



## ENRIQUECIMIENTO CARBÓNICO EN PLÁNTULAS DE TOMATE PARA INCREMENTAR EL NÚMERO DE FLORES Y FRUTOS POR PLANTA

### CARBON ENRICHMENT ON TOMATO SEEDLINGS TO INCREASE THE NUMBER OF FLOWERS AND FRUITS PER PLANT

Francisca de los Á. Mejía-Betancourt<sup>1</sup>, Felipe Sánchez-Del Castillo<sup>2</sup>,  
Esaú del C. Moreno-Pérez<sup>2\*</sup> y María T. B. Colinas-León<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Agraria, Departamento de Producción Vegetal, Managua, Nicaragua. <sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia, Chapingo, Texcoco, Estado de México, México.

\*Autor de correspondencia (esaump10@yahoo.com.mx)

#### RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es la hortaliza más cultivada bajo invernadero. El objetivo del presente estudio fue favorecer la fotosíntesis de plántulas de tomate mediante enriquecimiento carbónico en esta etapa, que conduzca potencialmente a un mejor crecimiento y posteriormente a una mayor producción de flores y frutos por planta podada al tercer racimo. Se probaron tres niveles de bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en plántulas de tomate aplicados de los 15 a los 35 días después de la siembra (dds). Las plántulas, crecidas en charolas de 60 cavidades, fueron acomodadas al interior de una cámara de crecimiento de 1  $\text{m}^3$  de volumen. Para adicionar  $\text{CO}_2$  se utilizaron velas encendidas para lograr las siguientes concentraciones en ppm: ambiente natural al interior de la cámara (T1: 420-460), una vela (T2: 500-700), dos velas (T3: 700-1000) y el testigo fuera de la cámara y sin vela (T4: 317-402). El diseño usado fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones. A los 30 dds se midieron variables fisiológicas, y a los 35 días altura, diámetro de tallo, área foliar y peso seco de las plántulas. El trasplante se hizo a los 35 dds a una densidad de ocho plantas  $\text{m}^{-2}$ . Posteriormente, se midieron variables de rendimiento y sus componentes. Los resultados indicaron que con los tratamientos T2 y T3 las plántulas tuvieron mayor altura, área foliar y peso seco con respecto al testigo, y con el tratamiento T2 las plantas produjeron cuatro flores y cuatro frutos más que el testigo, asociado con una mayor tasa de asimilación de  $\text{CO}_2$  y conductancia estomática en las hojas. Se concluye que el enriquecimiento carbónico en plántulas de tomate favorece la fotosíntesis, y con ello se producen plántulas con calidad al trasplante y más flores y frutos por planta.

**Palabras clave:** *Solanum lycopersicum* L., alto rendimiento, concentraciones de  $\text{CO}_2$ , floración en tomate.

#### SUMMARY

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is the vegetable most grown under greenhouse conditions. The objective of this study was to promote photosynthesis of tomato seedlings through carbon dioxide enrichment at that stage, which could lead to better growth and subsequently to a higher production of flowers and fruits per plant pruned to the third cluster. Three levels of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) were tested in tomato seedlings applied from 15 to 35 days after planting. The seedlings, grown in 60-cavity trays, were placed inside a growth chamber of 1  $\text{m}^3$  volume. To add  $\text{CO}_2$ , lit candles were used to attain the following concentrations in ppm: natural environment inside the chamber (T1: 420-460), one candle (T2: 500-700), two candles (T3: 700-1000) and out-of-chamber control without candles (T4 = 317-402).

A complete randomized blocks experimental design with four replicates was used. At 30 days after planting (dap), physiological variables were measured, and at 35 days height, stem diameter, leaf area and dry weight of the seedlings. The transplant was done at 35 dds to a density of eight plants  $\text{m}^{-2}$ . Subsequently, yield and its components were measured. Results indicated that with T2 and T3 treatments the seedlings had greater height, leaf area and dry matter weight compared to the control, and with T2 treatment the plants produced four more flowers and four more fruits than the control, associated with a greater rate of  $\text{CO}_2$  assimilation and stomatal conductance in the leaves. It is concluded that carbon enrichment in tomato seedlings promote photosynthesis, and thus, seedlings with transplanting quality are produced and more flowers and fruits per plant.

**Index words:** *Solanum lycopersicum* L.,  $\text{CO}_2$  concentrations, high yield, tomato flowering.

#### INTRODUCCIÓN

En la Universidad Autónoma Chapingo se ha desarrollado tecnología de producción hidropónica en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de invernadero, que consiste en efectuar trasplante tardío (plántulas de 45 a 60 días), realizar despuente del ápice de las plantas a la altura del tercer racimo y establecerlas en densidades de población de 8 plantas  $\text{m}^{-2}$  de invernadero, con lo que se han logrado rendimientos anuales de hasta 450 t  $\text{ha}^{-1}$  en tres ciclos de cultivo al año (Mejía-Betancourt *et al.*, 2023; Moreno-Pérez *et al.*, 2021; Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2021), pero se considera que es posible incrementarlo aún más (Moreno-Pérez *et al.*, 2021).

