



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Biosistemas

“Efecto de las condiciones ambientales en la dinámica de absorción de CO₂ en
tomate de invernadero”

Tesis


Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias en Ingeniería en Biosistemas

Presenta:

Jhonam Clemente Arellano Beltrán

Dirigido por:
Dr. Enrique Rico García


Dr. Enrique Rico García
Presidente


Firma

Dr. Oscar Alatorre Jácome
Secretario


Firma

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa
Vocal


Firma

Dr. Ramón Gerardo Guevara Gómez
Suplente


Firma

Dr. Luis Miguel Contreras Medina
Suplente


Firma


Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería


Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Diciembre 2017

1 CONTENIDO

2	ANTECEDENTES.....	9
3	MOTIVACIÓN	11
4	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	12
4.1	Necesidad de aumentar la producción agrícola.....	12
4.2	El cultivo del tomate	13
4.2.1	Origen e importancia.....	13
4.3	Requerimientos del cultivo	14
4.4	Producción de hortalizas en invernadero	14
4.5	El clima en el invernadero	15
4.5.1	Radiación solar	15
4.5.2	Temperatura.....	16
4.5.3	Humedad relativa.....	16
4.5.4	Dióxido de carbono	17
4.6	Aportes de CO ₂ en invernaderos.....	17
4.6.1	CO ₂ licuado	17
4.6.2	Gases de combustión	18
4.7	Efectos de las condiciones ambientales en la absorción de CO ₂	19
4.8	Efectos de la fertilización de CO ₂ sobre el desarrollo del cultivo del tomate, su fisiología, rendimiento y calidad de los frutos.....	21
4.9	El uso de la fertilización con CO ₂ en invernaderos.....	22
4.10	El futuro de la fertilización con CO ₂ en invernaderos	22
4.11	Medición de fotosíntesis del follaje de las plantas	22
5	HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	24
5.1	HIPÓTESIS.....	24
5.2	OBJETIVO GENERAL.....	24
5.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	24
6	MATERIALES Y MÉTODOS	25
6.1	Ubicación.....	25
6.2	Manejo del cultivo.....	25

7	Cámara de monitoreo de CO ₂	26
7.1	Pruebas de funcionamiento	28
7.2	Determinación del consumo de CO ₂	29
7.2.1	Modificación de condiciones ambientales	29
7.2.2	Tratamientos	30
7.2.3	Monitoreo del consumo de CO ₂	31
7.2.4	Medición de superficie foliar.....	31
8	RESULTADOS.....	32
9	DISCUSIÓN	43
10	CONCLUSIÓN.....	46
11	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del sitio en donde se llevó a cabo la investigación	25
Figura 2. Esquema de la cámara de monitoreo de CO ₂ .	27
Figura 3. Esquema de la distribución de los equipos de humidificación, calefacción/enfriador y suministro de CO ₂ .	29
Figura 4. Concentración de CO ₂ en la cámara de monitoreo de CO ₂ sin plantas para la prueba de hermeticidad.	32
Figura 5. Decrecimiento de la concentración de CO ₂ dentro de la cámara respecto al tiempo para cada uno de los tratamientos.	33
Figura 6. Comportamiento de la humedad absoluta respecto al tiempo dentro de la cámara de monitoreo para cada tratamiento y sus repeticiones.	34
Figura 7. Superficie foliar en metros cuadrados (m ²) para cada uno de los tratamientos. Las X dentro de las barras indican las medias y la barra indica la desviación estándar de la media.	35
Figura 8. Cantidad de CO ₂ absorbido por cada metro cuadrado de superficie foliar para cada tratamiento y sus repeticiones.	36
Figura 9. Humedad absoluta acumulada en la cámara de monitoreo durante el experimento para cada tratamiento y sus repeticiones.	36
Figura 10. Comparación de medias de las tasas fotosintéticas en tomate medidas en una cámara cerrada. Prueba de Tukey con 0.05 de nivel de significancia.	37
Figura 11. Comparación de medias de la transpiración de las plantas para cada uno de los tratamientos. Prueba de Tukey con 0.05 de nivel de significancia.	38
Figura 12. Fotosíntesis a distintas concentraciones de CO ₂ en la etapa de floración a 28°C y 1400 μmol PAR m ⁻² s ⁻¹ .	39

Figura 13. Fotosíntesis a distintas temperaturas en la etapa de floración a 700 ppm de CO ₂ y 1400 μmol PAR m ⁻² s ⁻¹	40
Figura 14. Fotosíntesis a distintas intensidades de Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) en la etapa de fructificación a 28 °C y 700 ppm de CO ₂	41
Figura 15. Fotosíntesis a distintas temperaturas en la etapa de fructificación a 700 ppm de CO ₂ y 1400 μmol PAR m ⁻² s ⁻¹	41
Figura 16. Fotosíntesis a distintas etapas fenológicas a 28 °C, 700 ppm de CO ₂ y 1400 μmol PAR m ⁻² s ⁻¹	42
Figura 17. Transpiración a distintas temperaturas para la etapa de fructificación a 700 ppm de CO ₂ y 1400 μmol PAR m ⁻² s ⁻¹	43

Índice de tablas

Tabla 1. Tratamientos en la etapa de floración y fructificación, la humedad relativa inicial para todos los tratamientos fue de 40%.	30
--	----

RESUMEN

En los últimos años, se han realizado numerosos estudios para comprender los procesos fisiológicos de las plantas y determinar las mejores condiciones ambientales en las que se pueden obtener altas tasas fotosintéticas, así como mejores rendimientos de los cultivos. Existen dos formas para determinar la actividad fotosintética de las plantas, la determinación en una sola hoja o en toda la planta; esta última técnica es la mejor para estimar los rendimientos de los cultivos. El objetivo de este estudio fue determinar la mejor combinación de condiciones ambientales para el cultivo de tomate de invernadero mediante la relación entre las condiciones ambientales y la cantidad de CO₂ que consume el cultivo; las mediciones de absorción de CO₂ se hicieron en una cámara de policarbonato en forma de prisma cuadrangular de 60 cm de ancho por 120 cm de alto con sensores de humedad, temperatura, presión y radiación. Se hicieron 10 tratamientos, 5 para la etapa de floración (T1, T2, T3, T4 y T5) y 5 en la etapa de fructificación (T6, T7, T8, T9 y T10); se consideró a T1 y T6 como las condiciones estándar T1 y T6= 28°C, 700 ppm CO₂, 1400 PAR $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, a los demás tratamientos se les cambió una variable a partir de las condiciones estándar T2=1000 ppm [CO₂], T3= 400 ppm [CO₂], T4= 33°C, T5= 23°C, T7= 18°C, T8= 38°C, T9= 650 PAR $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y T10= 30 PAR $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; las condiciones ambientales se establecieron mediante equipos de humidificación, calefacción, enfriamiento y lámparas HPS. Para calcular la tasa fotosintética de las plantas, se determinó el área foliar mediante fotografías digitales. El sistema de medición de absorción de CO₂ resultó ser efectivo. Finalmente se realizó una prueba de medias de Tukey ($\alpha=0.05$) y las mejores tasas fotosintéticas se obtuvieron a una radiación alta (1,400 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ de PAR), concentración media de CO₂ (700 ppm) y temperaturas bajas (de 18 a 28 °C). A partir de estos resultados podemos inferir que la absorción de CO₂ puede verse favorecida con temperaturas bajas debido a una tasa de respiración baja en las plantas.

(Palabras clave: fotosíntesis, fotosíntesis del follaje, cámara de monitoreo)

SUMMARY

In recent years, numerous studies have been conducted to understand the physiological processes of plants and determine the best environmental conditions in which high photosynthetic rates can be obtained as well as better crop yields. There are two ways to determine the photosynthetic activity of plants, the determination in a single leaf or in the whole plant; the latter technique is the best to estimate crop yields. The objective of this study was to determine the best combination of environmental conditions for tomato greenhouse cultivation through the relationship between environmental conditions and the amount of CO₂ consumed by the crop; CO₂ absorption measurements were carried out in a square prism polycarbonate chamber 60 cm wide and 120 cm high with humidity, temperature, pressure and radiation sensors. Ten treatments were made, 5 for the flowering stage (T1, T2, T3, T4 and T5) and 5 for the fruiting stage (T6, T7, T8, T9 and T10); T1 and T6 were considered as the standard conditions T1 and T6= 28 ° C, 700 ppm CO₂, 1400 PAR μmol m⁻² s⁻¹, to the other treatments only one variable was changed from the standard conditions T2= 1000 ppm [CO₂], T3= 400 ppm [CO₂], T4= 33 °C, T5= 23 °C, T7= 18 °C, T8= 38 ° C, T9= 650 PAR μmol m⁻²s⁻¹ and T10= 30 PAR μmol m⁻²s⁻¹. The environmental conditions were established by humidification, heating and cooling equipment and HPS lamps. To calculate the photosynthetic rate of the plants, the leaf area was determined by digital photographs. The CO₂ absorption measurement system proved to be effective. Finally, a Tukey test (α= 0.05) was performed and the best photosynthetic rates were obtained at high radiation (1,400 μmol m⁻²s⁻¹ of PAR), medium concentration of CO₂ (700 ppm) and low temperatures (from 18 to 28 °C). From these results we can infer that the absorption of CO₂ can be favored at low temperatures due to a low respiration rate in plants.

(Keywords: photosynthesis, canopy photosynthesis, monitoring chamber)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su contribución financiera para mis estudios y para este proyecto.

A la Universidad Autónoma de Querétaro que es mi casa de estudios universitarios y de maestría, por lo que es un orgullo para mi pertenecer a esta honorable institución.

A mi director de tesis el Dr. Enrique Rico García por su gran apoyo como director de este proyecto, así como sus enseñanzas como docente y guía de investigación.

A mi compañero César Iván Hernández por su apoyo incondicional en la mayor parte experimental de este proyecto.

A todos los maestros y el personal administrativo de esta institución que hicieron posible este proyecto y mis estudios de maestría.

A mis compañeros de clase, Alberto, Miriam, Diana, Adrián y Diego por haberme apoyado y haber compartido conmigo esta experiencia.

A mi amigo Antonio por haberme ayudado en la parte experimental de este proyecto.

A mi esposa Mabel por su apoyo incondicional para la realización de mis estudios.

A mi familia y amigos por alentarme y motivarme para la realización y continuación de mis estudios.

2 ANTECEDENTES

Debido al incremento de la población y el cambio de uso de suelo a nivel mundial, la producción de alimentos deberá incrementar en un 50% para el 2050. Para lograr este objetivo se han hecho más eficientes las técnicas de producción a fin de producir más vegetales en la misma superficie. En el campo agrícola se han mejorado diversas técnicas para mejorar los rendimientos de los cultivos, como por ejemplo el uso del agua, el uso de fertilizantes, el control de plagas y enfermedades y el manejo de clima en invernaderos. Sin embargo, se ha contribuido poco en mejorar el proceso fotosintético en las plantas; este proceso consiste básicamente en aprovechar la energía lumínica del sol y transformarla en energía química en forma de azúcares y otras sustancias importantes que constituyen la biomasa necesaria para la alimentación de los humanos y la mayoría de los seres vivos.

Una de las opciones para incrementar la fotosíntesis en las plantas es el incrementar la concentración del dióxido de carbono (CO₂) presente en el aire que las rodea. Esta sustancia es esencial para que se lleve a cabo la fotosíntesis y se ha demostrado que duplicando su concentración en el aire puede incrementar de manera significativa la producción de biomasa en la mayoría de las plantas. (Murchie et al. 2009).

El tomate (*Lycopersicon esculentum*) es uno de los vegetales más importantes y consumidos en el mundo, puesto que es rico en nutrientes, antioxidantes y compuestos bioactivos como los carotenos, ácido ascórbico y compuestos fenólicos. Este cultivo responde positivamente a los incrementos de concentración de CO₂ en el aire, mejorando en su desarrollo, fisiología, rendimiento y calidad del fruto (Mamatha et al. 2014), por lo que el uso del CO₂ en este cultivo ha ido en aumento en los sistemas de producción bajo invernadero.

El uso de los invernaderos en la horticultura ha sido desarrollado para proteger los cultivos de condiciones ambientales desfavorables, por lo que se han utilizado principalmente para extender la temporada de los muchos cultivos y producir vegetales en temporadas que nos son favorables para su producción a campo abierto; aunque la producción en invernaderos requiere de un mayor consumo de energía y por lo tanto un mayor costo de producción, los rendimientos dentro de estos sistemas pueden superar hasta por diez veces la producción en comparación con la producción en campo abierto. Por esta razón, en las últimas décadas se ha incrementado la búsqueda de nuevas técnicas de producción que permitan reducir el costo de la energía consumida para la operación de los invernaderos (Qian et al. 2012), de esta manera se podrá incrementar la rentabilidad de las producciones dentro de estos sistemas de cultivo.

A pesar de ser un gas costoso, el uso del CO₂ en invernaderos ha sido posible gracias a que la estructura semi-cerrada característica de los invernaderos permite mantener la concentración de CO₂ dentro de los rangos deseados para incrementar el desarrollo de los cultivos, estos rangos de concentración de CO₂ son distintos para cada tipo de cultivo, variedad, etapa fenológica, condiciones ambientales y la tecnología de las instalaciones, es decir el invernadero (Qian et al. 2012).

