcionados por Arvensis México. Se aplicaron a una dosis de 6 g disueltos en 100 mL de agua, vía edáfica, cada 15 días en cada unidad experimental. Para reducir la variabilidad y obtener resultados más precisos, se utilizó una planta en cada bolsa como unidad experimental.

El segundo factor fue la radiación, con los niveles de 81, 168, 278 y  $440 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Los valores se obtuvieron al promediar los datos obtenidos los lunes, miércoles y viernes de cada mes, a las 12 h dentro del invernadero. La intensidad de radiación solar que recibieron las plantas se ajustó mediante malla sombra; la densidad de flujo de fotones fotosintéticos y activos se midió por encima de la planta con un medidor digital de radiación solar.

El tercer factor consistió en las variedades de *Coffea arabica*, que incluyeron Caturra Roja, Costa Rica 95, Garnica y Marsellesa. Dos variedades para ambientes intermedios (Costa Rica 95 y Marsellesa) y dos para ambientes de altura (Caturra Roja y Garnica). La orografía de la Sierra Norte de Puebla, México, varía en altitudes que van de los 100 a 2300 m, lo cual genera microclimas cálidos propicios para el cultivo de diferentes variedades de café.

## VARIABLES DE RESPUESTA

A los 270 días después de la aplicación de los tratamientos, se evaluaron diversas variables de respuesta. La colonización micorrízica (CM, %) se desarrolló con la técnica de clareo y tinción propuesta por Phillips y Hayman (1970), modificada para raíces leñosas con la técnica de Muñoz-Márquez et al. (2009), luego fue procesada en el Laboratorio de Anatomía e Histología Vegetal del Colegio de Postgraduados, México. Se consideraron hifas, vesículas y arbusculos.

La proporción del sistema radical (PSR,  $\text{g g}^{-1}$ ) [ $\text{g}$  (raíz)  $\text{g}^{-1}$  (planta)] permitió cuantificar la relación entre la biomasa seca total del sistema radical y la biomasa seca total de la planta (Poorter et al., 2014).

La tasa de crecimiento relativo (TCR,  $\text{g g}^{-1} \text{día}$ ) se calculó con la ecuación  $TC = [(W_2 - W_1) / (T_2 - T_1)] / S$ , donde  $W_2$  y  $W_1$  son la biomasa seca final e inicial de la planta completa;  $T_2$  y  $T_1$ , el momento final e inicial del crecimiento, y  $S$ , el área de la bolsa de vivero ocupada por la planta (Hunt et al., 2002).

La proporción de la parte aérea (PPA,  $\text{g g}^{-1}$ ) [ $\text{g}$  (parte aérea)  $\text{g}^{-1}$  (planta)], permitió cuantificar la relación entre la biomasa seca total de la parte aérea y la biomasa seca total de la planta (Poorter et al., 2014).

El contenido de clorofila ( $\text{mg g}^{-1}$  PMF, peso de la materia fresca) se midió en hojas con actividad fotosintética, de color verde intenso y lámina expandida. Las muestras fueron procesadas en el Laboratorio Nacional de Investigación y Servicio Agroalimentario y Forestal, México. De acuerdo con la metodología de Lichtenthaler y Buschmann (2001), la extracción de pigmentos se realizó con acetona fría al 80 %. Después, las diluciones fueron transferidas a espectrofotometría (espectrofotómetro UV/Visible Perkin Elmer Lambda 25, España) y leídas a absorbancias de 662, 645 y 665 nm (clorofila a, clorofila b y clorofila total, respectivamente).

La concentración de pigmentos se calculó en  $\mu\text{g}$  por cada mL de extracto. Las siguientes fórmulas son una variante de las ecuaciones de Arnon, para clorofila a (CHLa) con la ecuación 1, para clorofila b (CHLb) con la ecuación 2 y para clorofila total (CHLt) con la ecuación 3.

$$\text{CHLa} = (((12,77 \times \lambda_{662} - 2,43 \times \lambda_{645}) \times 10) / 0,5) / 1000 \quad (1)$$

$$\text{CHLb} = (((22,52 \times \lambda_{645} - 4,82 \times \lambda_{662}) \times 10) / 0,5) / 1000 \quad (2)$$

$$\text{CHLt} = \text{CHLa} + \text{CHLb} \quad (3)$$

Donde:

$\lambda_{662}$  y  $\lambda_{645}$  representan la absorbancia de la muestra medida a longitudes de onda de 662 nm y 645 nm (longitudes son específicas para la absorción máxima de clorofila a y b); 12,77 y 2,43 son coeficientes de extinción específicos para la clorofila a, a estas longitudes de onda, mientras que 22,52 y 4,82, lo son para clorofila b; 10 es un factor de conversión, relacionado con el volumen de extracción utilizado; 0,5 es la masa de la muestra de tejido vegetal utilizada, expresada en gramos, y 1000 es un factor de conversión para pasar de microgramos a miligramos.

El contenido de nutrientes en hojas ( $\text{g kg}^{-1}$  PMS) se determinó durante la etapa de plántula, donde la concentración de macronutrientes en el peso de la materia seca (PMS) es más importante que la de micronutrientes. Las muestras de hoja (150 g por tratamiento) se secaron al aire, se colocaron en bolsas de papel, se etiquetaron y se enviaron al Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C., México, para sus determinaciones. El N se cuantificó por el método micro Kjeldahl (Carter & Gregorich, 2008), mientras que el P, K, Ca y Mg se determinaron mediante la técnica de espectrofotometría de emisión atómica por plasma de acoplamiento (equipo: ICP-OES, mod. 725, Estados Unidos de América).

## Análisis estadístico

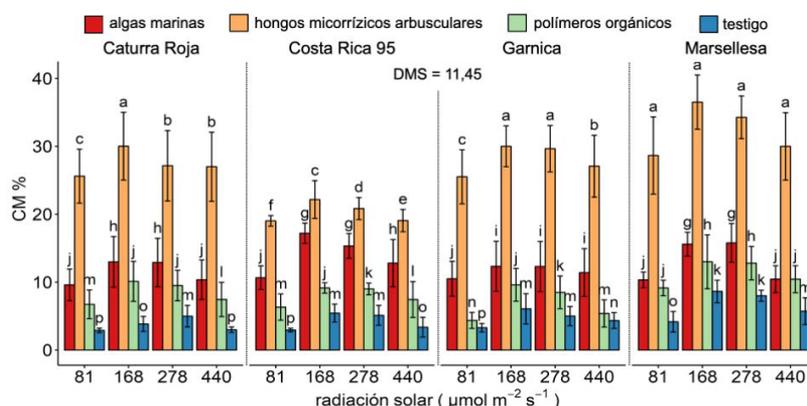
Los experimentos tuvieron un diseño factorial  $4 \times 4 \times 4$ . El factor 1 fueron los bioestimulantes (algas marinas, HMA, polímeros orgánicos y testigo); el factor 2 fue la radiación solar y sus niveles (81, 168, 278 y  $440 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), y el factor 3 fueron las variedades de cafeto (Caturra Roja, Costa Rica 95, Garnica y Marsellesa). La asignación de tratamientos a cada unidad experimental (UE) fue en bloques al azar con cuatro repeticiones. Con los datos promedio de ambos años se realizaron análisis de varianza. Al detectar diferencias estadísticas entre tratamientos, se hicieron pruebas de comparación de medias de Tukey ( $p \leq 0,05$ ) con el programa estadístico RStudio versión 1.4.1717.