Dado que con este sistema sólo se cosechan tres racimos por planta, es importante maximizar el potencial productivo de cada racimo (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2021) mediante la formación de un mayor número de flores por racimo, lo que directamente influirá en una mayor producción de frutos y mayor rendimiento por planta y por unidad de superficie, por lo que es pertinente el estudio de los factores que regulan los procesos de

floración y fructificación del tomate bajo este sistema de cultivo (Sánchez-Del Castillo *et al.*, 2014; Vitale *et al.*, 2014).

El proceso de floración del tomate, normalmente se inicia con la formación de más meristemos reproductivos, los que finalmente se desarrollan en flores, debido a que para que un meristemo se desarrolle en una flor es necesario que haya un flujo mínimo de fotoasimilados hacia dichos meristemos, además de las condiciones ambientales en las que las plantas crecen (Heuvelink y Okello, 2018). Es entonces la insuficiencia de fotoasimilados para el desarrollo de estos meristemos lo que afecta el amarre de más flores por inflorescencia. Para evitar este problema, es necesario implementar prácticas que favorezcan un flujo adecuado de fotoasimilados hacia los órganos reproductores, en este caso hacia los primordios florales, promoviendo así la formación de más flores y frutos por racimo (Contreras-Magaña *et al.*, 2013), lo que podría lograrse aumentando la producción de fotoasimilados por la planta (Rodrigues *et al.*, 2019) mediante el enriquecimiento de CO<sub>2</sub> del ambiente, acompañado de un control adecuado de otros factores que influyen en la fotosíntesis como la radiación solar, temperatura, humedad relativa y agua (Aslani *et al.*, 2020; Ji *et al.*, 2020; León-Burgos *et al.*, 2021) y haciendo un uso eficiente de los mismos como podas de hojas y aplicación de reguladores del crecimiento para disminuir el crecimiento vegetativo (Aslani *et al.*, 2020; Glanz-Idan y Wolf, 2020), ya que los factores ambientales señalados ejercen influencias directas o indirectas en la iniciación floral; por ejemplo, la intensidad y duración de la radiación solar actúa como fuente de energía para la fotosíntesis, así como señal que controla el crecimiento, la floración y morfogénesis (Momokawa *et al.*, 2011), las concentraciones de CO<sub>2</sub> como materia prima de la fotosíntesis y la temperatura que regula funciones enzimáticas, las cuales juegan roles significativos en este proceso (Lanoue *et al.*, 2018; Mamatha *et al.*, 2014; Rangaswamy *et al.*, 2021). El periodo sensitivo en el que estos factores ambientales pueden influir en la cantidad de flores del primer racimo es aproximadamente ocho días después de la expansión de los cotiledones, coincidiendo con el momento en que la tercera hoja sobrepasa los 10 mm de longitud; el segundo y tercer racimo se inician entre una y dos semanas después (Contreras-Magaña *et al.*, 2013; Heuvelink y Okello, 2018).

Heuvelink y Okello (2018) también mencionaron que la disponibilidad de carbohidratos es fundamental para el desarrollo y diferenciación floral, ya que son los principales compuestos que proporcionan la energía necesaria para estos procesos. En este contexto, al elevarse la concentración de CO<sub>2</sub> en el ambiente por arriba de 500 ppm, las plantas C<sub>3</sub>, como el tomate, pueden incrementar su tasa fotosintética, lo que se traduce en una mayor

síntesis de azúcares y otros compuestos orgánicos necesarios para el crecimiento y desarrollo, y por ende, una mayor productividad y rendimiento (Pan *et al.*, 2020; Rangaswamy *et al.*, 2021). Con frecuencia el CO<sub>2</sub> es un factor limitante de la producción en los cultivos; en especial, en invernaderos con ventilación deficiente (Li *et al.*, 2017; Sánchez y Moreno, 2017).

A pesar de que existen investigaciones sobre el crecimiento y respuestas fisiológicas del tomate sobre el aumento del CO<sub>2</sub> (Li *et al.*, 2017; Rangaswamy *et al.*, 2021), se sabe poco del efecto posterior de cuando es aplicado en etapa de plántula en un periodo corto de tiempo (Pan *et al.*, 2020), por lo que se llevó a cabo el presente estudio con el objetivo de favorecer la fotosíntesis de plántulas de tomate mediante el enriquecimiento carbónico en esta etapa, que conduzca a un mejor crecimiento y producción de más fotoasimilados para aumentar el número de flores y frutos en los tres primeros racimos de la planta.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación del estudio y material vegetal

El estudio se llevó a cabo de junio a noviembre de 2022 en condiciones de invernadero, en la Universidad Autónoma Chapingo en Texcoco, Estado de México, México, ubicado en las coordenadas geográficas 19° 29' 35.03" latitud norte y 98° 52' 19.86" longitud oeste, a 2250 msnm. Se utilizó el híbrido de tomate Paipai de la empresa semillera Enza Zaden, que es de fruto tipo saladette (Roma) y hábito de crecimiento indeterminado.