Según (Xin et al. 2015), desde los años 80's se ha utilizado el CO₂ en los invernaderos a concentraciones que varían desde 600 ppm hasta 1500 ppm, siendo en primavera y verano cuando se observa una mejor respuesta del uso de este nutriente en los cultivos, mientras que a lo largo del día se recomienda iniciar con el suministro de este nutriente a partir de que hay una temperatura mayor a 15°C y entre media hora y una hora después de que amanece; en cuanto al estado fenológico del cultivo, se tiene que en la floración y fructificación es más rentable su uso. En general, se ha observado que los rendimientos de los cultivos pueden incrementar en poco más del 80% con el uso de este nutriente y la rentabilidad aumenta aproximadamente en un 30%. La efectividad del uso del CO₂ es impredecible en

cada invernadero, porque depende de la tecnología con que este nutriente se suministra, del diseño del invernadero y de las condiciones ambientales presentes en el lugar (Xin et al. 2015).

Debido al alto costo del CO₂, se han desarrollado técnicas que permiten hacer su uso más eficiente, evitando primero un exceso del mismo y segundo que se difunda y se pierda al exterior de los invernaderos (Qian et al. 2012).

Por lo tanto, una regulación correcta de la concentración de CO₂ en el invernadero puede llevar a mejorar el desarrollo del cultivo y a incrementar la rentabilidad para el productor. Esta regulación puede mejorarse midiendo la cantidad de CO₂ que absorbe el cultivo en función de las condiciones ambientales que lo rodean y la etapa fenológica en la que se encuentra (Li et al. 2015). Sin embargo, pocos estudios se han enfocado en el consumo neto del CO₂ por parte de los cultivos a distintas condiciones ambientales o a distintas etapas fenológicas.

3 MOTIVACIÓN

La necesidad de incrementar los rendimientos de los cultivos en los sistemas agrícolas, ha causado que se empleen diversas técnicas como la fertilización con CO₂ en los invernaderos para incrementar significativamente no solo los rendimientos de los cultivos sino también su rentabilidad; esta técnica se ha estado desarrollando desde los años 80's y ha resultado ser una alternativa muy aceptable, debido a que el uso de este nutriente puede incrementar los rendimientos agrícolas en más del 100% y la rentabilidad de la producción en poco más del 30%. La necesidad del CO₂ depende tanto del tipo de cultivo establecido y de la etapa fenológica en la que se encuentre, como de las condiciones ambientales y las características propias de la estructura del invernadero. A la fecha, los estudios realizados para mejorar esta técnica se han enfocado en determinar las condiciones ambientales a las cuales se

absorbe mejor este nutriente y en determinar a qué concentraciones de este nutriente en el aire se obtienen mayores rendimientos. Sin embargo, no se ha investigado acerca de la cantidad de CO₂ neta que consume el cultivo en distintas condiciones ambientales, pudiendo variar de manera significativa a lo largo del día.

Determinar qué cantidad de CO₂ es consumida por el cultivo del tomate a distintas condiciones ambientales como intensidad de luz, temperatura, humedad relativa y concentración de CO₂, puede ser útil para hacer más eficiente el uso de este nutriente en los invernaderos.

4 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

4.1 NECESIDAD DE AUMENTAR LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

En el futuro, la demanda de alimentos será enorme, considerando el incremento de la población y el consumo per cápita de alimentos; esto sugiere que los rendimientos de los cultivos necesitan incrementarse para abastecer la gran demanda que se espera. Desde la segunda mitad del siglo XX, los rendimientos de los cultivos han sido mejorados mediante el desarrollo de plaguicidas, la aplicación de fertilizantes, el mejoramiento genético y la adaptación climática de los cultivos, por lo que en los últimos años todos estos aspectos y técnicas se han optimizado o están cerca de optimizarse a fin de incrementar los rendimientos totales de los cultivos. Cabe mencionar que, en las últimas décadas, se han hecho estudios que demuestran que el rendimiento de la mayoría de los cultivos está directamente relacionado con su capacidad para producir biomasa, por lo que se ha puesto especial atención en la fotosíntesis, proceso natural por el que las plantas producen biomasa a partir de energía lumínica, agua, dióxido de carbono y algunos minerales. A consecuencia, se han estu-

diado los principales factores que influyen directamente en el incremento de la fotosíntesis en las plantas, éstos son, la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa, la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en el aire y la cantidad de ribulosa-2,5-bifosfato-carboxilasa (rubisco) presente en las hojas principalmente.

Entre estos factores, destaca la concentración de CO₂ en el aire, pues se ha demostrado que la fotosíntesis puede aumentar significativamente cuando los cultivos se desarrollan en ambientes con elevadas concentraciones de CO₂. Esta técnica ha demostrado incrementos por más del 100% en las producciones agrícolas (Murchie et al. 2009).

4.2 EL CULTIVO DEL TOMATE

4.2.1 Origen e importancia

El tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es un cultivo alimentario de adopción reciente que se ha popularizado fundamentalmente durante el siglo XX. Su origen y las plantas relacionadas con él, tienen su centro de origen en Sudamérica, aunque la domesticación y cultivo tuvo lugar en las primeras civilizaciones de México. El nombre tomate deriva de la lengua náhuatl de México. La significativa diversidad contenida en el género *Lycopersicon* ha sido revisada recientemente para potenciar la mejora genética del tomate cultivado (Jones et al. 2001).

El fruto del tomate es nutrimentalmente atractivo para el consumo humano, debido a que es una fuente de vitaminas A y C, antioxidantes, compuestos bioactivos y otros nutrientes. Su versatilidad para consumo en fresco o en conserva y su adaptabilidad han jugado un papel fundamental en su rápida y extensa utilización, por lo que se ha convertido en un cultivo que contribuye al bienestar y la nutrición de la humanidad (Jones et al. 2001).

4.3 REQUERIMIENTOS DEL CULTIVO

La productividad del cultivo de tomate se puede limitar principalmente por la cantidad de luz (radiación solar), temperatura, nutrientes y abastecimiento de agua. Por lo que a continuación se describen los principales factores que influyen en la productividad del tomate. La calidad de la luz y el fotoperiodo no son tan importantes para el crecimiento del tomate como la radiación integral diaria. El cultivo de tomate debe recibir diariamente un mínimo de 8 a 16 horas de luz. El óptimo térmico para el desarrollo del tomate durante el día es de 23-25°C y de 15-17°C durante la noche. Las temperaturas por debajo de 8°C y por encima de 30°C, alteran el desarrollo del tomate y suelen provocar un deficiente fructificación. A 0°C por varios minutos se hiela la planta. Altas temperaturas por encima de los 30°C durante periodos largos agobian las plantas y ocasionan desórdenes fisiológicos en el fruto. La humedad relativa óptima oscila entre un 60% y un 80%. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades aéreas y el agrietamiento del fruto y dificultan la fecundación. También una humedad relativa baja dificulta la fijación del polen al estigma de la flor. La aportación de CO₂ permite compensar el consumo de las plantas y garantiza el mantenimiento de una concentración superior a la media en la atmósfera (alrededor de 350 ppm), así la fotosíntesis se estimula y se acelera el crecimiento de las plantas (Castellanos 2009).

4.4 PRODUCCIÓN DE HORTALIZAS EN INVERNADERO

Los invernaderos son estructuras utilizadas en la agricultura para proteger a los cultivos, en los cuales se llevan a cabo un cierto control del medio edafoclimático alterando sus condiciones (suelo, temperatura, radiación solar, viento, humedad y composición atmosférica). Mediante estas técnicas de protección se cultivan plantas modificando su entorno natural para prolongar el periodo de cosecha, alterar los ciclos convencionales, aumentar los rendimientos y mejorar su calidad, estabilizar las producciones y disponer de productos cuando la producción al aire libre se encuentra limitada. Entonces, el objetivo genérico del cultivo de hortalizas en invernadero es

modificar el entorno natural mediante técnicas diversas, para alcanzar la óptima productividad de los cultivos (Castilla 2005).

4.5 EL CLIMA EN EL INVERNADERO

En el interior del invernadero, los factores radiación, temperatura y composición de la atmósfera son modificados generando un microclima distinto al local. Las modificaciones dependen esencialmente de la naturaleza y propiedades del material de cerramiento, de las condiciones de renovación de aire, de la forma, dimensiones y orientación del invernadero, de la cubierta vegetal presente y de las posibilidades de evaporación del suelo y de la cubierta. Este microclima no es uniforme y varía desde el centro a los bordes del invernadero, desde el suelo al techo y desde los límites de la cubierta vegetal a su interior. Un invernadero normalmente contiene un cultivo que se riega y su suelo está húmedo. Un invernadero vacío y seco no tiene más interés que el teórico, a efectos de estudio, pero no es representativo de condiciones normales (Castilla 2005).

4.5.1 Radiación solar

Las condiciones de radiación solar en invernadero son muy importantes desde el punto de vista productivo, no solo cuantitativamente sino cualitativamente. La primera alteración que genera el invernadero sobre los parámetros micro climáticos es una reducción de radiación solar. Las características radiométricas de la cubierta del invernadero pueden modificar significativamente la calidad de la radiación afectando a los cultivos, principalmente en cuanto a la eficiencia de uso de la radiación y a sus efectos fotomorfogénicos, e influyendo sobre los insectos y microorganismos del invernadero (Baille 1999).

A nivel foliar, se ha definido el “nivel de saturación de radiación” a partir del cual los incrementos de radiación no conllevan aumentos paralelos de fotosíntesis. Esta situación puede producirse en un invernadero durante los meses de alta radiación y a

las horas centrales del día, pero solamente en las hojas de los estratos superiores del cultivo sometidas a mayor radiación, mientras que las hojas de estratos inferiores reciben mucha menos radiación y están lejos del nivel de saturación.

4.5.2 Temperatura

En un invernadero sin calefacción la principal fuente de calor durante el día es la radiación solar, parte de la cual es almacenada en el suelo. Durante la noche, la energía procede principalmente del suelo, en forma de radiación infrarroja de onda larga.

La temperatura del aire dentro del invernadero es el resultado del balance energético del abrigo. El efecto invernadero tiene generalmente dos consecuencias: 1) De noche, debido a la limitación de pérdidas por radiación infrarroja, las temperaturas mínimas son similares o ligeramente superiores, de 1 a 3°C más altas que en el exterior. 2) De día, debido a la trampa de calor y a la reducción de intercambios convectivos, la temperatura del aire es mayor que al aire libre, pudiendo ser excesiva con alta radiación si no se ventila eficientemente.

(Palabras clave: CO₂ measurement, carbonic fertilization, tomato, CO₂ exchange.)

4.5.3 Humedad relativa

La contribución más importante a los intercambios de vapor de agua en un invernadero la efectúa la transpiración del cultivo, aunque también tienen influencia la evaporación de agua desde el suelo húmedo, si se produce, y la concentración del vapor de agua en las diversas superficies del invernadero al enfriarse (Day & Bailey n.d.).

La transpiración de agua por el cultivo tiene gran incidencia en la higrometría del aire. Un cultivo desarrollado evapora agua activamente, sombrea el suelo y limita el calentamiento del invernadero de día. Un invernadero sin cultivo y sin riego estará

mucho más caliente en un día soleado y las variaciones día/noche de temperatura y humedad relativa serán mayores (Castilla 2005).

4.5.4 Dióxido de carbono

La ventilación, la fotosíntesis, la respiración de las plantas y la generación de CO₂ en el suelo influyen en el contenido de CO₂ del aire del invernadero. De noche, por acumulación de CO₂ de la respiración de las plantas, la tasa es superior a la del aire exterior. De día, debido a la fotosíntesis, el CO₂ baja respecto al valor normal exterior. Con invernadero cerrado, en día soleado, puede bajar de 200 ppm, siendo limitante para la producción (Lorenzo et al. 1997). El objetivo de la ventilación es evitar reducciones de CO₂ superiores a 30 ppm, respecto al contenido normal del aire (350 ppm). La ventilación para reducir temperatura que suele tener, al menos, tasas de 20 a 30 renovaciones por hora suele ser suficiente para mantener niveles de CO₂ adecuados.

4.6 APORTES DE CO₂ EN INVERNADEROS

Existen dos fuentes principales de aporte de CO₂: 1) Aporte en forma de gas puro a partir de CO₂ licuado. 2) Aporte de CO₂ producido por combustión. La generación de CO₂ por descomposición de materia orgánica, que fue importante en el pasado y hoy día no se emplea, puede asimilarse al producido por combustión. El hielo carbónico (CO₂ sólido) sólo se ha empleado en el laboratorio, por su alto costo y por reducir la temperatura notablemente (Hanan 1998).