## Resultados

Entre variedades, bioestimulantes y niveles de radiación solar, hubo diferencia estadística ( $p \leq 0,05$ ) debido a una interacción compleja entre ellos. No se apreció un patrón claro y consistente en el efecto de la radiación sobre la CM en las variedades. A los 270 días después de la siembra, el porcentaje más alto de CM fue de 36,51 % en la variedad Marsellesa, al aplicarle HMA y someterla a  $168 \pm 36 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de radiación solar (Figura 1).

Los HMA ofrecieron los valores más altos de CM en todas las variedades y niveles de radiación. El menor porcentaje de infección (2,90 %) se presentó en raíces de la variedad Caturra Roja, sin aplicación de bioestimulantes y con una intensidad de radiación solar de  $81 \pm 23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . En esta investigación, la aplicación de HMA incrementó hasta en 92,10 % la CM en raíces.

Para la PSR, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0,05$ ) entre bioestimulantes y niveles de radiación, para ninguna de las variedades de cafeto (Figura 2). Los bioestimulantes aplicados (algas

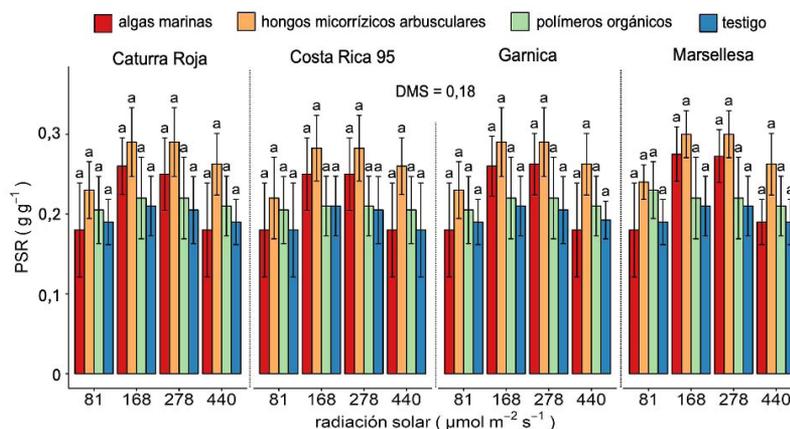


**Figura 1.** Colonización micorrizica (CM, %) en raíces de cuatro variedades de *Coffea arabica* sometidas a diferente bioestimulación edáfica y niveles de radiación solar, a los 270 días después de la siembra, dentro de un microtúnel en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Años 2018 y 2022.

Las líneas verticales sobre las barras representan el error estándar de la media. Letras distintas en las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). **DMS:** Diferencia mínima significativa.

**Figure 1.** Mycorrhizal colonization (MC, %) in the roots of four *Coffea arabica* varieties subjected to different edaphic biostimulation and solar irradiation levels, 270 days after sowing, inside a greenhouse at the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Mexico. Years 2018 and 2022.

The vertical lines above the bars represent the standard error of the mean. Different letters on the bars indicate significant differences between treatments according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). **DMS:** Least significant difference.



**Figura 2.** Proporción del sistema radical (PSR,  $g\ g^{-1}$ ) en cuatro variedades de *Coffea arabica* sometidas a diferente bioestimulación edáfica y niveles de radiación solar, a los 270 días después de la siembra, dentro de un microtúnel en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Años 2018 y 2022.

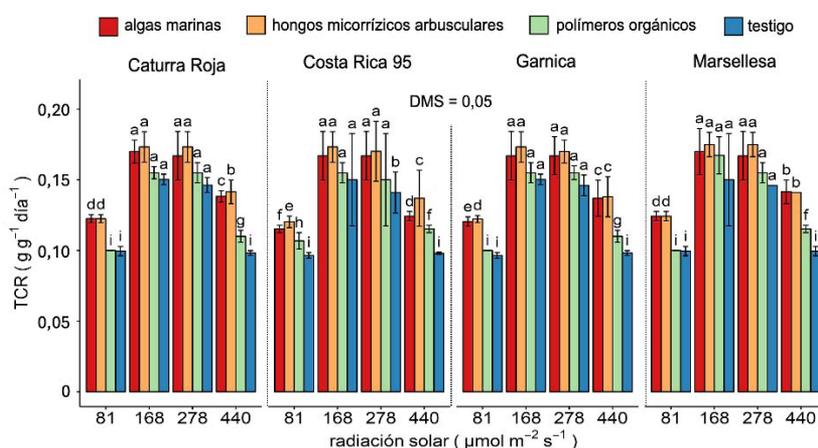
Las líneas verticales sobre las barras representan el error estándar de la media. Letras distintas en las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). **DMS:** Diferencia mínima significativa.

**Figure 2.** Root system proportion (RSP,  $g\ g^{-1}$ ) in four *Coffea arabica* varieties subjected to different edaphic biostimulation and solar irradiation levels, 270 days after sowing, inside a greenhouse at the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Mexico. Years 2018 and 2022.

The vertical lines above the bars represent the standard error of the mean. Different letters on the bars indicate significant differences between treatments according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). **DMS:** Least significant difference.

marinas, HMA y polímeros orgánicos) no tuvieron un efecto significativo en la PSR en comparación con la no aplicación de bioestimulante (testigo), bajo las condiciones experimentales utilizadas. El dato registrado más alto fue de  $0,30 \text{ g g}^{-1}$  en cafetos variedad Marsellesa, con aplicación de HMA y  $168 \pm 36$  a  $278 \pm 44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  de radiación solar. Se observó una ligera tendencia visual a que los tratamientos con HMA muestren valores de PSR más altos en algunas condiciones, pero estas diferencias no fueron estadísticamente significativas según el análisis presentado.

Los tratamientos con algas marinas y HMA tuvieron un efecto positivo significativo en la TCR de las plantas de cafeto. La TCR presentó diferencia estadística ( $p \leq 0,05$ ) debido al efecto de los bioestimulantes y los niveles de radiación (Figura 3). La TCR más alta fue de  $0,175 \text{ g g}^{-1} \text{ día}$  en plántulas de cafeto variedad Marsellesa, con aplicación de HMA y algas marinas a una intensidad de radiación de  $168 \pm 36$  a  $278 \pm 44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . La menor TCR ( $0,096 \text{ g g}^{-1} \text{ día}$ ) se registró en la variedad Costa Rica 95 en plantas testigo y a una intensidad de radiación de  $81 \pm 23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . La TCR disminuyó hasta en  $0,079 \text{ g g}^{-1} \text{ día}$  cuando no se aplicaron bioestimulantes radicales.



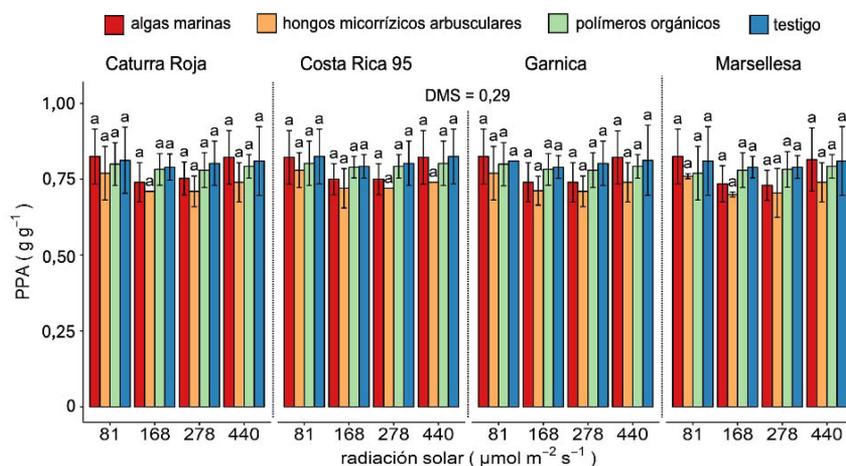
**Figura 3.** Tasa de crecimiento relativo (TCR,  $\text{g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) en cuatro variedades de *Coffea arabica* sometidas a diferente bioestimulación edáfica y niveles de radiación solar, a los 270 días después de la siembra, dentro de un microtúnel en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Años 2018 y 2022.