### Establecimiento del experimento

La siembra de la semilla se hizo en charolas de 60 cavidades, utilizando como sustrato una mezcla de turba (peat moss) y perlita en proporción 1:1 (v:v). Estas charolas fueron colocadas dentro de un invernadero de producción de plántula de 300 m<sup>2</sup>, con cubierta de polietileno térmico, de alta dispersión de radiación y 70 % de trasmisión de radiación solar, ventanas laterales con cortinas de polietileno y mallas antiáfidos, calefacción a base de gas LP y un muro húmedo con extractores de aire como sistema de enfriamiento.

### Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos fueron diferentes concentraciones de CO<sub>2</sub> aplicadas durante 20 días en la etapa de plántula (de los 15 a los 35 días después de la siembra (dds). Como fuente de CO<sub>2</sub>, se utilizaron velas de cera de 25 cm de altura y 2.5 cm de diámetro, encendidas diariamente durante ocho horas (de las 9:00 am a las 5:00 pm), ubicadas al

interior de una cámara de crecimiento de 1 m<sup>3</sup> de volumen (Figura 1), construidas con estructura metálica (PTR) de 1.27 cm y cubiertas con polietileno transparente con 90 % de transmisión de la radiación solar, a la que se incorporó una ventana de forma triangular con malla antiáfidos de 27 cm de base por 17 cm de alto para expulsar el aire caliente y en la que se instaló un mini ventilador eléctrico portable (Hertekdo® Desktop Fan, Fujian, China) que permitía una velocidad mínima de 3.9 m s<sup>-1</sup> para promover la recirculación del aire y mantener la concentración correspondiente de CO<sub>2</sub> en toda la cámara, al mismo tiempo que facilitó la salida del aire caliente a través de la ventana (Figura 1). Los tratamientos fueron:

**Tratamiento 1.** Plántulas de tomate expuestas a 420-460 ppm de CO<sub>2</sub> ambiental. Las plántulas fueron colocadas dentro de una cámara de crecimiento.

**Tratamiento 2.** Plántulas de tomate expuestas a 500-700 ppm de CO<sub>2</sub>. Las plántulas fueron colocadas dentro de una cámara de crecimiento; en su interior se tenía una vela de cera encendida, que permitió mantener la concentración de CO<sub>2</sub> mencionada.

**Tratamiento 3.** Plántulas de tomate expuestas a 700-1000 ppm de CO<sub>2</sub>. Las plántulas fueron colocadas dentro de una cámara de crecimiento; en su interior se tenía dos velas de cera encendidas, que mantuvieron dicha concentración de CO<sub>2</sub>.

**Tratamiento 4.** Testigo con plántulas de tomate

expuestas a 317-402 ppm de CO<sub>2</sub> durante el día. Las plántulas crecieron directamente bajo el invernadero de producción de 300 m<sup>2</sup>, sin cámaras de crecimiento y sin velas.

En los primeros tres tratamientos las cámaras de crecimiento estaban, a su vez, colocadas al interior del invernadero de producción de 300 m<sup>2</sup> (Figura 2).

El experimento fue establecido bajo un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro tratamientos, cuatro repeticiones y un grupo de 10 plántulas como unidad experimental.

### Manejo de las plántulas

Los primeros cinco días después de la siembra (dds) las plántulas fueron irrigadas de forma manual con agua sola; posteriormente, y hasta el momento del trasplante (35 dds), el riego se hizo con solución nutritiva que contenía las siguientes concentraciones (mg L<sup>-1</sup>): N: 100, P: 25, K: 125, Ca: 125, S: 75, Mg: 25, Fe: 1.0, Mn: 0.1, Cu: 0.1, Mn: 1, B: 0.5 y Zn: 0.1.

Con la finalidad de monitorear la concentración de CO<sub>2</sub> al interior del invernadero y de cada cámara de crecimiento fue colocado un medidor de CO<sub>2</sub> infrarojo (AG Electrónica®, KCO<sub>2</sub>-manual, Shenzhen, China), como se muestra en la Figura 1, así como un Datalogger (RHT10, Extech Instruments Co., Waltham, Massachusetts, EUA) para registrar temperatura y humedad relativa a lo largo del día.