4.6.1 CO₂ licuado

Es el método ideal, pudiendo aportarse cuando se quiera y en la cantidad deseada, sólo limitada por la capacidad del equipo. Por desgracia, el costo del CO₂ puro es muy superior al de otros orígenes. Se suministra en pequeñas botellas o desde un tanque central con una red de distribución. El CO₂ está contenido en forma de líquido y gas a baja temperatura y a gran presión. Cuando no es posible el control exacto

de aportes en función de los niveles de CO₂ del aire, algunos autores aconsejan añadir 5.6 g m⁻² h⁻¹ de superficie de invernadero; el método más común para distribuir el CO₂ en el invernadero es inyectarlo en la corriente de aire de un ventilador, que conecta con la red de distribución (Hickleton 1998).

4.6.2 Gases de combustión

Los gases deben estar exentos de compuestos nocivos, por lo que los combustibles deben ser de bajo contenido en azufre, como gas natural, parafina o propano. Hay que hacer una combustión completa para evitar la formación de monóxido de carbono (CO) y otros gases tóxicos. Se pueden emplear pequeños quemadores para la combustión de gases y enviar el CO₂ producido dentro del invernadero, adicionalmente se puede o no aportar el calor resultante. El empleo de estos quemadores puede ser poco preciso. Si se usan para calentar el aire, puede llevar a niveles de CO₂ muy altos, indeseables a veces, mientras que si no hay necesidad de calentar su empleo implica un aporte térmico no deseado. También se pueden quemar los combustibles en un sistema de calefacción central como lo es una caldera. Los gases de combustión pueden usarse para el aporte de CO₂ en el invernadero y la calefacción se puede hacer por separado en el invernadero.

Para distribuir los gases de combustión en el invernadero exige una red de transporte adecuada con tubos de aluminio si la temperatura es alta o PVC si es baja. El CO₂ debe inyectarse junto a las plantas. En invernaderos con cultivos dispuestos en líneas pareadas se coloca un tubo por cada doble línea, inicialmente sobre el suelo, para elevarlo luego a la altura de los cultivos según crecen (Castilla 2005). El balance del CO₂ depende del: 1) CO₂ suministrado, 2) CO₂ intercambiado con el aire exterior. 3) CO₂ asimilado en fotosíntesis. 4) CO₂ procedente de la materia orgánica. Este último suele ser despreciable (Nederhoff 1995).

Como norma general, se recomienda un suministro mínimo de 4.5 g m⁻² h⁻¹ o su equivalente como gases de combustión de gas natural, para mantener niveles altos (de hasta 1000 ppm) en invernaderos cerrados y evitar bajadas importantes de CO₂

en invernaderos ventilados. Por razones económicas, el aporte no suele mayor de $4.5 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ de CO_2 . Los consumos medios estimados son de 8 a 13 kg de $\text{CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en invernaderos sofisticados (Baille 1999).

El aporte de CO_2 puede efectuarse desde el amanecer al anochecer, pero en muchos casos suele limitarse por razones de coste a las horas centrales del día. En invierno, con baja radiación fotosintéticamente activa (PAR, por sus siglas en inglés) de hasta 100 W m^{-2} , se ha recomendado no superar $2 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, mientras que, en primavera y verano, con radiación PAR entre 100 y 400 W m^{-2} , se sugieren aportes entre 2 y $8 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, aunque deben prevalecer las razones económicas para fijar los aportes. Si el CO_2 carece de contaminantes, los niveles de CO_2 no causan problemas a las plantas a niveles altos entre 1000 y 2000 ppm. El agricultor puede mantener un nivel mayor de CO_2 cuando emplea abonado carbónico, evitando la ventilación mediante alteración de consignas de temperatura y humedad relativa (Castilla 2005).

4.7 EFECTOS DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES EN LA ABSORCIÓN DE CO_2 .

En una planta existen diferencias en las condiciones a las que se encuentran las hojas; en general las hojas superiores están más expuestas a radiación solar, mayor temperatura y menor humedad relativa que las hojas inferiores. Estas condiciones junto con el grado de madurez fisiológica influyen directamente en la capacidad de absorber CO_2 de la atmósfera. A mayores intensidades de luz, mayor es la tasa fotosintética y la absorción de CO_2 . También hay una relación directa con la cercanía a la que se encuentran de los frutos en crecimiento, pues se ha demostrado que cuando los frutos en crecimiento se encuentran cerca de las hojas, hay menos posibilidades de que la absorción de CO_2 se detenga, esto se observa generalmente en las hojas inferiores; mientras que si se encuentran lejos de los frutos pueden detener la absorción de CO_2 bajo condiciones de estrés o por una acumulación alta de azúcares (Edwards et al. 2010).

El simple hecho de aumentar la humedad relativa en el invernadero, provoca una mejora en la conductancia estomatal de las hojas, incrementando la absorción de CO₂ y el rendimiento del cultivo. La transpiración de la planta se reduce en altas humedades relativas, lo que disminuye el estrés por falta de agua incrementando la tasa fotosintética, aunque por consecuencia puede existir una deficiencia de transporte de nutrientes desde la raíz a las hojas (Suzuki et al. 2015a).

La actividad fotosintética expresada como asimilación neta de CO₂, puede reducirse en condiciones de estrés por altas temperaturas, debido a un posible daño en el fotosistema II y la reducción de la actividad de la enzima RUBISCO. Sin embargo, se han encontrado experimentos en diferentes variedades de tomate, los cuales reportan distintos niveles de reducción de la tasa fotosintética dependiendo la variedad. Incluso se reporta que algunas variedades no reducen de manera significativa la tasa fotosintética cuando la duración de este tipo de estrés es menos de una hora (Camejo et al. 2002).

Las bajas temperaturas en el cultivo del tomate no reducen la actividad fotosintética, por el contrario, pueden aumentarla, incrementando ligeramente los rendimientos, aunque la calidad de los frutos sí puede ser disminuida (Kläring et al. 2015a). Las temperaturas bajas provocan también un bajo crecimiento de la planta y acumulación de carbohidratos en las hojas, que son utilizados hasta que la planta empieza a crecer de nuevo por temperaturas altas (Klopotek & Kläring 2014).

Para el cultivo del tomate, se ha encontrado que a mayor radiación solar existe una mayor tasa fotosintética, esto para radiaciones desde 0 a 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, a partir de 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ hacia arriba, el incremento en la fotosíntesis no es significativo (Kläring & Krumbein 2013).

Las concentraciones altas de CO₂ en el invernadero, afectan directamente y de manera significativa la tasa fotosintética en el cultivo del tomate. A mayor concentración de este nutriente en la atmósfera del cultivo, mayor es la tasa fotosintética. Se ha

observado un incremento a partir de 200 hasta 1400 ppm de CO₂ en el aire; para 1600 y 1800 se encuentra que la tasa fotosintética disminuye, pero la fotosíntesis puede continuar (Li et al. 2015).

La absorción de CO₂ en el cultivo del tomate puede limitarse cuando hay una reducción en el número de frutos en crecimiento en la planta. Este fenómeno puede ocurrir con mayor probabilidad si la concentración de CO₂ en el ambiente es muy elevada (1500 ppm o más). Entonces, los efectos de la poda en el cultivo del tomate, causa un efecto importante en la absorción de CO₂ y el rendimiento; cuando se deja un mayor número de frutos en crecimiento en la planta, se favorece la fotosíntesis y el rendimiento del cultivo siempre y cuando se tengan condiciones de elevadas concentraciones de CO₂ (Qian et al. 2012).

La tasa fotosintética en las hojas no disminuye cuando se disminuye la cantidad de frutos en crecimiento, pero sí se muestra un incremento en la acumulación de azúcares (Matsuda et al. 2011).

4.8 EFECTOS DE LA FERTILIZACIÓN DE CO₂ SOBRE EL DESARROLLO DEL CULTIVO DEL TOMATE, SU FISIOLÓGÍA, RENDIMIENTO Y CALIDAD DE LOS FRUTOS.

La fertilización con CO₂ en los invernaderos, incrementa significativamente el rendimiento del cultivo del tomate; no sólo esto, también mejora el desarrollo del cultivo al producirse más biomasa y por lo tanto las plantas muestran mayor capacidad para contrarrestar los efectos de las plagas y enfermedades. La precocidad también es una característica observada en los cultivos fertilizados con CO₂, pudiendo adelantar la primera cosecha una semana. Otra característica que se beneficia por el uso del CO₂ es la calidad del fruto, incrementando de manera significativa (Mamatha et al. 2014).

4.9 EL USO DE LA FERTILIZACIÓN CON CO₂ EN INVERNADEROS.

En los invernaderos se puede llegar a tener altas concentraciones de CO₂, que van desde 800 a 1500 ppm. Las concentraciones varían de acuerdo a la variedad y a la etapa de producción. Las épocas en las que suelen incrementarse estas aplicaciones son en invierno y primavera para el hemisferio norte. En cuanto al horario de aplicaciones durante el día, se ha observado que las aplicaciones inician de media a una hora después del amanecer y a partir de 15°C de temperatura en el invernadero. Las etapas de floración y fructificación, es cuando se recomienda realizar estas aplicaciones debido a que es el momento en el que se ha observado una mejor respuesta. En cuestión de rendimientos, el promedio de los incrementos en la producción en respuesta al uso de CO₂ es de poco más del 30% para el cultivo del tomate. Sin embargo, la efectividad de las aplicaciones de CO₂ es impredecible debido a las variaciones del clima y de la tecnología que se encuentran en cada invernadero (Xin et al. 2015).

4.10 EL FUTURO DE LA FERTILIZACIÓN CON CO₂ EN INVERNADEROS

La dosificación del CO₂ en los invernaderos puede ser más eficiente si los productores tuvieran información puntual acerca de los requerimientos de carbón para sus cultivos, esto debido a que los estudios en la toma de CO₂ por las plantas han estado dirigidos en determinar las concentraciones en las que se tienen mayores rendimientos, mientras que se ha dejado a un lado determinar bajo qué condiciones el cultivo tiene más capacidad de absorber este nutriente (Edwards et al. 2010).

4.11 MEDICIÓN DE FOTOSÍNTESIS DEL FOLLAJE DE LAS PLANTAS

La medición de la fotosíntesis del follaje de las plantas, es decir, de una o varias plantas completas, es de gran utilidad para correlacionarla con los rendimientos de los cultivos. Sin embargo, es una técnica que es menos fácil de realizar que las mediciones de fotosíntesis en una sola hoja; por lo que a lo largo de los años se ha

estado mejorando para que cada vez sea una técnica más rápida y fácil de realizar por su importancia para el entendimiento de la fotosíntesis del follaje y la utilidad que puede tener para mejorar los rendimientos de los cultivos (Song et al. 2016). El principio de funcionamiento de esta técnica consiste en un sistema cerrado en cuanto a intercambio de gases entre el interior y exterior de la cámara y que además permite el paso de luz por sus paredes. Esta técnica fue descrita primeramente por (Lange 1962); posteriormente desarrollada y descrita detalladamente con toda la información técnica por (Reicosky 1990). Actualmente se siguen haciendo modificaciones al diseño para mejorar la practicidad y rapidez en su uso como la cámara propuesta por (Song et al. 2016).

5 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

5.1 HIPÓTESIS

La determinación del consumo de CO₂ en plantas completas de tomate y su relación con las condiciones ambientales como radiación solar, temperatura y concentración de CO₂, permitirá determinar la mejor combinación de condiciones ambientales para el cultivo.

5.2 OBJETIVO GENERAL

Determinar la mejor combinación de condiciones ambientales para el cultivo de tomate de invernadero mediante la relación entre las condiciones ambientales y la cantidad de CO₂ que consume el cultivo.

5.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Establecer una técnica para medir la cantidad de CO₂ que consume una planta completa de tomate.
2. Determinar la cantidad de CO₂ que consume una planta completa de tomate a distintas condiciones ambientales.
3. Determinar la combinación con mayor tasa fotosintética para el cultivo de tomate bajo invernadero mediante una relación entre las condiciones ambientales y la cantidad de CO₂ consumida por el cultivo.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 UBICACIÓN

El experimento se llevó a cabo en la Universidad Autónoma de Querétaro Campus Amazcala (Figura 1), su ubicación geográfica es: latitud $20^{\circ}42'20.35''N$, longitud $100^{\circ}15'34.92''O$, altitud: 1920 msnm.

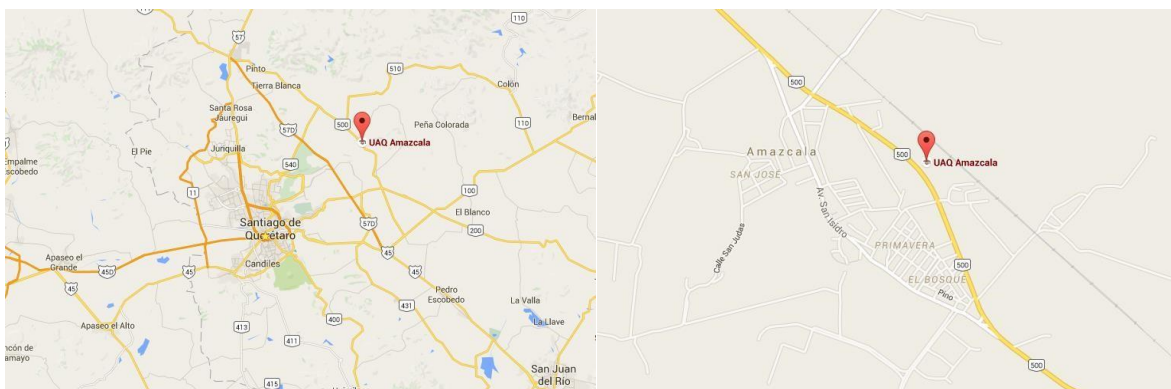


Figura 1. Ubicación geográfica del sitio en donde se llevó a cabo la investigación. El sitio se encuentra en la población de Amazcala, municipio El Marqués, estado de Querétaro, México. El clima del lugar es semiseco de acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

6.2 MANEJO DEL CULTIVO

Se utilizó la variedad comercial Raptor de Seminis de cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) como objeto de estudio para la absorción de CO_2 , esta variedad es híbrido de crecimiento indeterminado para uso en producción en invernaderos.