Las líneas verticales sobre las barras representan el error estándar de la media. Letras distintas en las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). **DMS:** Diferencia mínima significativa.

**Figure 3.** Relative growth rate (RGR,  $\text{g g}^{-1} \text{ día}^{-1}$ ) in four *Coffea arabica* varieties subjected to different edaphic biostimulation and solar irradiation levels, 270 days after sowing, inside a greenhouse at the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Mexico. Years 2018 and 2022.

The vertical lines above the bars represent the standard error of the mean. Different letters on the bars indicate significant differences between treatments according to Tukey's test ( $p \leq 0.05$ ). **DMS:** Least significant difference.

En la PPA no hubo diferencia estadísticamente significativa ( $p \leq 0,05$ ) entre bioestimulantes y niveles de radiación para ninguna de las variedades de cafeto (Figura 4). Los bioestimulantes aplicados (algas marinas, HMA y polímeros orgánicos) no tuvieron un efecto significativo en la PPA en comparación con la no aplicación de bioestimulante (testigo), bajo las condiciones experimentales utilizadas. La amplitud de los promedios generales entre variedades fue baja, de  $0,764$  a  $0,781 \text{ g g}^{-1}$ . El dato observado más alto fue de  $0,90 \text{ g g}^{-1}$  sin mostrar una distinción clara entre variedad, bioestimulante y nivel de radiación.



**Figura 4.** Proporción de la parte aérea (PPA,  $\text{g g}^{-1}$ ) en cuatro variedades de *Coffea arabica* sometidas a diferente bioestimulación edáfica y niveles de radiación solar, a los 270 días después de la siembra, dentro de un microtúnel en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Años 2018 y 2022.

Las líneas verticales sobre las barras representan el error estándar de la media. Letras distintas en las barras indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). **DMS:** Diferencia mínima significativa.

**Figure 4.** Aerial part proportion (APP,  $\text{g g}^{-1}$ ) in four *Coffea arabica* varieties subjected to different edaphic biostimulation and solar irradiation levels, 270 days after sowing, inside a greenhouse at the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Mexico. Years 2018 and 2022.

The vertical lines above the bars represent the standard error of the mean. Different letters on the bars indicate significant differences between treatments according to Tukey's test ( $p \leq 0,05$ ). **DMS:** Least significant difference.

El valor más alto en CHLa ( $2,05 \text{ mg g}^{-1} \text{ PMF}$ ) se observó en la variedad Marsellesa a los 270 días después de la siembra, al aplicar polímeros orgánicos y someter las plántulas a una radiación solar de  $440 \pm 59 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . La más alta CHLb ( $1,08 \text{ mg g}^{-1} \text{ PMF}$ ) se obtuvo en la variedad Costa Rica 95, con la aplicación de polímeros orgánicos y una intensidad de radiación alta ( $440 \pm 59 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). La CHLt ( $3,08 \text{ mg g}^{-1} \text{ PMF}$ ) fue mayor en las variedades Costa Rica 95 y Marsellesa, con la aplicación de polímeros orgánicos y una intensidad de radiación de  $440 \pm 59 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Cuadro 1).

Los tres factores de estudio (bioestimulantes, radiación solar y variedades de cafeto) fueron determinantes en la concentración de clorofila en hojas, y hubo diferencia estadística ( $p \leq 0,05$ ) entre ellos. La aplicación edáfica de polímeros orgánicos y una alta intensidad de radiación solar en plantas jóvenes mejoraron el contenido de CHLt hasta en 1,6 veces.

Cantidades suficientes de macronutrientes se obtuvieron en las cuatro variedades de cafeto, al bioestimularlas con algas, polímeros y HMA. La intensidad de radiación solar fue de  $168 \pm 36$  a  $278 \pm 44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Cuadro 2).

Entre variedades, bioestimulantes y niveles de radiación, se observó diferencia estadística ( $p \leq 0,05$ ) en la concentración nutricional. Los valores más altos de N, P, K, Ca y Mg fueron 26,85, 16,74, 19,90, 13,96 y  $4,66 \text{ g kg}^{-1}$  PMS, respectivamente. Las menores concentraciones se encontraron en la variedad Costa Rica 95, sin la aplicación de bioestimulantes y a una intensidad de radiación baja ( $81 \pm 23 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ).

**Cuadro 1.** Bioestimulación radical y radiación solar que propician el contenido de clorofila más alto en hojas de *Coffea arabica* a los 270 días después de la siembra, dentro de un microtúnel en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Años 2018 y 2022.

**Table 1.** Root biostimulation and solar irradiation that leads to the highest chlorophyll content in *Coffea arabica* leaves at 270 days after sowing, inside a greenhouse at the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Mexico. Years 2018 and 2022.