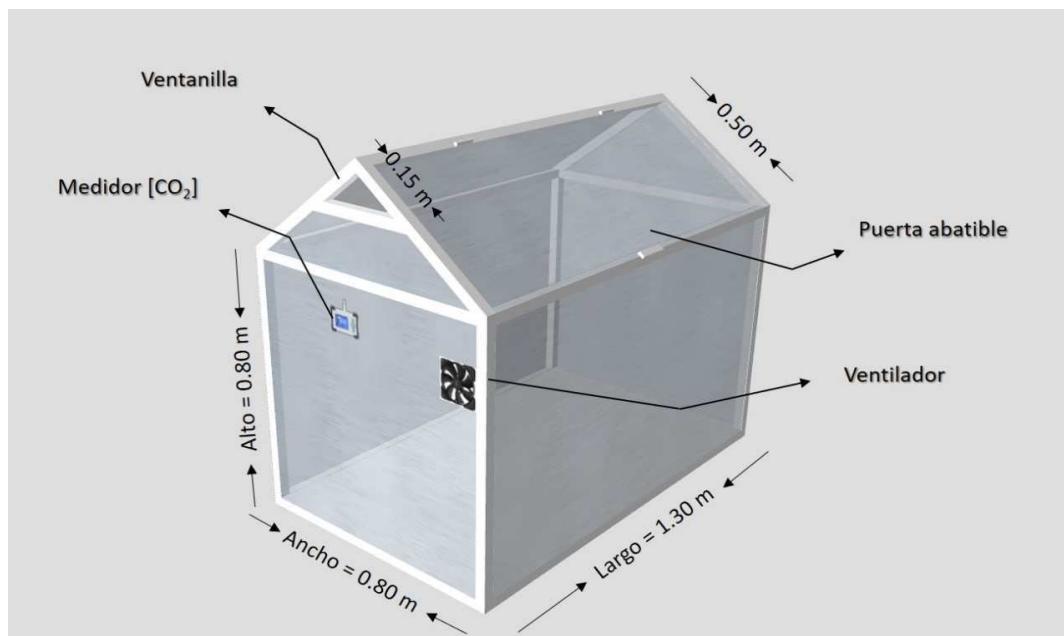


Figura 1. Esquema de la cámara de crecimiento: dimensiones y equipamiento.



Figura 2. Cámaras de crecimiento al interior del invernadero. a) Tratamiento 1, b) tratamiento 2, c) tratamiento 3.

Los datos registrados se muestran en el Cuadro 1; además, se dispuso de un sensor cuántico de fotones (Light Meter, LX-1108, China) para determinar la intensidad lumínica dentro del invernadero y de las cámaras de crecimiento ubicadas dentro del invernadero en 840 a 1200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de radiación fotosintéticamente activa y dentro de las cámaras de crecimiento solamente 10 % menor. En un invernadero de 1000  $\text{m}^2$  con condiciones similares al de producción de plántula se llevó a cabo el trasplante utilizando plántulas de 35 días de edad, en camas de cultivo rellenas con sustrato a base de arena de tezontle rojo con partículas de 1 a 3 mm de diámetro. Sobre las camas se colocó un acolchado plástico de color plata-negro. El cultivo se estableció en dos hiladas a una densidad de población de 8 plantas  $\text{m}^{-2}$  de invernadero, y el riego se realizó mediante cintillas de goteo con goteros integrados cada 20 cm, pero utilizando el doble de concentración que en plántula.

Se hizo tutorado de las plantas con un anillo de plástico y rafia amarrado a alambres ubicados a una altura de 1.8 m a lo largo de las camas. Los brotes laterales fueron eliminados a medida que surgían, y se eliminó el ápice principal de cada planta, dejando dos hojas por encima del tercer racimo. En esta etapa de desarrollo del cultivo, con la ayuda de un ceptómetro portátil de sonda lineal de 80 sensores (LAI Ceptometer LP-80, MeterGroup Pullman, Washington, EUA), se registró la radiación solar

incidente en distintas posiciones del dosel de las plantas, encontrándose una radiación de 1000-2000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  por arriba del dosel, 500-550  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en la parte media y 150-200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en la parte inferior.

#### Variables evaluadas

A los 30 dds se identificó y marcó el foliolo terminal de la segunda hoja bien formada, y con un analizador de gases infrarrojo (CI-340, CID Bio-Science®, Camas, Washington, EUA) se realizaron mediciones en un día soleado a las 9:00, 13:00 y 17:00 horas, y se determinaron las siguientes variables fisiológicas: tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), temperatura de la hoja (°C), conductancia estomática ( $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y déficit de presión de vapor (kPa).

El mismo día del trasplante se efectuaron las mediciones siguientes: altura de plántula (cm) desde la base de la plántula hasta el meristemo apical, utilizando un flexómetro; diámetro de tallo (mm) entre la segunda y tercera hoja medido con un vernier electrónico; área foliar a través de un integrador de área foliar (LI-3000A, LI-COR®, Lincoln, Nebraska, EUA) y peso seco total por plántula (g) con una balanza electro analítica (MC-173467, Ohaus®, Parsippany, Nueva Jersey, EUA). Posteriormente, se cuantificó el número de flores y frutos por planta, peso promedio de fruto (g) y rendimiento (g/planta).

### Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ), con el programa Statistical Analysis System for Windows 9.0 (SAS, 2002).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Variables fisiológicas

Los resultados del análisis de comparación de medias (Cuadro 2) indican que hubo diferencias significativas ( $P \leq 0.05$ ) debido a las concentraciones de  $\text{CO}_2$  sobre las variables fisiológicas evaluadas durante la etapa de plántula en tomate.