Se germinaron las semillas en sustrato a base de peat-moss con nombre comercial de "Sun-Shine 3"; después, se trasplantó a los 45 días en bolsas de polietileno de

40 x 40 cm. El cultivo se desarrolló en sistema hidropónico utilizando piedra volcánica como sustrato con tamaños no mayores a 5 mm.

El cultivo se formó a un tallo y se hicieron las podas de formación de acuerdo al sistema holandés que implica conducir la planta por rafia, dejar sólo tres hojas entre racimos y la eliminación de brotes axilares, el cultivo se desarrolló dentro de un invernadero de plástico de 3 x 6 m (18m²).

7 CÁMARA DE MONITOREO DE CO₂

Para determinar la cantidad de CO₂ absorbida por una planta completa de tomate, se diseñó y construyó una cámara de monitoreo de CO₂ basada en el diseño de (Song et al. 2016), la cual consistió en un prisma cuadrangular cuyos lados se construyeron de policarbonato, a excepción de la base, a fin de que permita el paso de luz del exterior al interior; las medidas fueron de 60 cm de lado y 120 cm de alto, todos los bordes se sellaron con silicón para evitar el intercambio de gases entre el interior y el exterior. La base de la cámara, en donde se colocarán las plantas, se hizo desmontable para poder introducir las plantas, siendo esta pieza la única que se elaboró con una lámina de metal galvanizado de 3 milímetros para que pudiera soportar el peso de las plantas, además, se colocaron empaques termomagnéticos en las orillas de las paredes de policarbonato que hacen contacto con la base de metal, esto se hizo para garantizar el cierre hermético al momento de cerrar la cámara, se puede apreciar el diseño y los componentes de la cámara de monitoreo en la Figura 2.

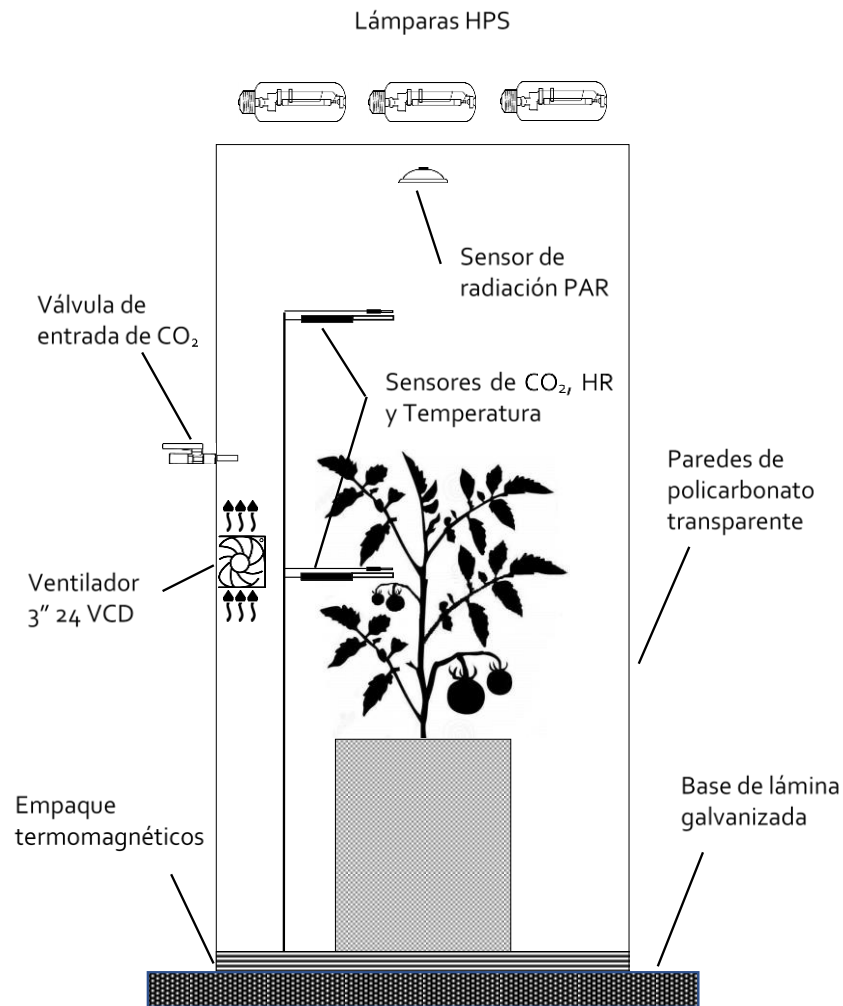


Figura 2. Esquema de la cámara de monitoreo de CO₂.

A la cámara de monitoreo se le instalaron 2 sensores infrarrojos de CO₂ marca Almemo, 1 sensor de radiación PAR de Spectrum Technologies, 2 sensores de temperatura/humedad-relativa/presión-atmosférica Almemo y 1 ventilador de 3" de diámetro para homogeneizar el aire y sus contenidos dentro de la cámara, las especificaciones se muestran a continuación:

Sensor de CO₂: Marca Almemo. Modelo FYAD00CO2. Rango de medición de 0 a 10,000 ppm. Exactitud de $\pm 5\%$ del valor medido. Condiciones ambientales operativas de temperatura de 0 a 95% de humedad relativa y de -40 a 60 °C de temperatura.

Sensor de radiación PAR: Marca Spectrum Technologies. Modelo 36381. Longitud de onda medida de 400 a 700 nm. Rango de medición de 0 a 2,500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}^{-1}$. Exactitud de $\pm 5\%$ del valor medido.

Sensor de Temperatura / Humedad Relativa / Presión Atmosférica: Marca Almemo. Modelo FHAD46-Cx. Rango de medición de 0 a 98% de Humedad Relativa, de -20 a 80 °C y de 700 a 1,100 mbar. Exactitud de $\pm 2\%$ para Humedad Relativa, ± 0.2 °C para Temperatura y ± 2.5 mbar para Presión Atmosférica. La humedad absoluta se calcula automáticamente con los datos de Temperatura, Humedad Relativa y Presión Atmosférica y es reportada en g/m^3 .

7.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Para comprobar que la cámara estaba herméticamente sellada en cuanto a intercambio de gases, se inyectó CO₂ al interior de la cámara hasta alcanzar 1000 ppm de CO₂ y se monitoreó su concentración por 4 horas.

También se realizaron pruebas de funcionamiento de la cámara de monitoreo de CO₂ dentro del invernadero en el que se desarrolló el cultivo. Estas pruebas consistieron en meter una planta dentro de la cámara y determinar el comportamiento de las concentraciones de CO₂, humedad absoluta y temperatura dentro de la cámara; puesto que la cámara se colocó bajo los rayos directos del sol, la temperatura dentro de la cámara incrementó dramáticamente en cuestión de pocos segundos, así como la humedad relativa. También se observó que la radiación PAR se mantuvo inestable, por causa de las nubosidades naturales. Por esta razón se decidió hacer los ensayos en un ambiente controlado tal como lo sugiere (Paradise & Cyr 1995).

7.2 DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE CO₂

7.2.1 Modificación de condiciones ambientales

Se colocaron 3 lámparas de vapor de sodio de alta presión al exterior de la cámara, cada una de distinta potencia y radiación PAR, a fin de dar diferentes variaciones de luz dentro de la cámara, las lámparas fueron de 1000 W, 400 W y 250 W; también se instaló un tanque de CO₂ licuado con válvula de precisión y regulador de presión para enriquecer la concentración de este nutriente en el aire del interior. La temperatura y la humedad relativa se controlaron con la ayuda de equipos eléctricos de enfriamiento, calefacción, desecación y humidificación (ver Figura 3).

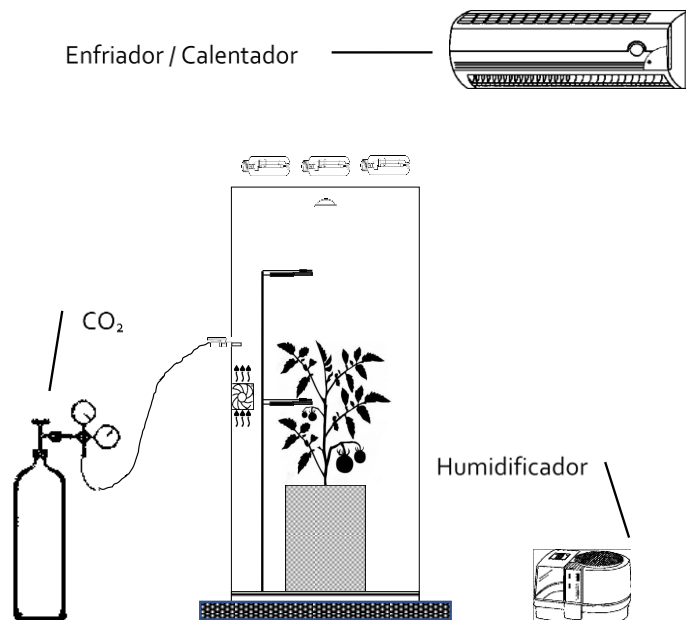


Figura 3. Esquema de la distribución de los equipos de humidificación, calefacción/enfriador y suministro de CO₂.

7.2.2 Tratamientos

Se llevaron a cabo las mediciones a las plantas de tomate cuando éstas entraron en la etapa de floración, a los 50 días después del trasplante; después se hicieron otras mediciones en la etapa de fructificación, a los 84 días después del trasplante, que son los momentos críticos en los que se empieza con la inyección de CO₂ en los invernaderos.

El total de tratamientos fueron 10, 5 para la etapa de floración y 5 para la etapa de fructificación, tales como se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Tratamientos en la etapa de floración y fructificación, la humedad relativa inicial para todos los tratamientos fue de 40%.

Tratamiento	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Temperatura (°C)	28	28	28	33	23	28	18	38	28	28
[CO ₂] (ppm)	700	1000	400	700	700	700	700	700	700	700
PAR $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	650	30

Es importante señalar que todos los experimentos se hicieron por triplicado y se hicieron análisis de varianza y comparación de medias (Tukey, con ayuda del software OringinPro 8).

7.2.3 Monitoreo del consumo de CO₂

Las mediciones de consumo de CO₂ se hicieron entre 10:00 a.m. y 12:00 p.m. Una vez establecidas las condiciones de temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ y radiación PAR, mediante los equipos ya mencionados, se introdujeron una a una las plantas de tomate; inmediatamente después, la cámara se cerró herméticamente y se empezó con el registro de datos de temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ y radiación PAR durante un tiempo de 1100 segundos equivalentes a 1000 datos registrados, debido a que cada medición se realizó cada 1.1 segundos que es el intervalo menor que se pudo programar en el equipo. Después del tiempo transcurrido, se detuvo el registro de datos y se abrió la cámara de monitoreo para volver a establecer las condiciones iniciales deseadas para el experimento siguiente. En el tiempo transcurrido, la concentración de CO₂ y H₂O dentro de la cámara se modificaron por efecto de la respiración y fotosíntesis que la planta realiza de manera natural; por lo que la diferencia de concentraciones de CO₂ entre el inicio y el fin de las mediciones, es la cantidad de este nutriente que la planta consume para esas condiciones ambientales dadas, de la misma manera sucedió con la concentración de H₂O.

7.2.4 Medición de superficie foliar

Después del monitoreo del consumo de CO₂, a cada planta se le midió la superficie foliar mediante el análisis con fotografías digitales (Rico-garcía 2009). La medición del área foliar se hizo para relacionar la cantidad de CO₂ absorbida por unidad de superficie foliar y determinar el consumo de CO₂ de cada planta y cada tratamiento. En breve, la determinación de la superficie foliar mediante fotografías digitales consiste en tomar fotografías de las hojas de la planta sobre una superficie blanca, así mismo se toma una fotografía de un objeto con un área conocida, posteriormente las fotografías se analizan en el software MatLab, este software cuenta los píxeles que corresponden a las hojas de las plantas en las fotografías de las hojas, también cuenta los píxeles correspondientes al objeto de área conocida; finalmente determina el área de las hojas en relación al área conocida del objeto.