| Tratamiento           | Clorofila a              | Clorofila b         | Clorofila total     |
|-----------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
|                       | (mg g <sup>-1</sup> PMF) |                     |                     |
| Co.T.278 <sup>§</sup> | 1,72 <sup>efg</sup>      | 0,83 <sup>abc</sup> | 2,55 <sup>hij</sup> |
| Co.T.440              | 1,83 <sup>cde</sup>      | 0,97 <sup>abc</sup> | 2,80 <sup>bcd</sup> |
| Co.M.278              | 1,72 <sup>efg</sup>      | 0,83 <sup>abc</sup> | 2,55 <sup>def</sup> |
| Co.M.440              | 1,90 <sup>abc</sup>      | 0,95 <sup>abc</sup> | 2,85 <sup>abc</sup> |
| Co.A.168              | 1,63 <sup>hij</sup>      | 0,83 <sup>abc</sup> | 2,46 <sup>mno</sup> |
| Co.A.278              | 1,80 <sup>cde</sup>      | 0,98 <sup>abc</sup> | 2,78 <sup>bcd</sup> |
| Co.A.440              | 1,90 <sup>abc</sup>      | 0,95 <sup>abc</sup> | 2,85 <sup>abc</sup> |
| Co.P.278              | 1,81 <sup>cde</sup>      | 0,90 <sup>abc</sup> | 2,71 <sup>cde</sup> |
| Co.P.440              | 2,00 <sup>ab</sup>       | 1,08 <sup>a</sup>   | 3,08 <sup>a</sup>   |
| Ma.T.278              | 1,71 <sup>fgh</sup>      | 0,88 <sup>abc</sup> | 2,59 <sup>efg</sup> |
| Ma.T.440              | 1,83 <sup>cde</sup>      | 0,90 <sup>abc</sup> | 2,73 <sup>cde</sup> |
| Ma.M.168              | 1,60 <sup>ikl</sup>      | 0,84 <sup>abc</sup> | 2,44 <sup>nop</sup> |
| Ma.M.440              | 1,92 <sup>abc</sup>      | 0,91 <sup>abc</sup> | 2,83 <sup>abc</sup> |
| Ma.A.168              | 1,68 <sup>ghi</sup>      | 0,83 <sup>abc</sup> | 2,51 <sup>klm</sup> |
| Ma.A.440              | 1,94 <sup>abc</sup>      | 0,85 <sup>abc</sup> | 2,79 <sup>bcd</sup> |
| Ma.P.440              | 2,05 <sup>a</sup>        | 1,05 <sup>ab</sup>  | 3,08 <sup>a</sup>   |
| Ca.T.278              | 1,73 <sup>efg</sup>      | 0,84 <sup>abc</sup> | 2,57 <sup>ghi</sup> |
| Ca.M.440              | 1,92 <sup>abc</sup>      | 0,96 <sup>abc</sup> | 2,88 <sup>abc</sup> |
| Ca.A.278              | 1,80 <sup>cde</sup>      | 0,83 <sup>abc</sup> | 2,63 <sup>cde</sup> |
| Ca.A.440              | 1,92 <sup>abc</sup>      | 0,90 <sup>abc</sup> | 2,82 <sup>abc</sup> |
| Ca.P.278              | 1,81 <sup>cde</sup>      | 0,89 <sup>abc</sup> | 2,70 <sup>cde</sup> |
| Ca.P.440              | 2,01 <sup>a</sup>        | 1,02 <sup>abc</sup> | 3,03 <sup>ab</sup>  |
| Ga.T.278              | 1,71 <sup>fgh</sup>      | 0,84 <sup>abc</sup> | 2,55 <sup>hij</sup> |
| Ga.T.440              | 1,83 <sup>cde</sup>      | 0,91 <sup>abc</sup> | 2,74 <sup>cde</sup> |
| Ga.M.278              | 1,75 <sup>efg</sup>      | 0,89 <sup>abc</sup> | 2,64 <sup>cde</sup> |
| Ga.M.440              | 1,92 <sup>abc</sup>      | 0,77 <sup>cde</sup> | 2,69 <sup>cde</sup> |
| Ga.A.278              | 1,80 <sup>cde</sup>      | 0,88 <sup>abc</sup> | 2,68 <sup>cde</sup> |
| Ga.A.440              | 1,94 <sup>abc</sup>      | 0,90 <sup>abc</sup> | 2,84 <sup>abc</sup> |
| Ga.P.168              | 1,71 <sup>fgh</sup>      | 0,82 <sup>abc</sup> | 2,53 <sup>ijk</sup> |
| Ga.P.278              | 1,83 <sup>cde</sup>      | 0,91 <sup>abc</sup> | 2,74 <sup>cde</sup> |
| Ga.P.440              | 2,02 <sup>a</sup>        | 1,01 <sup>abc</sup> | 3,03 <sup>ab</sup>  |
| CV (%)                | 14,27                    | 13,59               | 15,33               |
| DMS                   | 0,07                     | 0,08                | 0,12                |

**Co:** Costa Rica 95. **Ma:** Marsellesa. **Ca:** Caturra Roja. **Ga:** Garnica. **T:** Testigo. **M:** Hongos micorrízicos arbusculares. **A:** Algas marinas. **P:** Polímeros orgánicos. **§:** Radiación solar expresada en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . **PMF:** Peso de la materia fresca. **CV:** Coeficiente de variación. **DMS:** Diferencia mínima significativa. Medias con la misma letra en cada columna representan igualdad estadística (Tukey,  $p \leq 0,05$ ). / **Co:** Costa Rica 95. **Ma:** Marsellesa. **Ca:** Caturra Roja. **Ga:** Garnica. **T:** Control. **M:** Arbuscular mycorrhizal fungi. **A:** Seaweed. **P:** Organic polymers. **§:** Solar irradiation expressed in  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . **PMF:** Weight of fresh matter. **CV:** Coefficient of variation. **DMS:** Least significant difference. Means with the same letter in each column represent statistical equality (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

**Cuadro 2.** Bioestimulación radical y radiación solar que propician el contenido nutricional más alto en hojas de *Coffea arabica* a los 270 días después de la siembra, dentro de un microtúnel en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. Años 2018 y 2022.

**Table 2.** Root biostimulation and solar irradiation that leads the highest nutritional content in *Coffea arabica* leaves at 270 days after sowing, inside a greenhouse at the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Mexico. Years 2018 and 2022.

| Tratamiento              | Nitrógeno            | Fósforo              | Potasio             | Calcio              | Magnesio           |
|--------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| (g kg <sup>-1</sup> PMS) |                      |                      |                     |                     |                    |
| Co.M.168§                | 25,13 <sup>aAB</sup> | 14,35 <sup>abB</sup> | 16,53 <sup>aB</sup> | 13,05 <sup>aA</sup> | 4,03 <sup>aA</sup> |
| Co.A.168                 | 25,87 <sup>aA</sup>  | 15,62 <sup>aA</sup>  | 18,31 <sup>aA</sup> | 13,56 <sup>aA</sup> | 4,30 <sup>aA</sup> |
| Co.A.278                 | 25,58 <sup>aA</sup>  | 15,11 <sup>aA</sup>  | 17,77 <sup>aA</sup> | 13,53 <sup>aA</sup> | 4,13 <sup>aA</sup> |
| Co.P.168                 | 26,53 <sup>aA</sup>  | 16,25 <sup>aA</sup>  | 19,33 <sup>aA</sup> | 13,81 <sup>aA</sup> | 4,45 <sup>aA</sup> |
| Co.P.278                 | 26,22 <sup>aA</sup>  | 16,08 <sup>aA</sup>  | 18,64 <sup>aA</sup> | 13,70 <sup>aA</sup> | 4,29 <sup>aA</sup> |
| Ma.M.168                 | 25,35 <sup>aA</sup>  | 14,51 <sup>aAB</sup> | 17,43 <sup>aA</sup> | 13,55 <sup>aA</sup> | 4,13 <sup>aA</sup> |
| Ma.M.278                 | 25,07 <sup>aAB</sup> | 14,23 <sup>abB</sup> | 16,40 <sup>aB</sup> | 12,99 <sup>aA</sup> | 3,94 <sup>aA</sup> |
| Ma.A.168                 | 26,12 <sup>aA</sup>  | 15,91 <sup>aA</sup>  | 18,55 <sup>aA</sup> | 13,75 <sup>aA</sup> | 4,28 <sup>aA</sup> |
| Ma.A.278                 | 25,77 <sup>aA</sup>  | 15,60 <sup>aA</sup>  | 17,92 <sup>aA</sup> | 13,60 <sup>aA</sup> | 4,19 <sup>aA</sup> |
| Ma.P.168                 | 26,85 <sup>aA</sup>  | 16,74 <sup>aA</sup>  | 19,90 <sup>aA</sup> | 13,96 <sup>aA</sup> | 4,66 <sup>aA</sup> |
| Ma.P.278                 | 26,41 <sup>aA</sup>  | 16,21 <sup>aA</sup>  | 19,11 <sup>aA</sup> | 13,96 <sup>aA</sup> | 4,40 <sup>aA</sup> |
| Ca.M.168                 | 25,34 <sup>aA</sup>  | 14,55 <sup>aAB</sup> | 17,38 <sup>aA</sup> | 13,69 <sup>aA</sup> | 4,09 <sup>aA</sup> |
| Ca.M.278                 | 24,90 <sup>aB</sup>  | 14,19 <sup>abB</sup> | 16,44 <sup>aB</sup> | 12,81 <sup>aB</sup> | 3,90 <sup>aA</sup> |
| Ca.A.168                 | 26,19 <sup>aA</sup>  | 15,80 <sup>aA</sup>  | 18,55 <sup>aA</sup> | 13,54 <sup>aA</sup> | 4,17 <sup>aA</sup> |
| Ca.A.278                 | 25,77 <sup>aA</sup>  | 15,33 <sup>aA</sup>  | 17,90 <sup>aA</sup> | 13,67 <sup>aA</sup> | 4,17 <sup>aA</sup> |
| Ca.P.168                 | 26,57 <sup>aA</sup>  | 16,62 <sup>aA</sup>  | 19,55 <sup>aA</sup> | 13,94 <sup>aA</sup> | 4,54 <sup>aA</sup> |
| Ca.P.278                 | 26,44 <sup>aA</sup>  | 16,14 <sup>aA</sup>  | 19,07 <sup>aA</sup> | 13,91 <sup>aA</sup> | 4,37 <sup>aA</sup> |
| Ga.M.168                 | 25,28 <sup>aA</sup>  | 14,33 <sup>abB</sup> | 16,66 <sup>aB</sup> | 13,20 <sup>aA</sup> | 4,07 <sup>aA</sup> |
| Ga.A.168                 | 25,90 <sup>aA</sup>  | 15,81 <sup>aA</sup>  | 18,43 <sup>aA</sup> | 13,47 <sup>aA</sup> | 4,30 <sup>aA</sup> |
| Ga.A.278                 | 25,55 <sup>aA</sup>  | 15,20 <sup>aA</sup>  | 17,79 <sup>aA</sup> | 13,45 <sup>aA</sup> | 4,16 <sup>aA</sup> |
| Ga.P.168                 | 26,51 <sup>aA</sup>  | 16,55 <sup>aA</sup>  | 19,52 <sup>aA</sup> | 13,83 <sup>aA</sup> | 4,50 <sup>aA</sup> |
| Ga.P.278                 | 26,28 <sup>aA</sup>  | 16,11 <sup>aA</sup>  | 18,74 <sup>aA</sup> | 13,78 <sup>aA</sup> | 4,31 <sup>aA</sup> |
| CV (%)                   | 6,48                 | 14,54                | 14,52               | 7,30                | 15,43              |
| DMS                      | 1,76                 | 2,10                 | 2,65                | 1,08                | 0,61               |