El tratamiento de 700-1000 ppm de  $\text{CO}_2$  (T3), con una temperatura de hoja promedio de  $35.64^{\circ}\text{C}$ , fue estadísticamente más alto que los demás tratamientos, mientras que con el tratamiento de 420 a 460 (T1) se tuvo la temperatura de hoja más baja ( $27.39^{\circ}\text{C}$ ). Las temperaturas altas (como en T3) pueden acelerar el crecimiento; sin embargo, también pueden ocasionar estrés térmico, que puede afectar negativamente los procesos fisiológicos, principalmente el de fotosíntesis, ya que como mencionaron Yamori *et al.* (2014), la fotosíntesis se inhibe a altas temperaturas y este efecto correlaciona

con una reducción en la actividad de la Rubisco activasa (Salvucci *et al.*, 2001).

El tratamiento de 500-700 ppm de  $\text{CO}_2$  (T2) mostró la tasa de asimilación de  $\text{CO}_2$  y de conductancia estomática más alta (14.04 y  $240.25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , respectivamente), que indica que con estos niveles de concentración de  $\text{CO}_2$  aumenta la apertura estomática, lo que facilita la transpiración y absorción de  $\text{CO}_2$  (Xu *et al.*, 2016).

Al respecto, Vargas *et al.* (2012) reportaron que las tasas más altas de fotosíntesis se logran cuando las condiciones de temperatura oscilan entre  $25$  y  $30^{\circ}\text{C}$ , con una humedad relativa en el intervalo de 30-40 %, además de mantener el déficit de presión de vapor por debajo de  $2.5 \text{ kPa}$  para garantizar la apertura estomática y facilitar la entrada de  $\text{CO}_2$  en el interior de las hojas.

### Variables morfológicas y peso seco

En el Cuadro 3 se muestra que en los ambientes con concentraciones de  $\text{CO}_2$  de 500 a 700 y de 700 a 1000 ppm, la altura de plántula, el área foliar y el peso seco de plántula, fueron significativamente mayores con respecto al testigo. El mayor peso seco en estos tratamientos se debió a la mayor altura y área foliar formada por plántula, ya que en diámetro de tallo no hubo diferencias. Es posible que una mayor cantidad de fotoasimilados haya sido acumulada

**Cuadro 1. Temperatura y humedad relativa mínima y máxima en diferentes tratamientos de  $\text{CO}_2$  aplicados en plántulas de tomate.**

Tratamiento (T)	Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Humedad relativa (%)
T1: plántulas con 420-460 ppm de $\text{CO}_2$	$25-31 \pm 1$	$55-68 \pm 1$
T2: plántulas con 500-700 ppm de $\text{CO}_2$	$26-31 \pm 1$	$56-74 \pm 1$
T3: plántulas con 700-1000 ppm de $\text{CO}_2$	$27-32 \pm 1$	$53-64 \pm 1$
T4: plántulas con 317-402 ppm de $\text{CO}_2$ (testigo)	$27-36 \pm 1$	$47-50 \pm 1$

Manejo de las plantas de trasplante a cosecha

**Cuadro 2. Comparación de medias entre tratamientos de variables fisiológicas evaluadas en plántulas de tomate cultivar Paipai.**

Tratamiento (T)	TH ( $^{\circ}\text{C}$ )	TA ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	CE ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	DPV (kPa)
T1 (plántulas con 420-460 ppm de $\text{CO}_2$ )	27.39 c	10.40 b	186.35 b	1.33 c
T2 (plántulas con 500-700 ppm de $\text{CO}_2$ )	28.87 b	14.04 a	240.25 a	1.47 bc
T3 (plántulas con 700-1000 ppm de $\text{CO}_2$ )	35.64 a	7.51 bc	162.36 b	1.8 ab
T4 (plántulas con 317-402 ppm de $\text{CO}_2$ ) <sup>†</sup>	28.31 bc	5.74 c	89.32 c	1.88 a
DSH (0.05)	0.95	3.01	43.03	0.36

<sup>†</sup>Testigo. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey,  $P \leq 0.05$ ). ppm: partes por millón,  $\text{CO}_2$ : bióxido de carbono, TH: temperatura de la hoja, TA: tasa de asimilación de  $\text{CO}_2$ , CE: conductancia estomática, DPV: déficit de presión de vapor, DSH: diferencia significativa honesta.

preferentemente en las hojas, lo que contribuyó a que las plantas sometidas a altas concentraciones de CO<sub>2</sub> tuvieran más área foliar, lo que se vio reflejado en un mayor peso seco, como también lo señalaron Rangaswamy *et al.* (2021).