8 RESULTADOS

Se logró construir una cámara de monitoreo de CO₂ funcional para medir plantas completas de tomate de 1 metro de altura, que son plantas que pueden estar en la etapa de floración y fructificación, dichas etapas en el cultivo de tomate son críticas para empezar con aportes de CO₂ en distintas condiciones ambientales para incrementar el rendimiento en los cultivos. En la prueba de hermeticidad se observó un comportamiento constante de la concentración de CO₂ dentro de la cámara durante el tiempo que duró la prueba, tal como se muestra en la Figura 4.

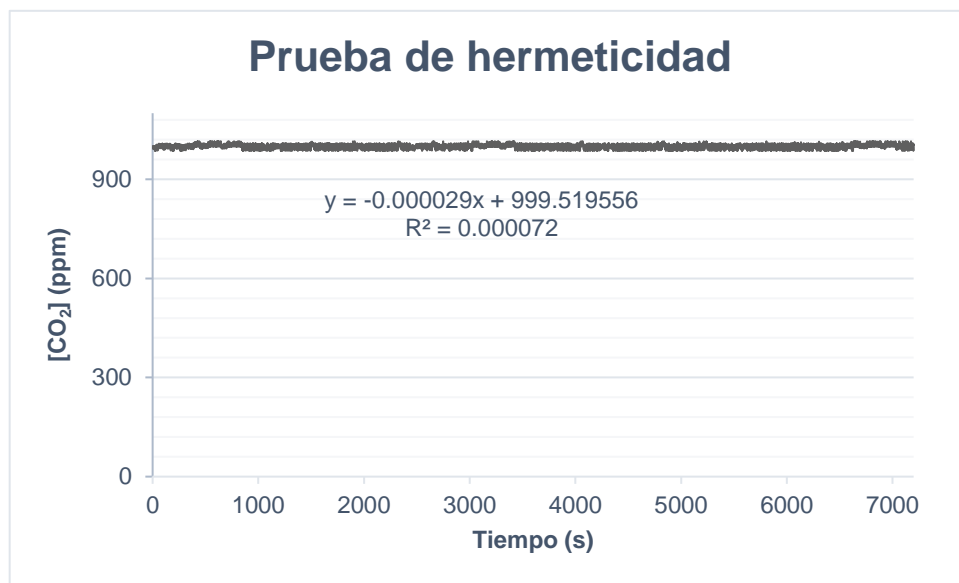


Figura 4. Concentración de CO₂ en la cámara de monitoreo de CO₂ sin plantas para la prueba de hermeticidad.

Se logró obtener una curva para cada tratamiento de la relación entre la concentración de CO₂ dentro de la cámara y el tiempo (Figura 5). Con estos datos se determinó la concentración de CO₂ al inicio y al final de cada uno de los tratamientos, esto para determinar la tasa fotosintética de las plantas.

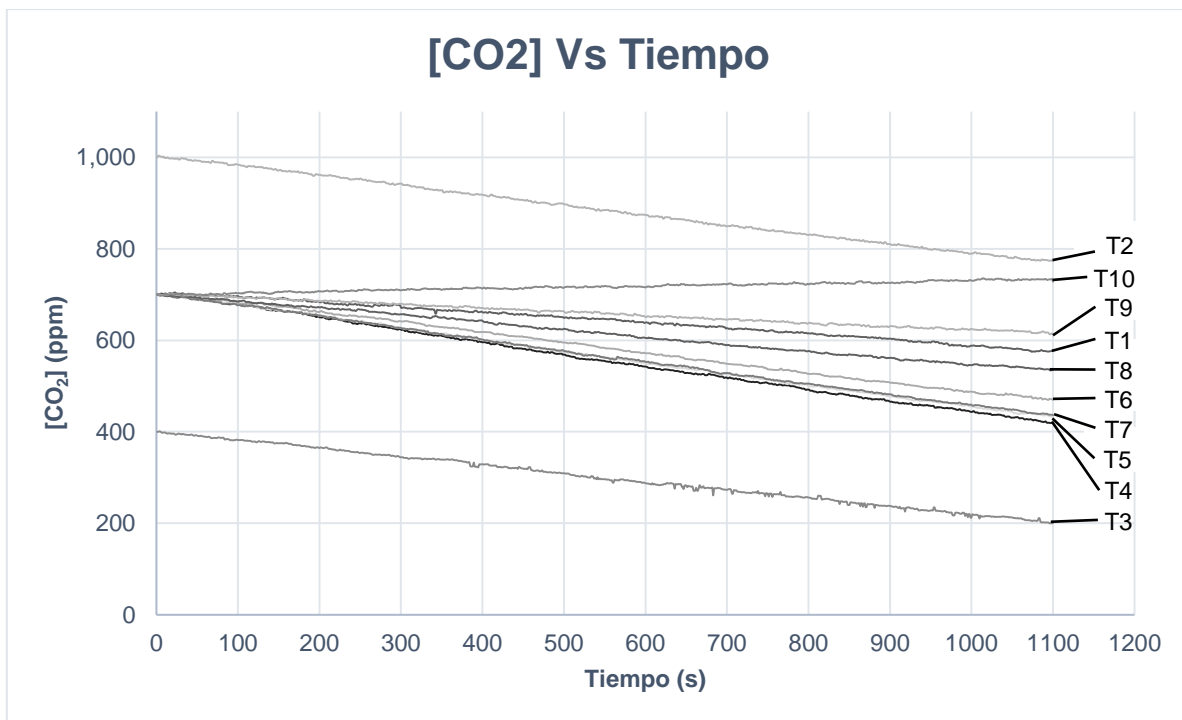


Figura 5. Decrecimiento de la concentración de CO₂ dentro de la cámara respecto al tiempo para cada uno de los tratamientos.

El comportamiento de la curva de concentración de CO₂ dentro de la cámara de monitoreo se mostró completamente lineal para todos los tratamientos, lo que nos indica que la tasa fotosintética durante el experimento se mantuvo constante y no se vio afectada por las variaciones de las concentraciones de los demás gases como el vapor de agua y el mismo CO₂.

También se obtuvieron las curvas de humedad absoluta respecto al tiempo. Estos datos nos reflejan la transpiración de las plantas, fenómeno que está ligado directamente a la fotosíntesis (Figura 6).

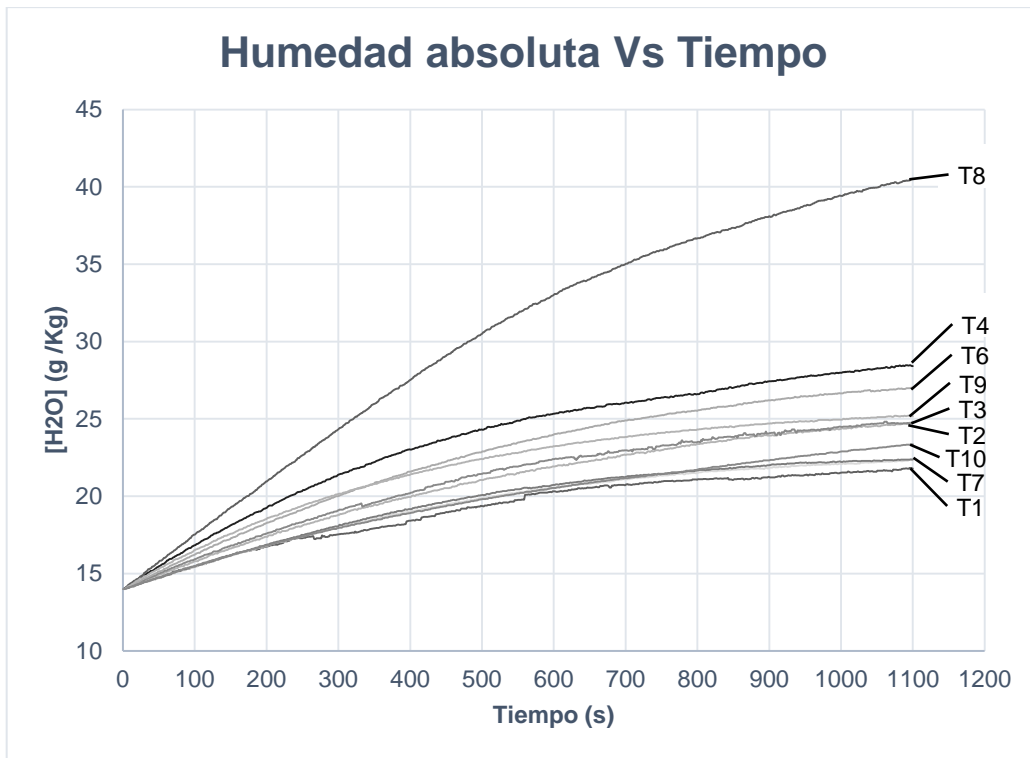


Figura 6. Comportamiento de la humedad absoluta respecto al tiempo dentro de la cámara de monitoreo para cada tratamiento y sus repeticiones.

El comportamiento de la humedad dentro de la cámara de monitoreo resultó ser de forma cuadrática, para todos los casos incrementó la concentración de vapor de agua o transpiración y la tasa fue disminuyendo conforme pasó el tiempo.

El volumen de la cámara de monitoreo fue de 432 litros y los ensayos de cada planta duraron 1100 segundos. Con estos datos y la superficie foliar de cada planta que se muestran en la Figura 7, se obtuvo la relación entre la disminución de la concentración de CO_2 (Figura 8) y el aumento de humedad absoluta (Figura 9) dentro de la cámara.

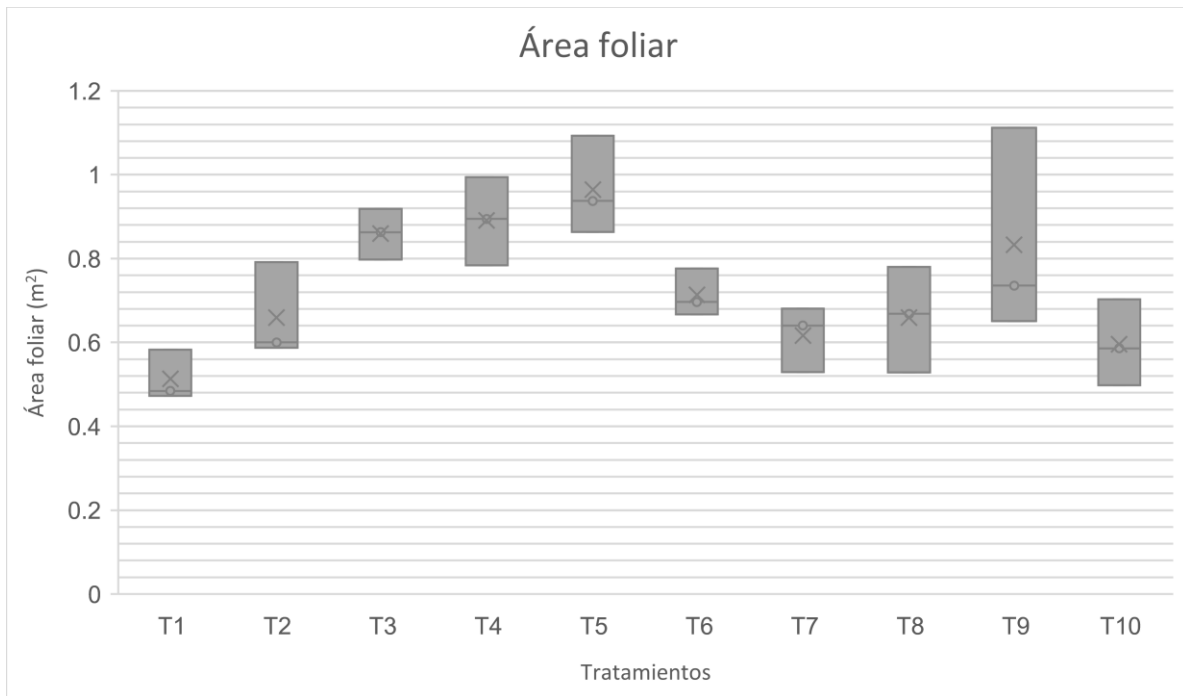


Figura 7. Superficie foliar en metros cuadrados (m²) para cada uno de los tratamientos. Las X dentro de las barras indican las medias y la barra indica la desviación estándar de la media.