**Co:** Costa Rica 95. **Ma:** Marsellesa. **Ca:** Caturra Roja. **Ga:** Garnica. **T:** Testigo. **M:** Hongos micorrízicos arbusculares. **A:** Algas marinas. **P:** Polímeros orgánicos. **§:** Radiación solar expresada en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . **PMS:** Peso de la materia seca. **CV:** Coeficiente de variación. **DMS:** Diferencia mínima significativa. Medias con la misma letra minúscula en cada columna representan igualdad entre bioestimulantes, mientras que letras mayúsculas indican igualdad entre niveles de radiación (Tukey,  $p \leq 0,05$ ). / **Co:** Costa Rica 95. **Ma:** Marsellesa. **Ca:** Caturra Roja. **Ga:** Garnica. **T:** Control. **M:** Arbuscular mycorrhizal fungi. **A:** Seaweed. **P:** Organic polymers. **§:** Solar irradiation expressed in  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . **PMS:** Weight of dry matter. **CV:** Coefficient of variation. **DMS:** Least significant difference. Means with the same lowercase letter per column represent equality among biostimulants, while capital letters indicate equality among irradiation levels (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

## Discusión

La aplicación de bioestimulantes influyó de forma positiva en la CM de los cafetos. La aplicación con HMA fue más infectiva y colonizó las raíces de cafeto, lo cual pudo deberse a una mayor infección radical. Estudios previos han reportado resultados positivos, por ejemplo, un 34,32 % de CM se obtuvo en la variedad Garnica,

inoculada con *G. claroideum*, *G. diaphanum* y *G. albidum* (Hernández-Acosta et al., 2018). Valores superiores (51,33 %) a los de este estudio (36,51 %), fueron obtenidos por Perea Rojas et al. (2018), con la variedad Garnica micorrizada en vivero.

Otros resultados reafirman la importancia de la aplicación de HMA; hasta 31 % de CM en variedad Caturra (Del Aguila et al., 2018) y 90,2 % de CM en variedad Garnica (Trejo et al., 2011). Los HMA tuvieron un efecto significativo en la CM de las raíces de café a bajas intensidades de radiación solar. La respuesta varió entre las variedades y los niveles de radiación, por lo que la elección del bioestimulante podría optimizarse con base en la variedad y las condiciones de cultivo.

Los niveles de colonización más altos se presentaron en las plantas bioestimuladas en comparación con el testigo. Hubo una mayor actividad fisiológica propiciada por los nutrientes, microorganismos benéficos, proteínas y polisacáridos, debido a que estos cumplen funciones estructurales y energéticas (Zangaro et al., 2013). El dinamismo simbiótico mutualista tiende a sincronizarse con la disponibilidad de carbohidratos, como fuente de energía (Schmidt et al., 2011).

El bioestimulante formado por el consorcio micorrízico *G. geosporum*, *G. fasciculatum*, *G. constrictum*, *G. tortuosum* y *G. intraradices* en esta investigación no originó valores superiores en PSR, tampoco las algas ni los polímeros (Figura 2). La PSR es importante porque le proporciona a la planta una mayor capacidad exploratoria en el suelo, absorción de nutrientes y agua, lo cual puede beneficiar su establecimiento definitivo en campo. Los HMA tienen un efecto positivo en diversas variedades de café, como Garnica, Catimor, Caturra y Catuaí, en etapa de vivero, pero no se precisa a qué intensidad de radiación solar (Hernández-Acosta et al., 2018).

Las evidencias sugieren que los cafetos en etapa de vivero establecieron asociaciones simbióticas preferenciales con HMA, en comparación con otros bioestimulantes como algas marinas o polímeros orgánicos. La colonización por HMA está relacionada con un incremento en la proliferación de raíces y una potenciación de la acción auxínica, mediada por mecanismos de regulación homeostática. Estudios previos han documentado respuestas positivas en cafetos tras la inoculación con HMA; por ejemplo, TCR aceleradas en las variedades Garnica y Caturra (Del Aguila et al., 2018; Trejo et al., 2011). Los resultados obtenidos en esta investigación son consistentes con estos hallazgos, lo que refuerza la hipótesis de que la simbiosis con HMA es crucial en las etapas tempranas del crecimiento.

El café tiene una notable capacidad para capturar la radiación solar y sintetizar fotosintatos, lo cual se refleja en su TCR (Hernández Córdova & Soto Carreño, 2013). Es importante contextualizar estas observaciones y considerar la naturaleza fisiológica del café. Por tratarse de una planta umbrófila  $C_3$ , solo requiere de un 20 a 50 % de luz solar, en etapa de plántula para alcanzar una mayor TCR (Encalada Córdova et al., 2016). Este hallazgo subraya el manejo cuidadoso de la exposición lumínica en viveros y plantaciones jóvenes para optimizar su desarrollo.

La luz roja es la que produce la mayor eficiencia fotosintética en el café, en un rango de los 620 a 700 nm de la radiación solar incidente (Reyes-Landa et al., 2018). Los hallazgos de esta investigación tienen implicaciones importantes. Por ejemplo, podrían ayudar al diseño de sistemas de iluminación artificial o al uso de árboles de sombra en sistemas agroforestales con café. Futuros estudios podrían explorar cómo estas respuestas a la luz se modulan a lo largo del ciclo de vida de la planta y cómo interactúan con otros factores ambientales como la temperatura o la disponibilidad de agua.