Mamatha *et al.* (2014) encontraron mayor altura de planta en tomate con la concentración de 550 ppm de CO<sub>2</sub> que con 700, y concluyeron que el incremento en la concentración de CO<sub>2</sub> aumenta la altura de la planta hasta cierto punto, pero que por arriba de las 700 ppm de CO<sub>2</sub>, la altura tiende a disminuir, lo que es congruente con los resultados del presente estudio.

Los resultados indican que la concentración de CO<sub>2</sub> y el ambiente que se generó (temperatura y humedad relativa) en el interior en las cámaras de crecimiento tuvieron un impacto significativo en el desarrollo inicial de las plántulas al haber más carbono para la fotosíntesis (Cuadro 2), pues con la concentración de 500-700 ppm de CO<sub>2</sub> se logró una mayor tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> neta, lo que condujo a la obtención de plántulas con alto vigor.

Otros autores han señalado que el incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> puede mejorar el peso fresco y seco de las plántulas, así como la altura, grosor del tallo y el área foliar en plántulas de tomate, caracteres que le dan a la planta una apariencia robusta (Lenka *et al.*, 2017; Rangaswamy *et al.*, 2021).

### Rendimiento y sus componentes

El análisis de varianza (datos no mostrados) y las comparaciones de medias (Cuadro 4) muestran diferencias significativas entre tratamientos para cada una de las variables del rendimiento evaluadas.

Los tratamientos con mayor concentración de CO<sub>2</sub> (500-700 ppm y 700-1000 ppm) tuvieron incrementos significativos en el número de flores por planta (23.9 y 21.9 flores, respectivamente) comparado con el testigo (19 flores por planta); es decir, que la adición de CO<sub>2</sub> en las plántulas de tomate permitió incrementar de tres a cuatro flores por planta.

El número de flores en la inflorescencia de tomate

**Cuadro 3. Comparación de medias entre tratamientos de variables de crecimiento evaluadas en plántulas de tomate cultivar Paipai.**

Tratamiento (T)	Altura (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Área foliar (cm <sup>2</sup> )	Peso seco (g)
T1 (plántulas con 420-460 ppm de CO <sub>2</sub> )	41.8 b	4.78 b	193.48 b	1.16 b
T2 (plántulas con 500-700 ppm de CO <sub>2</sub> )	46.3 a	4.84 b	198.38 b	1.58 a
T3 (plántulas con 700-1000 ppm de CO <sub>2</sub> )	44.3 ab	5.26 a	242.94 a	1.85 a
T4 (plántulas con 317-402 ppm de CO <sub>2</sub> ) <sup>†</sup>	23.17 c	5.34 a	97.69 c	0.81 b
DSH (0.05)	4.25	0.39	43.00	0.52

<sup>†</sup>Testigo. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05). ppm: partes por millón. CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono, DSH: diferencia significativa honesta.

**Cuadro 4. Comparación de medias de tratamientos de variables del rendimiento y sus componentes evaluadas en plantas de tomate variedad Paipai.**

Tratamiento (T)	Número de flores/planta	Número de frutos/planta	Peso de fruto (g)	Rendimiento (kg/planta)
T1 (plántulas con 420-460 ppm de CO <sub>2</sub> )	22.0 b	19.2 ab	128.23 a	2.47 a
T2 (plántulas con 500-700 ppm de CO <sub>2</sub> )	23.9 a	21.0 a	123.47 a	2.60 a
T3 (plántulas con 700-1000 ppm de CO <sub>2</sub> )	21.9 b	20.9 a	124.48 a	2.58 a
T4 (plántulas con 317-402 ppm de CO <sub>2</sub> ) <sup>†</sup>	19.00 c	16.6 b	109.73 b	1.83 b
DSH (0.05)	1.9	2.9	12.59	0.43

<sup>†</sup>Testigo. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, P ≤ 0.05). ppm: partes por millón, CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono, DSH: diferencia significativa honesta

está influenciado por el genotipo y por las condiciones ambientales (Mamatha *et al.*, 2014; Rangaswamy *et al.*, 2021). Heuvelink y Okello (2018) mencionaron que un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> puede favorecer la floración, este efecto se atribuye a la disponibilidad de más fotoasimilados para los primordios de las flores en desarrollo, lo que favorece la producción de flores adicionales en cada inflorescencia, tal como se observó con las plántulas sometidas a 500-700 ppm de CO<sub>2</sub> en el presente estudio. No obstante, con el aumento a 700-1000 ppm de CO<sub>2</sub> el número de flores por planta ya no se incrementó, posiblemente debido a un cambio en las condiciones generadas por otros factores del ambiente como la temperatura, que se incrementó 1 °C y la humedad relativa, que disminuyó en aproximadamente 5 % (Cuadro 1) al colocar dos velas en lugar de una en la cámara de crecimiento, lo que pudo provocar un cierre parcial de estomas y con ello provocar una disminución del intercambio gaseoso y aprovechamiento en la asimilación del CO<sub>2</sub> como lo señalan Šigut *et al.* (2015), pues como se observó en el Cuadro 2, estos cambios se manifestaron en un aumento significativo de la temperatura de la hoja, una disminución en la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> y un incremento notable en el déficit de presión de vapor en comparación con el testigo, lo que influyó en el número de flores formadas por planta. Cabe destacar que el incremento en la concentración de CO<sub>2</sub>, por sí solo, induce resistencia estomática (Xu *et al.*, 2016).