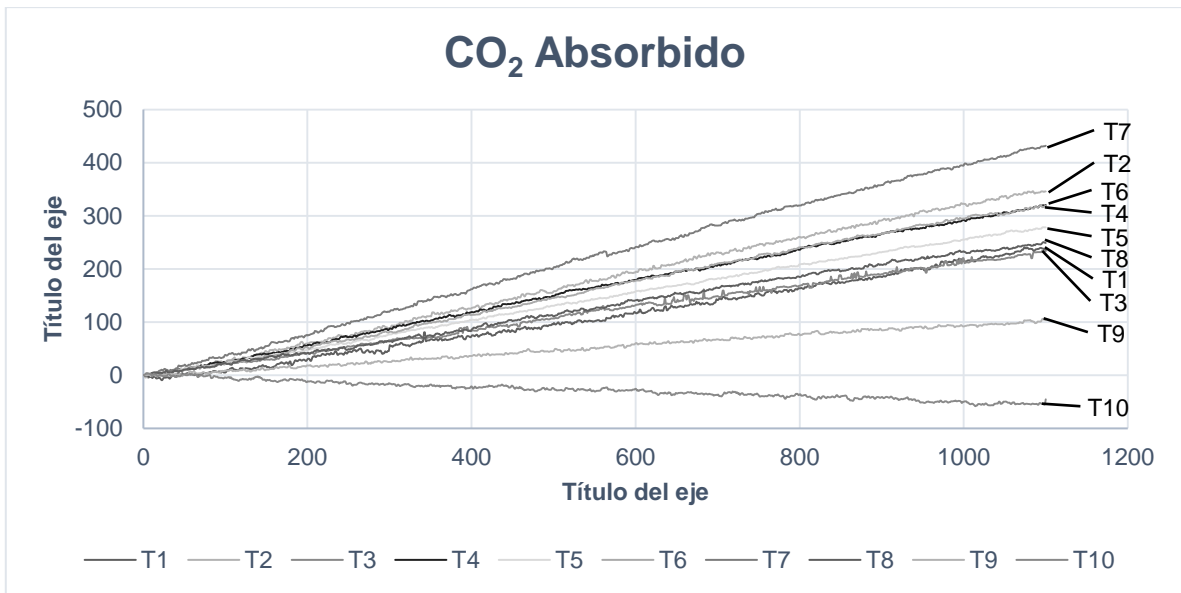


Figura 8. Cantidad de CO₂ absorbido por cada metro cuadrado de superficie foliar para cada tratamiento y sus repeticiones.

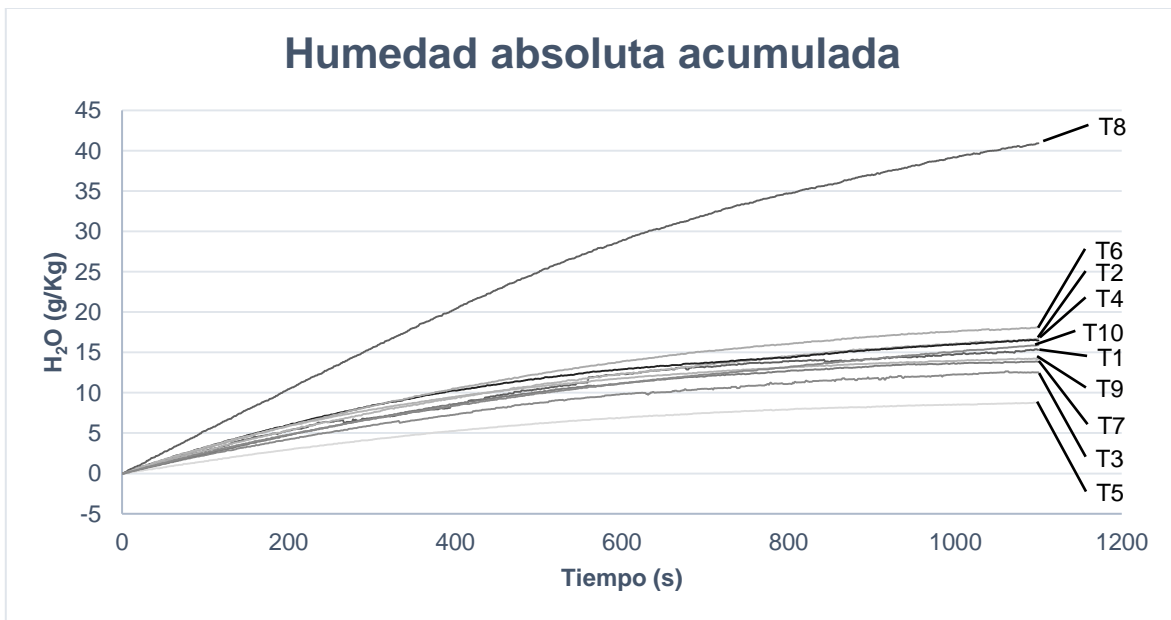


Figura 9. Humedad absoluta acumulada en la cámara de monitoreo durante el experimento para cada tratamiento y sus repeticiones.

Con los datos obtenidos de la concentración de CO₂ y humedad absoluta al inicio y al fin de cada experimento, se logró obtener la tasa fotosintética (Figura 10) y la tasa de transpiración (Figura 11) para cada tratamiento.

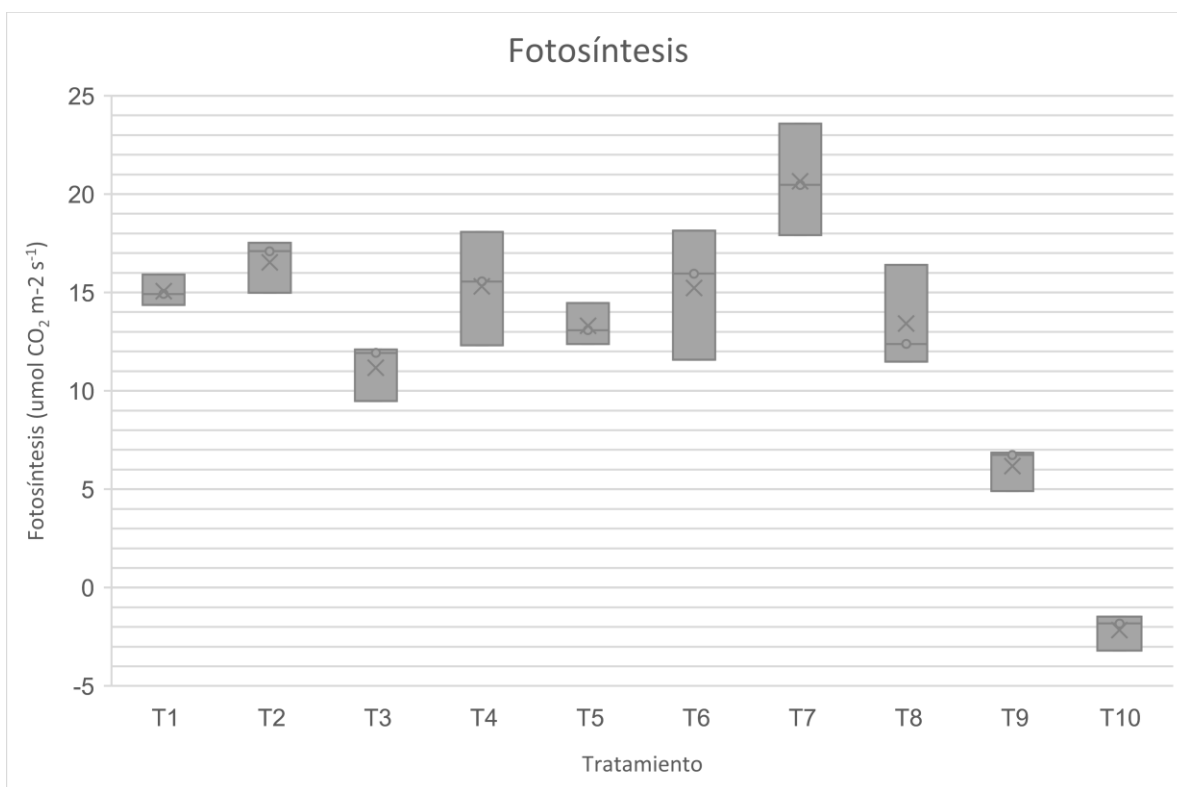


Figura 10. Comparación de medias de las tasas fotosintéticas en tomate medidas en una cámara cerrada. Prueba de Tukey con 0.05 de nivel de significancia.

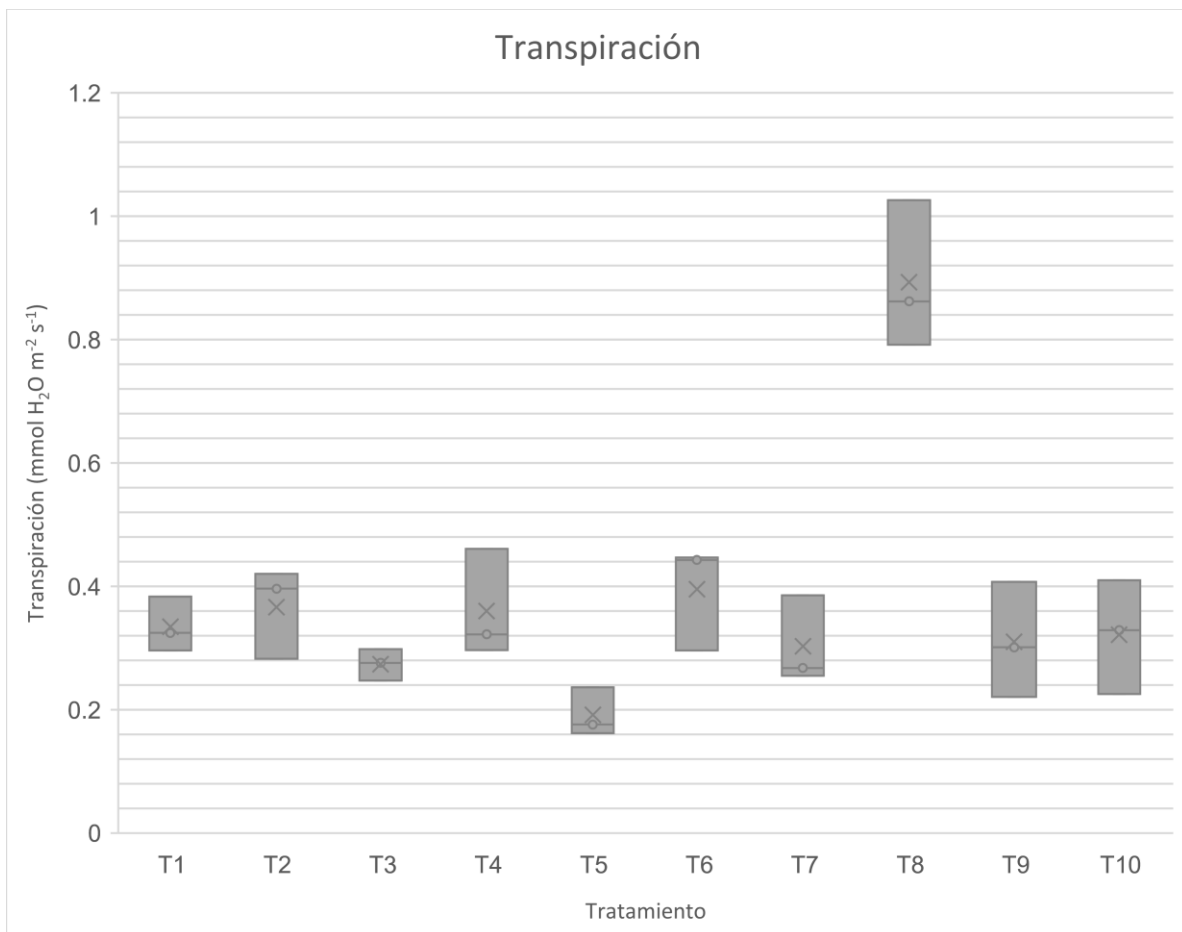


Figura 11. Comparación de medias de la transpiración de las plantas para cada uno de los tratamientos. Prueba de Tukey con 0.05 de nivel de significancia.

Se encontró que hubo diferencias significativas entre los distintos tratamientos (distintas combinaciones de condiciones ambientales), lo que reitera que el efecto del clima en una planta afecta significativamente la fotosíntesis y a su vez la productividad del cultivo. Se obtuvo que el tratamiento con la mayor tasa fotosintética fue el T7. Para la transpiración también hubo significativas entre los tratamientos, aunque

entra la mayoría de los tratamientos no se obtuvieron diferencias significativas, claramente se pudo determinar que el tratamiento con mayor transpiración corresponde al de mayor temperatura (T8).

Cuando se compararon las medias de los tratamientos de floración a una concentración de CO₂ variable (Figura 12), se determinó que en los tratamientos con mayor concentración de CO₂ en el aire 700 y 1000 ppm se obtuvo mayor actividad fotosintética.

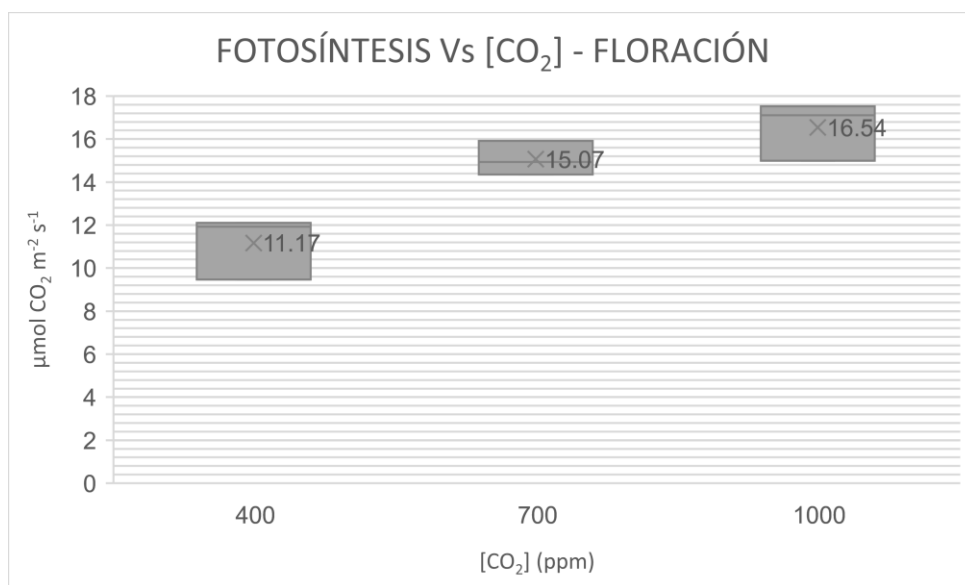


Figura 12. Fotosíntesis a distintas concentraciones de CO₂ en la etapa de floración a 28°C y 1400 µmol PAR m⁻² s⁻¹.