Los hallazgos reportados con respecto a la cantidad de luz que requieren las plantas de café en vivero pueden ser controvertidos debido a la falta de respaldo experimental. En México, se han empleado niveles de  $855,30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  que difieren significativamente del nivel óptimo para esta especie, que va de  $168 \pm 36$  a  $278 \pm 44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Los patrones observados en esta investigación son bastante consistentes entre las cuatro variedades, lo que sugiere que estos efectos podrían ser generalizables (Figura 3).

Las variedades de café de ambientes intermedios y de altura tuvieron una respuesta diferente en crecimiento debido a la bioestimulación radical y la intensidad de radiación solar en etapa de vivero. Al analizar los componentes

de la TCR, se puede conocer la contribución relativa de los aspectos morfológicos como el área foliar, frente a los fisiológicos (tasa de asimilación neta) y la variabilidad interespecífica (Di Matteo et al., 2015), ya que la partición de fotoasimilados depende de estímulos ambientales, regulados por señales endógenas (Hunt et al., 2002). Los resultados de esta investigación sugieren que con la aplicación de algas marinas y HMA en condiciones de luz moderada, se podría mejorar la TCR del café, lo cual es independiente de la variedad.

La radiación solar y las reacciones bioquímicas son importantes en la producción y distribución de fotoasimilados en las plántulas de café. Sus procesos están influenciados por el funcionamiento endógeno de la planta y pueden ser evaluados mediante parámetros como la PSR, TCR y PPA (Figuras 2-4) (Di Matteo et al., 2015; Hunt et al., 2002). Los resultados de esta investigación sugieren que los bioestimulantes pueden tener un efecto positivo en la TCR, en comparación con las plantas testigo, pero no para PSR ni PPA.

La mejora fisiológica podría estar relacionada con una mayor eficiencia fotosintética y mejor uso del agua. Es importante considerar que estas observaciones se realizaron en condiciones de radiación baja, de  $168 \pm 36$  a  $278 \pm 44 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , lo cual podría contribuir también a una menor evapotranspiración. En el caso específico de los cafetos, investigaciones previas indican que la intercepción de la radiación fotosintética activa tiende a incrementarse a medida que aumenta la PPA, incluso al haber un sombreado parcial de las hojas inferiores (Jezeer et al., 2018).

En etapa de vivero, la formación de plantas bien desarrolladas debe considerar otros factores como tratamientos pregerminativos y tipo de sustrato. Al usar tratamientos pregerminativos y sustrato que contenga arena, se puede obtener un 97 % de emergencia hacia los 50 días (Ortiz-Timoteo et al., 2018). Es posible alcanzar hasta un 93 % de emergencia a los 18 días después de la siembra, con un 50 % de sombreado (radiación solar incidente) y un sustrato reconstituido con suelo luvisol, turba y arena de río.

La radiación solar incidente tiene fuerte influencia en la producción de pigmentos fotosintéticos (CHLa, CHLb y CHLt) en hojas de café. Los resultados de esta investigación reflejan que estas se favorecen con la aplicación de bioestimulantes (Cuadro 1). La eficiencia fotosintética depende de esos pigmentos, pues son fundamentales en la etapa fotoquímica de la fotosíntesis y en el mantenimiento de tejidos vegetales no fotosintéticos (Aguilar-Luna et al., 2022).

Los sistemas enzimáticos relacionados con la producción de pigmentos, pueden afectarse en respuesta a la bioestimulación radical, la radiación incidente y la etapa fenológica. Estudios previos sugieren que los niveles de CHLa, CHLb y CHLt pueden fluctuar en diferentes etapas del crecimiento. Valores superiores para CHLa ( $2,11 \text{ mg g}^{-1} \text{ PMF}$ ), pero inferiores para CHLb y CHLt ( $0,79$  y  $2,93 \text{ mg g}^{-1} \text{ PMF}$ , respectivamente), se pueden alcanzar en etapa de floración (Marín-Garza et al., 2018).

La dinámica de la clorofila puede ser un indicador del estado fisiológico del café. Las investigaciones contrastantes con la variedad Robmex revelaron que las concentraciones de CHLa y CHLt de esta investigación (Cuadro 1) se situaron dentro de rangos normales ( $2,0$  y  $2,8 \text{ mg g}^{-1} \text{ PMF}$ , respectivamente) (Marín-Garza et al., 2018). Estos valores fueron inferiores a los reportados para la variedad Caturra Roja ( $3,26 \text{ mg g}^{-1} \text{ PMF}$ ) y se relacionaron más con la temperatura y formación de hojas, que con el contenido nutricional (DaMatta et al., 2002). La discrepancia entre estudios plantea interrogantes sobre cómo estas diferencias en clorofila podrían traducirse en variaciones en la eficiencia fotosintética, el rendimiento y los mecanismos de adaptación a algún tipo de estrés.

La aplicación de bioestimulantes radicales ha surgido como una estrategia prometedora en la agricultura moderna. Estos han demostrado tener respuestas positivas en especies tan diversas como *Mentha arvensis* (Elhakem, 2019), *Helianthus annuus* (ur-Rehman et al., 2019) y *Hordeum vulgare* (Abdelaal et al., 2020). La relevancia de estos compuestos radica en la tolerancia al estrés y el aumento en la tasa fotosintética (Aguilar-Luna et al., 2022), lo cual podría atribuirse a la modulación de las respuestas bioquímicas y fisiológicas ante condiciones adversas.

Otro aspecto importante del uso de bioestimulantes es una reducción en la inestabilidad de los complejos proteicos y la degradación de las clorofilas (Husen, 2024). La convergencia de estos resultados sugiere que los

bioestimulantes pueden actuar a múltiples niveles dentro de la planta, desde la estabilización de estructuras moleculares hasta la modulación de procesos fisiológicos. La creciente evidencia de los beneficios de los bioestimulantes plantea interrogantes relevantes sobre su potencial para reducir la dependencia de agroquímicos sintéticos y mejorar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

La importancia de las hojas en el desarrollo temprano del cafeto ha sido objeto de creciente atención científica. En un principio, actúan como sumideros de nutrientes, pero después se convierten en fuentes, al exportar fotoasimilados hacia otros órganos, como las raíces (Semedo et al., 2021). El análisis químico foliar como herramienta de diagnóstico del estado nutricional permite una evaluación precisa del vigor en cualquier momento de su desarrollo (Marín-Garza et al., 2018). El ciclo vital de las hojas del cafeto presenta una dinámica compleja. Por ello, investigaciones futuras podrían explicar cómo los factores ambientales y las prácticas de manejo influyen en la eficiencia fotosintética y la absorción nutricional.

Contrario a lo que podría esperarse, bajas intensidades de radiación solar no promueven una excesiva área foliar y tampoco aceleran el metabolismo más allá de lo normal, lo cual parece estar modulado por la acción complementaria de los minerales aportados mediante la bioestimulación radical. Los minerales funcionan como osmorreguladores, activadores de reacciones enzimáticas y constituyentes de estructuras orgánicas (Dubberstein et al., 2016; Semedo et al., 2021). Esta versatilidad subraya la relevancia de una nutrición equilibrada para el desarrollo óptimo del cafeto.