Dado que la densidad de población establecida fue de 8 plantas m<sup>-2</sup> de invernadero (80,000 plantas/hectárea/ciclo de cultivo), el aumento de tres o cuatro flores por planta resulta agronómicamente relevante, ya que en cada m<sup>2</sup> se pueden producir hasta 32 frutos más, que con el peso promedio de 123.47 gramos obtenido, representa un incremento potencial de 40 t ha<sup>-1</sup> en un ciclo de cultivo de poco menos de cuatro meses de trasplante a fin de cosecha; es decir, hasta 120 toneladas más al año al exponer las plántulas de tomate a concentraciones de 500-700 ppm de CO<sub>2</sub> durante un período de 15 días. Cabe señalar que la radiación solar difusa incidente de 500 a 1200 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, registrada en el dosel de plantas en la etapa reproductiva, fue suficiente para la densidad de población establecida, como también lo mencionan Heuvelink y Dorais (2018).

## CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en que se llevó a cabo el presente estudio, los resultados permiten concluir que el enriquecimiento con CO<sub>2</sub> durante la iniciación floral en plántulas de tomate favorece la fotosíntesis, con lo que obtienen plántulas con calidad al trasplante, así como más flores y frutos por planta.

## AGRADECIMIENTOS

El autor principal agradece al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías por la beca concedida y al Posgrado en Horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo por proporcionar las oportunidades necesarias para llevar a cabo la investigación durante el transcurso de los estudios de doctorado.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aslani L., M. Gholami, M. Mobli and M. R. Sabzalian (2020) The influence of altered sink-source balance on the plant growth and yield of greenhouse tomato. *Physiology and Molecular Biology of Plants* 26:2109-2123, <https://doi.org/10.1007/s12298-020-00891-2>
- Contreras-Magaña E., H. Arroyo-Pozos, J. Ayala-Arreola, F. Sánchez-Del-Castillo y E. C. Moreno-Pérez (2013) Caracterización morfológica de la diferenciación floral en tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 19:59-70, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2012.02.010>
- Glanz-Idan N. and S. Wolf (2020) Upregulation of photosynthesis in mineral nutrition-deficient tomato plants by reduced source-to-sink ratio. *Plant Signaling & Behavior* 15:1712543, <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1712543>
- Heuvelink E. and M. Dorais (2018) Crop growth and yield. In: *Tomatoes*. E. Heuvelink (ed.). CABI. Wallingford, UK. pp:85-144, <https://doi.org/10.1079/9780851993966.0085>
- Heuvelink E. and R. C. O. Okello (2018) Developmental processes. In: *Tomatoes*. E. Heuvelink (ed.). CABI. Wallingford, UK. pp:59-88, <https://doi.org/10.1079/9781780641935.0059>
- Ji Y., D. Nuñez O., D. Choe, D. H. Larsen, L. F. M. Marcelis and E. Heuvelink (2020) Far-red radiation stimulates dry mass partitioning to fruits by increasing fruit sink strength in tomato. *New Phytologist* 228:1914-1925, <https://doi.org/10.1111/nph.16805>
- Lanoue J., E. D. Leonards and B. Grodzinski (2018) Effects of light quality and intensity on diurnal patterns and rates of photo-assimilate translocation and transpiration in tomato leaves. *Frontiers in Plant Science* 9:756, <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00756>
- Lenka N. K., S. Lenka, J. K. Thakur, R. Elanchezhian, S. B. Aher, V. Simaiya, ... and A. K. Patra (2017) Interactive effect of elevated carbon dioxide and elevated temperature on growth and yield of soybean. *Current Science* 113:2305-2310, <https://doi.org/10.18520/cs/v113/i12/2305-2310>
- León-Burgos A. F., G. Y. Beltrán C., A. L. Barragán P. and H. E. Balaguera-López (2021) Distribución de fotoasimilados en los órganos vertederos de plantas Solanaceas, caso tomate y papa. Una revisión. *Revista Ciencia y Agricultura* 18:79-97, <https://doi.org/10.19053/01228420.v18.n3.2021.13566>
- Li X. J., S. Z. Kang, F. S. Li, X. T. Zhang, Z. L. Huo, R. S. Ding and S. E. Li (2017) Light supplement and carbon dioxide enrichment affect yield and quality of off-season pepper. *Agronomy Journal* 109:2107-2118, <https://doi.org/10.2134/agronj2017.01.0044>
- Mamatha H., N. K. S. Rao, R. H. Laxman, K. S. Shivashankara, R. M. Bhatt and K. C. Pavithra (2014) Impact of elevated CO<sub>2</sub> on growth, physiology, yield, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cv. Arka Ashish. *Photosynthetica* 52:519-528, <https://doi.org/10.1007/s11099-014-0059-0>
- Mejía-Betancourt F. A., F. Sánchez-del Castillo, E. C. Moreno-Pérez y L. González-Molina (2023) Esquejes enraizados, una alternativa para la producción de jitomate bajo invernadero en ciclos cortos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 14:389-399, <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i3.3038>
- Momokawa N., Y. Kadono and H. Kudoh (2011) Effects of light quality on leaf morphogenesis of a heterophyllous amphibious plant, *Rotala hippuris*. *Annals of Botany* 108:1299-1306, <https://doi.org/10.1093/aob/mcr236>
- Moreno-Pérez E. C., F. Sánchez-del Castillo, L. González-Molina, E. Contreras-Magaña y R. U. Messina-Fernández (2016) Métodos de enraizamiento de esquejes para la producción de jitomate