En la comparación de medias de la etapa de floración a una temperatura variable (Figura 13), se determinó que no hubo diferencias significativas entre los distintos tratamientos.

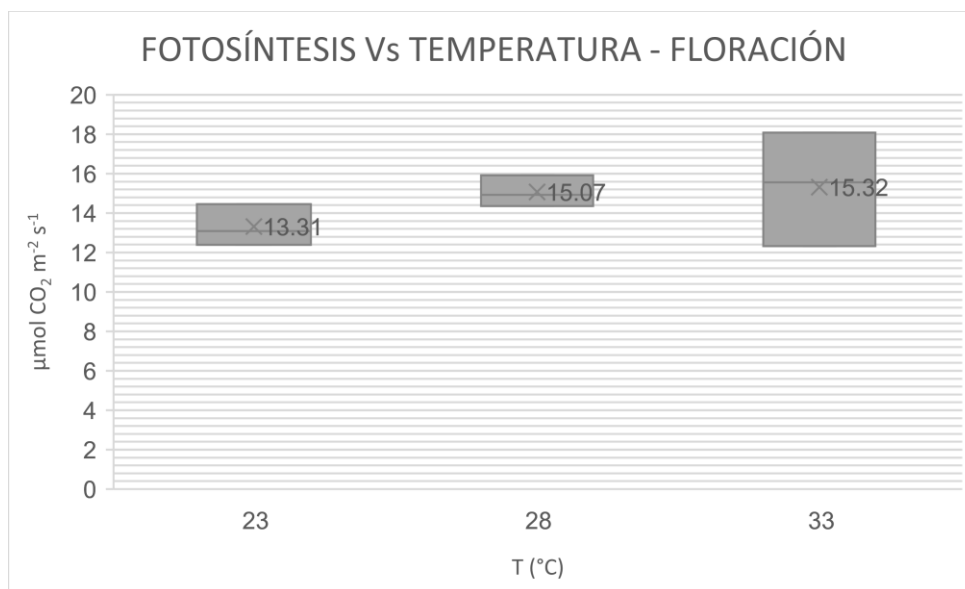


Figura 13. Fotosíntesis a distintas temperaturas en la etapa de floración a 700 ppm de CO₂ y 1400 μmol PAR m⁻² s⁻¹.

La comparación de medias de los tratamientos con distinta intensidad de PAR para la etapa de fructificación (Figura 14), se determinó que los 3 tratamientos fueron significativamente distintos entre sí, siendo el tratamiento con el mayor valor de PAR en el que se logró una actividad fotosintética mayor, y el de menor valor de PAR resultó ser el de menor actividad fotosintética.

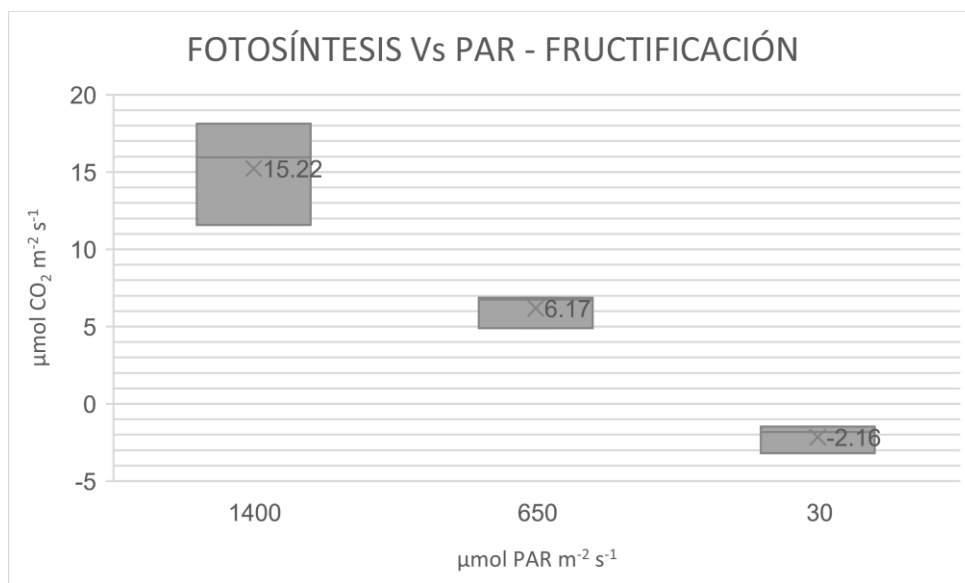


Figura 14. Fotosíntesis a distintas intensidades de Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR) en la etapa de fructificación a 28 °C y 700 ppm de CO₂.

Comparando las medias de los tratamientos de temperatura variable en la etapa de fructificación, se determinó que el tratamiento con mayor temperatura tuvo una actividad fotosintética menor al tratamiento con la menor temperatura, tal como se muestra en la Figura 15.

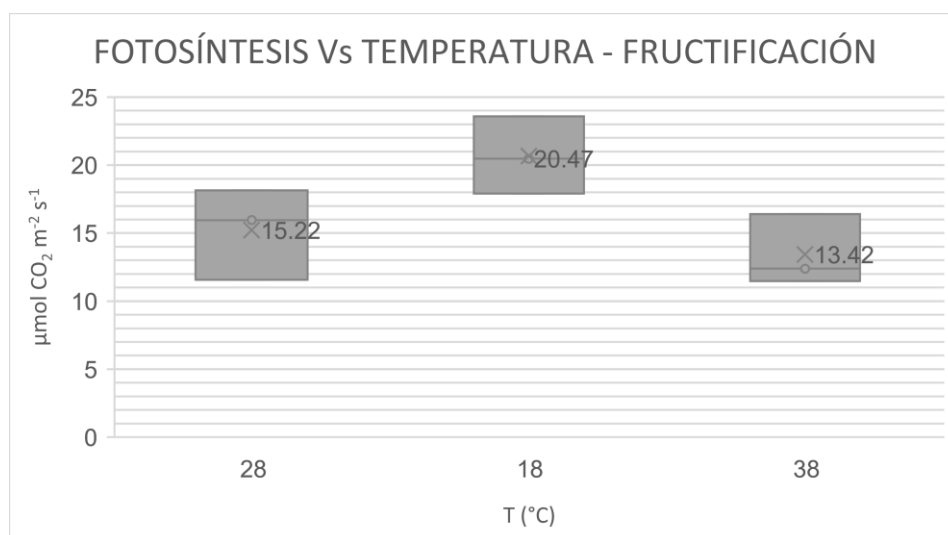


Figura 15. Fotosíntesis a distintas temperaturas en la etapa de fructificación a 700 ppm de CO₂ y 1400 µmol PAR m⁻² s⁻¹.

No hubo diferencias significativas de la actividad fotosintética de las plantas entre la etapa de floración y la etapa de fructificación (Figura 16).

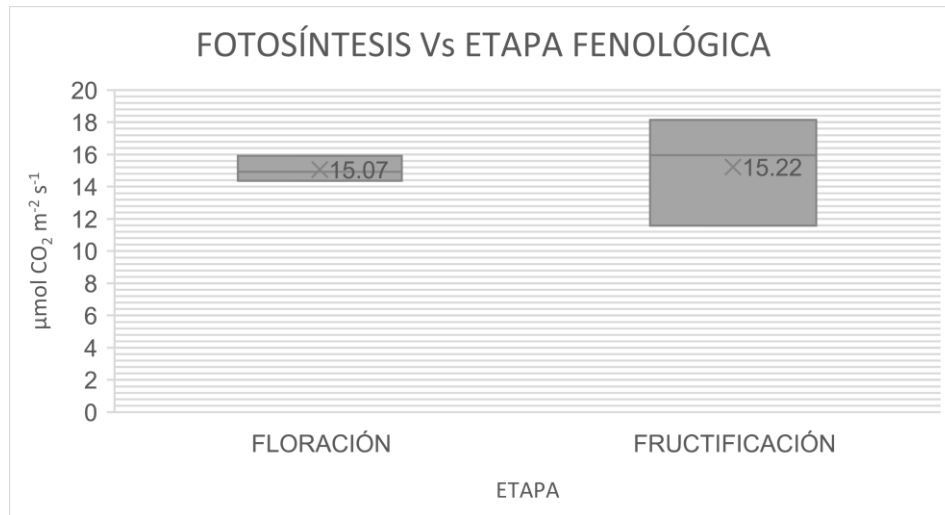


Figura 16. Fotosíntesis a distintas etapas fenológicas a 28 °C, 700 ppm de CO₂ y 1400 μmol PAR m⁻² s⁻¹.

En cuanto a transpiración se refiere, solo hubo diferencias significativas en la etapa de fructificación teniendo como variable la temperatura, en donde se determinó una mayor transpiración en el tratamiento de mayor temperatura (38 °C), comprada con las temperaturas media (28 °C) y baja (18 °C).

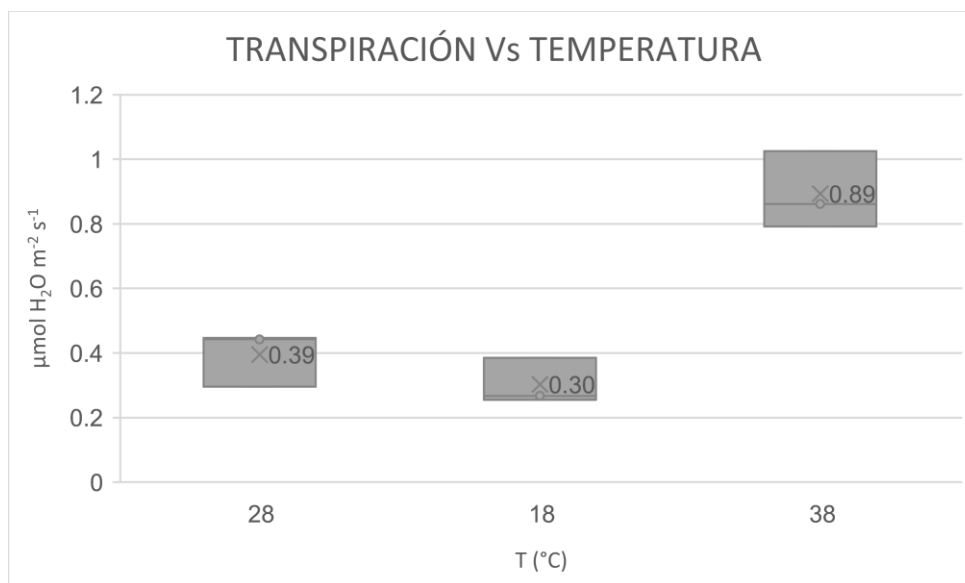


Figura 17. Transpiración a distintas temperaturas para la etapa de fructificación a 700 ppm de CO₂ y 1400 μmol PAR m⁻² s⁻¹.

9 DISCUSIÓN

Mediante la combinación de las técnicas de determinación de consumo de CO₂ y la medición de área foliar mediante fotografías digitales, se pudo determinar las tasas fotosintéticas de plantas sometidas a distintas condiciones ambientales. Cabe remarcar que la tasa fotosintética determinada corresponde a una planta completa de tomate, es decir, la tasa fotosintética del follaje, lo que puede ser de gran utilidad para estimar la productividad de un cultivo de acuerdo con (Song et al. 2016).

En la Figura 5 se puede observar que todas las líneas que representan la disminución de la concentración de CO₂ dentro de la cámara de monitoreo, tienen un comportamiento lineal, esto lo interpreto como una invariabilidad de la tasa fotosintética de la planta durante el tiempo en que se llevó a cabo el experimento (1100 s), puesto que si la tasa fotosintética variara, la pendiente de las líneas también lo hicieran y no se obtendría un comportamiento lineal, esto a pesar de que la concentración de

CO₂ y de vapor de agua estuvieron cambiando a lo largo del experimento, sabiendo que estas dos variables de clima afectan la tasa fotosintética de las plantas según a la concentración que se encuentren (Suzuki et al. 2015b; Li et al. 2015).