El proceso de redistribución nutricional no se limita al N, sino que también afecta a otros nutrientes, en especial el K. La intensa movilización de N y K dentro de la planta, hace imperativo su monitoreo en las diferentes etapas del desarrollo (Rodríguez Reis et al., 2009). La comprensión de estos procesos sugiere que las prácticas de fertilización y bioestimulación deben adaptarse no solo a una etapa específica del desarrollo, sino también a la intensidad de radiación solar del entorno.

La bioestimulación del cafeto ha emergido como una estrategia nutricional promisoría, dado que la dinámica en el microcosmos edáfico es compleja. Elementos como Ca, Mg, Na y K sirven para la regulación del pH, la presión osmótica y la producción de energía (Chekri et al., 2012). Macronutrientes como N, K y Mg se traslocan de forma constante en el cafeto (Dubberstein et al., 2016; Sadeghian Khalajabadi & Salamanca Jiménez, 2015). Esta traslocación subraya la necesidad de un enfoque integral que considere la disponibilidad de nutrientes durante todo el ciclo de vida. Las fluctuaciones nutricionales no pueden atribuirse solo a factores genéticos, sino que reflejan una compleja interacción entre el agua, el suelo y la atmósfera. Futuros estudios podrían beneficiarse de un enfoque holístico mediante protocolos de bioestimulación adaptados a condiciones locales.

En la etapa de vivero, las plántulas de cafeto mantuvieron concentraciones de macronutrientes dentro de los rangos normales. En esta investigación, no se observaron síntomas de deficiencias en hojas (Cuadro 2). Las distintas concentraciones nutricionales de los bioestimulantes utilizados y su forma de aplicación sugieren un diferente mecanismo de acción en las variedades de ambientes intermedios (Costa Rica 95 y Marsellesa) en comparación con las de ambientes de altura (Caturra Roja y Garnica).

Los bioestimulantes han demostrado ejercer efectos determinantes en la fisiología del cafeto, al ofrecer múltiples beneficios durante su desarrollo temprano. Los HMA, destacan por su capacidad para mejorar la absorción de nutrientes, en particular el P, al expandir la superficie de contacto entre las raíces y el suelo. Las algas marinas estimulan la TCR y aumentan la resistencia al estrés ambiental, lo cual puede atribuirse a la presencia de compuestos bioactivos como fitohormonas y oligosacáridos. Los polímeros orgánicos incrementan la TCR, que puede resultar en plantas más robustas y con mayor acumulación de biomasa. El uso de bioestimulantes es una alternativa agrícola que permite obtener plántulas de calidad antes del trasplante definitivo.

## Conclusiones

La bioestimulación con hongos micorrízicos y la radiación solar de  $168 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  incrementaron en más de 92,10 % la colonización en raíces y promovieron el crecimiento de cafeto, en especial con la variedad Marsellesa. El uso de polímeros orgánicos y radiación solar de  $440 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  mejoró el contenido de clorofila total hasta 1,6 veces en las variedades Costa Rica 95 y Marsellesa. Intensidades de 168 a  $278 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  fueron las más adecuadas para promover una mayor absorción nutricional en la etapa de vivero, en especial con la variedad Marsellesa. Estos hallazgos permiten optimizar el cultivo de cafeto en vivero mediante bioestimulantes específicos, manejo preciso de la radiación solar y selección varietal, para obtener plantas mejor conformadas antes del trasplante definitivo.

## Referencias

- Abdelaal, K. A. A., Attia, K. A., Alamery, S. F., El-Afry, M. M., Ghazy, A. I., Tantawy, D. S., Al-Doss, A. A., El-Shawy, E.-S. E., Abu-Elsaoud, A. M., & Hafez, Y. M. (2020). Exogenous application of proline and salicylic acid can mitigate the injurious impacts of drought stress on barley plants associated with physiological and histological characters. *Sustainability*, 12(5), Article 1736. <http://dx.doi.org/10.3390/su12051736>
- Aguilar-Luna, J. M., Loeza-Corte, J. M., & Díaz-López, E. (2022). Interactive effect of moisture restriction and salicylic acid on biochemical responses in *Phaseolus coccineus*. *Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia (LUZ)*, 39(3), Article e223940. [https://doi.org/10.47280/RevFacAgron\(LUZ\).v39.n3.06](https://doi.org/10.47280/RevFacAgron(LUZ).v39.n3.06)
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2008). *Soil sampling and methods of analysis* (2<sup>nd</sup> ed.) Taylor & Francis Group, LLC.
- Chekri, R., Noël, L., Millour, S., Vastel, C., Kadar, A., Sirot, V., Leblanc, J.-C., & Guérin, T. (2012). Calcium, magnesium, sodium and potassium levels in foodstuffs from the second French total diet study. *Journal of Food Composition and Analysis*, 25(2), 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2011.10.005>
- DaMatta, F. M., Loos, R. A., Silva, E. A., & Loureiro, M. E. (2002). Limitations to photosynthesis in *Coffea canephora* as a result of nitrogen and water availability. *Journal of Plant Physiology*, 159(9), 975–981. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00807>
- De Beenhouwer, M., Aerts, R., & Honnay, O. (2013). A global meta-analysis of the biodiversity and ecosystem service benefits of coffee and cacao agroforestry. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 175, 1–7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.05.003>
- Del Aguila, K. M., Vallejos-Torres, G., Arévalo, L. A., & Becerra, A. G. (2018). Inoculación de consorcios micorrízicos arbusculares en *Coffea arabica*, variedad Caturra en la región San Martín. *Información Tecnológica*, 29(1), 137–146. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000100137>
- Di Matteo, J., Rattin, J., & Di Benedetto, A. (2015). Increase of spinach growth through the use of larger plug cell volume and an exogenous BAP spray. *Journal of Experimental Agriculture International*, 6(6), 372–383. <https://doi.org/10.9734/AJEA/2015/14979>
- Dubberstein, D., Partelli, F. L., Dias, J. R. M., & Espindola, M. C. (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>