- (*Solanum lycopersicum* L.) hidropónico. *Agroproductividad* 9:50-55.
- Moreno-Pérez E. C., F. Sánchez-del Castillo, M. Ruiz-Díaz and E. Contreras-Magaña (2021)** Effect of population densities and paclobutrazol applications on seedling quality and yield in tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 27:5-17, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.05.010>
- Pan T., Y. Wang, L. Wang, J. Ding, Y. Cao, G. Qin, ... and Z. Zou (2020)** Increased CO<sub>2</sub> and light intensity regulate growth and leaf gas exchange in tomato. *Physiologia Plantarum* 168:694-708, <https://doi.org/10.1111/ppl.13015>
- Rangaswamy T. C., S. Sridhara, N. Ramesh, P. Gopakkali, D. O. El-Ansary, E. A. Mahmoud, ... and A. M. E. Abdel-Hamid (2021)** Assessing the impact of higher levels of CO<sub>2</sub> and temperature and their interactions on tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Plants* 10:256, <https://doi.org/10.3390/plants10020256>
- Rodrigues J., D. Inzé, H. Nelissen and N. J. M. Saibo (2019)** Source-sink regulation in crops under water deficit. *Trends in Plant Science* 24:652-663, <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2019.04.005>
- Salvucci M. E., K. W. Osteryoung, S. J. Crafts-Brandner and E. Vierling (2001)** Exceptional sensitivity of Rubisco activase to thermal denaturation *in vitro* and *in vivo*. *Plant Physiology* 127:1053-1064, <https://doi.org/10.1104/pp.010357>
- Sánchez C. F. y E. C. Moreno P. (2017)** Diseño Agronómico y Manejo de Invernaderos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México. 432 p.
- Sánchez-Del Castillo F., E. C. Moreno-Pérez, A. Morales-Maza, A. Peña-Lomelí y M. T. Colinas-León (2012)** Densidad de población y volumen de sustrato en plántulas de jitomate (*Lycopersicum lycopersicon* Mill.). *Agrociencia* 46:255-266.
- Sánchez-Del Castillo F., O. A. Bastida-Cañada, E. C. Moreno-Pérez, E. Contreras-Magaña y J. Sahagún-Castellanos (2014)** Rendimiento de jitomate con diferentes métodos de cultivo hidropónico basados en doseles escaliformes. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 20:239-251, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2013.10.037>
- Sánchez-Del Castillo F., L. Portillo-Márquez, E. C. Moreno-Pérez, J. J. Magdaleno-Villar y J. C. Vázquez-Rodríguez (2021)** Efectos del volumen de contenedor y densidad de plántula sobre trasplante tardío y número de flores en jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 27:71-84, <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.015>
- Šigut L., P. Holíšová, K. Klem, M. Šprtová, C. Calfapietra, M. V. Marek, ... and O. Urban (2015)** Does long-term cultivation of saplings under elevated CO<sub>2</sub> concentration influence their photosynthetic response to temperature? *Annals of Botany* 116:929-939, <https://doi.org/10.1093/aob/mcv043>
- Vargas S. J. M., I. L. López C. y E. Rico G. (2012)** Estimación de la fotosíntesis foliar en jitomate bajo invernadero mediante redes neuronales artificiales. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3:1289-1304, <https://doi.org/10.29312/remexca.v3i7.1334>
- Vitale A., M. Rocco, S. Arena, F. Giuffrida, C. Cassaniti, A. Scaloni, ... and C. Leonardi (2014)** Tomato susceptibility to Fusarium crown and root rot: effect of grafting combination and proteomic analysis of tolerance expression in the rootstock. *Plant Physiology and Biochemistry* 83:207-216, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.08.006>
- Xu Z., Y. Jiang, B. Jia and G. Zhou (2016)** Elevated-CO<sub>2</sub> response of stomata and its dependence on environmental factors. *Frontiers in Plant Science* 7:657, <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00657>
- Yamori W., K. Hikosaka and D. A. Way (2014)** Temperature response of photosynthesis in C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. *Photosynthesis Research* 119:101-117, <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9874-6>