El comportamiento de las curvas de humedad absoluta (Figura 6) son de acuerdo a lo que se esperaba obtener, debido a que el proceso de fotosíntesis implica la liberación de vapor de agua al medio ambiente; este vapor de agua al no poderse escapar de la cámara de monitoreo, ejerce una presión de vapor sobre las hojas de las plantas que dificulta la transpiración cada vez más durante el experimento, por eso la pendiente de la curva se puede apreciar cada vez menos pronunciada. Este fenómeno fue importante para determinar el tiempo del experimento, puesto que a los 1100 segundos para la mayoría de los tratamientos se alcanzó el 90% de humedad relativa, por consiguiente el consumo de CO₂ por las plantas se notó reducido.

En cuanto a la tasa fotosintética se puede observar claramente que el tratamiento T7 fue en el que se obtuvo la mayor tasa fotosintética de los 10 tratamientos (Figura 10). Este tratamiento implica una temperatura baja (18°) y concentración de CO₂ media (700 ppm), por lo que nos sugiere que la poca tasa de respiración que se presenta en las plantas a esa temperatura ayudó a mejorar la absorción de CO₂ del aire a diferencia de los demás tratamientos. Esta observación hace que se pueda considerar, por ejemplo, que a temperaturas bajas podemos mejorar la absorción de CO₂ en el cultivo de tomate en un invernadero inyectando CO₂ a 700 ppm mientras dure esta combinación de condiciones ambientales que se presentaron en el tratamiento T7 y que no se presentaron en los demás tratamientos.

En la comparación de medias de la superficie foliar (Figura 7), podemos observar que sí hubo diferencias significativas entre tratamientos, sin embargo, no se encontró relación alguna con la tasa fotosintética de las plantas ni la transpiración, por lo que podemos señalar que la fotosíntesis está limitada sobre todo a las condiciones ambientales que se presenten.

Los tratamientos con distintas concentraciones de CO₂ (Figura 12) mostraron un comportamiento esperado, de acuerdo con (Li et al. 2015) la actividad fotosintética de una planta aumenta cuando la concentración de CO₂ en el aire también aumenta, teniendo esta relación un comportamiento cuadrático.

En los tratamientos de la etapa de floración con distintas temperaturas (Figura 13), se obtuvo que el tratamiento de menor temperatura tuvo la mayor tasa fotosintética, esto puede ser debido a que a bajas temperaturas, las células de los tejidos de las plantas tienen menor actividad y por tanto menor respiración celular, provocando que la tasa fotosintética de la planta sea mayor (Kläring et al. 2015b).

Los tratamientos con distintas intensidades de radiación (Figura 14) muestran la influencia tan importante que tiene esta sobre la productividad de los cultivos, puesto que entre los 3 tratamientos hubo diferencias significativas.

En la comparación de transpiración en los tratamientos de la etapa de fructificación (Figura 17), se obtuvo una notable alta transpiración del tratamiento con mayor temperatura, esto es lógico debido a que a mayor temperatura habrá una mayor transpiración de las plantas (Kitaya 2016).

En general con este método se logró modificar las condiciones ambientales con éxito al interior de la cámara, con lo que se podrían hacer un sin fin de combinaciones más con fines de investigación y pruebas para aplicaciones comerciales. Este método resultó ser económico comparado con los equipos IRGA que tradicionalmente se utilizan. También considero que es un método muy útil para elegir la mejor combinación de condiciones ambientales con las que un cultivo puede aumentar sus rendimientos; así, se pudiera establecer una estrategia para el manejo del clima dentro de un invernadero.

10 CONCLUSIÓN

La determinación del consumo de CO₂ en plantas completas de tomate y su relación con las condiciones ambientales dadas como radiación solar, temperatura y concentración de CO₂, permitió determinar la combinación de condiciones ambientales con la mejor tasa fotosintética en el cultivo. En este caso, las mejores tasas fotosintéticas se obtuvieron a una radiación alta de 1,400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de PAR, concentración de CO₂ media de 700 ppm y temperaturas bajas de 18 a 28 °C.

Debido a que se observó que las temperaturas bajas y concentraciones de CO₂ altas pueden favorecer la absorción de CO₂ de las plantas se podría hacer estudio más exhaustivo con este sistema enfocado a buscar temperaturas bajas con distintas intensidades de radiación y concentración de CO₂, para determinar las mejores condiciones en las que se pudieran obtener las tasas fotosintéticas más altas y así, poder definir estrategias de manejo de clima en un invernadero. Esto tiene sentido de acuerdo con (Xin et al. 2015) quien menciona que los mayores porcentajes de rentabilidad en la inyección de CO₂ en un invernadero, se obtienen cuando este solo es usado en las primeras horas del día, cuando la temperatura es relativamente baja.

11 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baille, A., 1999. *Greenhouse ecosystems* Elsevier., Netherlands. Available at: http://ual.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwdV3PC0FBEJ5eHB3IE6KcFT276_04InJwQnJ77bOzUUg9Lg7-drPLpsRxt3Z3DvPjm2nmWwDO-kHvyeeEEgc6TLiOCMBnXCeGtawnMZIx7pCb8efFPFyOh5NRvPXA_Swnjycy_Hv_RjgU80_dIqC0hIvHKurmlwP5X0OaTrosNoEdOqeUg1BzFDmCHbc28cPV S23.
- Camejo, D. et al., 2002. CHANGES INDUCED BY HIGH TEMPERATURES IN PHOTOSYNTHESIS AND ANTIOXIDANT RESPONSE ON TWO GENOTYPES OF TOMATO (*Lycopersicon esculentum*). , 23(4), pp.33–37.
- Castellanos, J.Z., 2009. *Manual de producción de tomate en invernadero* Intagri.,
- Castilla, N., 2005. *Invernaderos de plástico tecnología y manejo* Ediciones., España.
- Day, W. & Bailey, B.J., Physical principles of microclimate modification.
- Edwards, D., Jolliffe, P. & Ehret, D., 2010. Canopy profiles of starch and leaf mass per area in greenhouse tomato and the relationship with leaf area and fruit growth. *Scientia Horticulturae*, 125(4), pp.637–647. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304423810002451>.
- Hanan, J.J., 1998. *Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture* CRC Press., USA. Available at: <http://www.crcpress.com/product/isbn/9780849316982>.
- Hickleton, P.R., 1998. *CO2 enrichment in the glasshouse* Timber Pre., USA.
- Jones, J.B. et al., 2001. *Plagas y enfermedades del tomate*,
- Kitaya, Y., 2016. Air Current Around Single Leaves and Plant Canopies and Its Effect on Transpiration, Photosynthesis, and Plant Organ Temperatures. In *LED Lighting for Urban Agriculture*.
- Kläring, H.-P. et al., 2015a. The effect of reducing the heating set point on the photosynthesis, growth, yield and fruit quality in greenhouse tomato production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214–215, pp.178–188. Available at:

<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168192315006826>.

Kläring, H.-P. et al., 2015b. The effect of reducing the heating set point on the photosynthesis, growth, yield and fruit quality in greenhouse tomato production. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214–215, pp.178–188. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192315006826>.

Kläring, H.-P. & Krumbein, a., 2013. The Effect of Constraining the Intensity of Solar Radiation on the Photosynthesis, Growth, Yield and Product Quality of Tomato. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199(5), pp.351–359. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/jac.12018>.

Klopotek, Y. & Kläring, H.-P., 2014. Accumulation and remobilisation of sugar and starch in the leaves of young tomato plants in response to temperature. *Scientia Horticulturae*, 180, pp.262–267. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304423814005858>.

Lange, O.L., 1962. Eine “Klapp-Küvette” zur CO₂-Gaswechselregistrierung an Blättern von Freiland-pflanzen mit dem URAS. *Ber. deut. bot. Ges.*, 75, pp.41–50.

Li, T. et al., 2015. Management of CO₂ in a tomato greenhouse using WSN and BPNN techniques. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 8(4), pp.43–51.

Lorenzo, P. et al., 1997. Evaluación de la incorporación de sistemas de calefacción en la horticultura intensiva bajo cubierta de plástico en el sur del mediterraneo. In *Actas de horticultura*, pp. 371–378.

Mamatha, H. et al., 2014. Impact of elevated CO₂ on growth, physiology, yield, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) cv. Arka Ashish. *Photosynthetica*, 52(4), pp.519–528. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s11099-014-0059-0>.

Matsuda, R. et al., 2011. Responses of leaf photosynthesis and plant growth to altered source–sink balance in a Japanese and a Dutch tomato cultivar. *Scientia Horticulturae*, 127(4), pp.520–527. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304423810005443>.

Murchie, E.H., Pinto, M. & Horton, P., 2009. Agriculture and the new challenges for photosynthesis research. *New Phytologist*, 181(3), pp.532–552.

- Nederhoff, E.M., 1995. Carbon dioxide balance. In *Work*. Netherlands: Wageningen Pers, p. 305.
- Paradise, C.J. & Cyr, R.J., 1995. Carbon Dioxide Uptake in Plants : A Computer-Aided Experimental System. *Association for Biology Laboratory Education*, pp.99–114.
- Qian, T. et al., 2012. Leaf photosynthetic and morphological responses to elevated CO₂ concentration and altered fruit number in the semi-closed greenhouse. *Scientia Horticulturae*, 145, pp.1–9. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2012.07.015>.
- Reicosky, D.C., 1990. Canopy gas exchange in the field: Closed chambers. *Remote Sensing Reviews*, 5(1), pp.163–177. Available at: <http://dx.doi.org/10.1080/02757259009532127>.
- Rico-garcía, E., 2009. Two new Methods for the Estimation of Leaf Area using Digital Photography Two new Methods for the Estimation of Leaf Area using Digital Photography. , (January 2009).
- Song, Q. et al., 2016. A new canopy photosynthesis and transpiration measurement system (CAPTS) for canopy gas exchange research. *Agricultural and Forest Meteorology*, 217, pp.101–107. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.11.020>.
- Suzuki, M. et al., 2015a. Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production. *Scientia Horticulturae*, 187, pp.44–49. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304423815001089>.
- Suzuki, M. et al., 2015b. Effects of relative humidity and nutrient supply on growth and nutrient uptake in greenhouse tomato production. *Scientia Horticulturae*, 187, pp.44–49. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2015.02.035>.
- Xin, M. et al., 2015. Effectiveness of gaseous CO₂ fertilizer application in China's greenhouses between 1982 and 2010. *Journal of CO₂ Utilization*, 11, pp.63–66. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982015000074>.

ANEXO: PROCEDIMIENTO PARA MEDIR EL CONSUMO DE CO₂ EN LA CÁMARA DE MONITOREO.

1. Colocar la base de metal de la cámara de monitoreo con el soporte universal y los sensores instalados al centro del cuarto de condiciones controladas.
2. Conectar los sensores instalados en la cámara de monitoreo al equipo de medición o computadora para empezar a monitorear las condiciones ambientales; conectar el ventilador a la corriente eléctrica.
3. Encender los equipos de control de temperatura y humedad relativa en el cuarto de condiciones ambientales controladas y programar las condiciones deseadas.
4. Encender las lámparas HPS y esperar hasta que la radiación sea constante, estas lámparas pueden tardar hasta 10 minutos en alcanzar el encendido total y radiación constante.
5. Abrir la válvula del cilindro de CO₂ hasta alcanzar la concentración de CO₂ en el aire deseada.
6. Esperar hasta que todas las condiciones sean estables de acuerdo con los sensores instalados en la cámara de monitoreo.
7. Colocar la planta de tomate encima y al centro de la base de metal y sostenerla con una rafia al extremo superior del soporte universal.
8. Envolver con una bolsa de plástico la base de la planta (bolsa o maceta con sustrato), haciendo un nudo alrededor del tallo para asegurar que no haya intercambio de gases entre el sustrato y el aire del cuarto.
9. Una vez estables las condiciones ambientales, cubrir la planta con la caja de policarbonato y asegurarse que el cierre sea hermético.
10. Activar el registro de datos de todos los sensores
11. Esperar durante el tiempo determinado para el ensayo.
12. Detener el registro de datos cuando haya transcurrido el tiempo deseado o cuando se haya alcanzado el 90% de humedad relativa dentro de la cámara.
13. Desmontar la caja de policarbonato y deshojar la planta.

14. Colocar las hojas de la planta extendidas sobre una lona blanca o cualquier otra superficie blanca.
15. Montar el trípode y la cámara fotográfica sobre la superficie blanca.
16. Tomar una fotografía a las hojas completamente extendidas cuidando de que no aparezca ningún otro objeto ni sombra en la imagen, solo deberán aparecer las hojas extendidas de la planta y la superficie blanca como fondo. Si las hojas de la planta no caben en una imagen, se podrán tomar más fotografías de las hojas restantes.
17. Retirar las hojas de la planta y colocar el objeto con el área de referencia sobre la superficie blanca.
18. Tomar la fotografía del área de referencia teniendo cuidado de que la imagen sea tomada a la misma distancia, con el mismo ángulo y el mismo tamaño de píxeles que la imagen de las hojas. Se recomienda una calidad baja de la fotografía, es decir, con el menor número de píxeles en la imagen por ejemplo del tipo VGA; esto es para agilizar el procesamiento de imágenes digitales con el software.
19. Analizar o procesar las imágenes tomadas de la planta con el software MatLab para determinar el área foliar, de acuerdo con el procedimiento de análisis de imágenes digitales descrito por (Rico-garcía 2009).