- Elhakem, A. H. (2019). Impact of salicylic acid application on growth, photosynthetic pigments and organic osmolytes response in *Mentha arvensis* under drought stress. *Journal of Biological Sciences*, 19(6), 372–380. <https://doi.org/10.3923/jbs.2019.372.380>
- Encalada Córdova, M., Soto Carreño, F., & Morales Guevara, D. (2016). Crecimiento de posturas de café (*Coffea arabica* L.) con cuatro niveles de sombra en dos condiciones edafoclimáticas de Ecuador. *Cultivos Tropicales*, 37(2), 72–78. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4335.7681>
- Farfán Valencia, F. (2011). Las buenas prácticas agrícolas en la caficultura. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *Sistemas de producción de café en Colombia* (pp. 275-309). Centro Nacional de Investigaciones de Café. <https://www.cenicafe.org/es/documents/buenasPracticasCapitulo12.pdf>
- Flores, M., Urrestarazu, M., Amorós, A., & Escalona, V. (2022). High intensity and red enriched LED lights increased the growth of lettuce and endive. *Italian Journal of Agronomy*, 17(1), Article 1915. <https://doi.org/10.4081/ija.2021.1915>
- Fu, Y., Li, H., Yu, J., Liu, H., Cao, Z., Manukovsky, N. S., & Liu, H. (2017). Interaction effects of light intensity and nitrogen concentration on growth, photosynthetic characteristics and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L. var. Youmaicai). *Scientia Horticulturae*, 214, 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.020>
- Hernández-Acosta, E., Trejo-Aguilar, D., Ferrera-Cerrato, R., Rivera-Fernández, A., & González-Chávez, M. C. (2018). Hongos micorrízicos arbusculares en el crecimiento de café (*Coffea arabica* L.) variedades Garnica, Catimor, Caturra y Catuaí. *Agroproductividad*, 11(4), 61–67. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/352/276>
- Hernández Córdova, N., & Soto Carreño, F. (2013). Determinación de índices de eficiencia en los cultivos de maíz y sorgo establecidos en diferentes fechas de siembra y su influencia sobre el rendimiento. *Cultivos Tropicales*, 34(2), 24–29. <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/421/pdf>
- Hunt, R., Causton, D. R., Shipley, B., & Askew, A. P. (2002). A modern tool for classical plant growth analysis. *Annals of Botany*, 90(4), 485–488. <http://dx.doi.org/10.1093/aob/mcf214>
- Husen, A. (2024). *Biostimulants in plant protection and performance* (1<sup>st</sup> ed.) Elsevier Academic Press.
- Jezeer, R. E., Santos, M. J., Boot, R. G. A., Junginger, M., & Verweij, P. A. (2018). Effects of shade and input management on economic performance of small-scale Peruvian coffee systems. *Agricultural Systems*, 162, 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.014>
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-Vis spectroscopy. In R. E. Wrolstad, T. E. Acree, H. An, E. A. Decker, M. H. Penner, D. S. Reid, S. J. Schwartz, C. F. Shoemaker, & P. Sporns, (Eds.). *Current protocols in food analytical chemistry* (pp. F4.3.1–F4.3.8). John Wiley and Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
- Marín-Garza, T., Gómez-Merino, F. C., Aguilar-Rivera, N., Murguía-González, J., Trejo-Téllez, L. I., Pastelín-Solano, M. C., & Castañeda-Castro, O. (2018). Variaciones en área foliar y concentraciones de clorofilas y nutrimentos esenciales en hojas de café robusta (*Coffea canephora* P.) durante un ciclo anual. *Agroproductividad*, 11(4), 36–41. <https://www.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/266/196>
- Montoya Restrepo, E. C., Hernández Arredondo, J. D., Unigarro Muñoz, C. A., & Flórez Ramos, C. P. (2017). Estimación del área foliar en café variedad Castillo® a libre exposición y su relación con la producción. *Cenicafé*, 68(1), 55–61. <https://www.cenicafe.org/es/publications/5.Estimacion.pdf>

- Muñoz-Márquez, E., Macías-López, C., Franco-Ramírez, A., Sánchez-Chávez, E., Jiménez-Castro, J., & González-García, J. (2009). Identificación y colonización natural de hongos micorrízicos arbusculares en nogal. *Terra Latinoamericana*, 27(4), 355–361. <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/download/1273/1492/>
- Ortiz-Timoteo, V., Ordaz-Chaparro, V. M., Aldrete, A., Escamilla-Prado, E., Sánchez-Viveros, G., & López-Romero, R. M. (2018). Tratamientos pregerminativos en semillas de dos especies del género *Coffea*. *Agroproductividad*, 11(4), 68–73. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/272/201>
- Pennisi, G., Pistillo, A., Orsini, F., Cellini, A., Spinelli, F., Nicola, S., Fernández, J. A., Crepaldi, A., Gianquinto, G., & Marcelis, L. F. M. (2020). Optimal light intensity for sustainable water and energy use in indoor cultivation of lettuce and basil under red and blue LEDs. *Scientia Horticulturae*, 272, Article 109508. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109508>
- Perea Rojas, Y. C., Arias, R. M., Medel Ortiz, R., Trejo Aguilar, D., Heredia, G., & Rodríguez Yon, Y. (2018). Effects of native arbuscular mycorrhizal and phosphate-solubilizing fungi on coffee plants. *Agroforestry Systems*, 93, 961–972. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0190-1>
- Phillips, J. M., & Hayman, D. S. (1970). Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55(1), 158–161. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(70\)80110-3](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(70)80110-3)
- Poorter, H., Lambers, H., & Evans, J. R. (2014). Trait correlation networks: a whole-plant perspective on the recently criticized leaf economic spectrum. *New Phytologist*, 201(2), 378–382. <https://doi.org/10.1111/nph.12547>
- Qin, Y., Liu, X., Li, C., Chu, Q., Cheng, S., Su, L., Shao, D., Guo, X., He, Z., & Zhou, X. (2024). Effect of light intensity on celery growth and flavonoid synthesis. *Frontiers in Plant Science*, 14, Article 1326218. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1326218>
- Reyes-Landa, D., Mercado-Mancera, G., Escamilla-Prado, E., & Robledo-Martínez, J. D. (2018). Innovaciones tecnológicas en la producción de planta de café (*Coffea arabica* L.). *Agroproductividad*, 11(4), 74–79. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/273/202>
- Rodrigues Reis, A., Favarin, J. L., Gallo, L. A., Malavolta, E., Ferreira Moraes, M., & Lavres Junior, J. (2009). Nitrate reductase and glutamine synthetase activity in coffee leaves during fruit development. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33(2), 315–324. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000200009>
- Sadeghian Khalajabadi, S., & Salamanca Jiménez, A. (2015). Micronutrientes en frutos y hojas de café. *Cenicafé*, 66(2), 73–87. <https://www.cenicafe.org/es/publications/5.Micronutrientes.pdf>
- Schmidt, B., Gaşpar, S., Camen, D., Ciobanu, I., & Sumălan, R. (2011). Arbuscular mycorrhizal fungi in terms of symbiosis-parasitism continuum. *Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences*, 76(4), 653–659. <https://typeset.io/papers/arbuscular-mycorrhizal-fungi-in-terms-of-symbiosis-4k5hwn6xou>
- Semedo, J. N., Rodrigues, A. P., Lidon, F. C., Pais, I. P., Marques, I., Gouveia, D., Armengaud, J., Silva, M. J., Martins, S., Semedo, M. C., Dubberstein, D., Partelli, F. L., Reboredo, F. H., Scotti-Campos, P., Ribeiro-Barros, A. I., DaMatta, F. M., & Ramalho, J. C. (2021). Intrinsic non-stomatal resilience to drought of the photosynthetic apparatus in *Coffea* spp. is strengthened by elevated air [CO<sub>2</sub>]. *Tree Physiology*, 41(5), 708–727. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpaa158>
- Trejo, D., Ferrera-Cerrato, R., García, R., Varela, L., Lara, L., & Alarcón, A. (2011). Efectividad de siete consorcios nativos de hongos micorrízicos arbusculares en plantas de café en condiciones de invernadero y campo. *Revista Chilena de Historia Natural*, 84(1), 23–31. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-078X2011000100002>

- ur-Rehman, A., Safeer, M., Qamar, R., Mohsin Altaf, M., Sarwar, N., Farooq, O., Mazher Iqbal, M., & Ahmad, S. (2019). Exogenous application of salicylic acid ameliorates growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.) in saline soil. *Agrociencia*, 53(2), 207–217. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1779>
- Zangaro, W., Vergal Rostirola, L., Bochi de Souza, P., De Almeida Alves, R., Azevedo Marques Lescano, L. E., Berbel Lírio Rondina, A., Nogueira, M. A., & Carrenho, R. (2013). Root colonization and spore abundance of arbuscular mycorrhizal fungi in distinct successional stages from an Atlantic rainforest biome in southern Brazil. *Mycorrhiza*, 23, 221–233. <https://doi.org/10.1007/s00572-012-0464-9>