



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

“Enseñar la explotación de la tierra, no la del hombre”

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

**ANÁLISIS ECOFISIOLÓGICO EN VARIEDADES DE
PEPINO BAJO UN SISTEMA HIDROPÓNICO DE
CULTIVO EN TRES FASES**

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE:

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

Wendy Moral Urbina

Bajo la dirección del Dr. Felipe Sánchez del Castillo



Chapingo, Estado de México, mayo de 2025



APROBADA



**ANÁLISIS ECOFISIOLÓGICO EN VARIEDADES DE PEPINO BAJO UN
SISTEMA HIDROPÓNICO DE CULTIVO EN TRES FASES**

Tesis realizada por WENDY MORAL URBINA bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



Dr. FELIPE SÁNCHEZ DEL CASTILLO

ASESOR:



Dr. ESAÚ DEL CARMEN MORENO PÉREZ

ASESOR:



Dr. NATANAEL MAGAÑA LIRA

Chapingo, Texcoco, Estado de México, México, mayo de 2025.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	viii
AGRADECIMIENTOS	ix
DATOS BIOGRÁFICOS.....	x
RESUMEN GENERAL	xi
GENERAL ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Justificación	7
1.2 Objetivos.....	8
1.2.1 Objetivo general.....	8
1.2.2 Objetivos particulares	8
1.3 Hipótesis.....	8
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	9
2.1 Producción intensiva de pepino en invernadero	9
2.1.1 Definición y alcance de la producción intensiva de pepino en invernadero.	9
2.1.2 Importancia económica de la producción de pepino	10
2.1.3 Ventajas y desafíos de la agricultura protegida.....	11
2.2 Sistemas hidropónicos en la producción de pepino	13
2.2.1 Descripción de los sistemas hidropónicos y su aplicación en el cultivo de pepino.	13
2.2.2 Beneficios y consideraciones clave al utilizar sistemas hidropónicos.....	14
2.2.3 Días-grado	16
2.3 Manejo de variedades en la producción de pepino.....	16
2.3.1 Importancia de la selección de variedades para la producción óptima de pepino.....	16
2.3.2 Características deseables en variedades de pepino para invernadero.	18

2.4 Densidades de producción en cultivos de pepino	20
2.4.1 Impacto de las densidades de siembra en la producción y calidad del pepino.....	20
2.4.2 Recomendaciones y mejores prácticas para la densidad de plantas en invernaderos.....	22
2.5 Podas y despuntes de plantas de pepino	24
2.5.1 Efectos de la poda en el crecimiento, rendimiento y calidad del pepino. 24	
2.6 Mantenimiento de un índice de área foliar óptimo	25
2.6.1 Importancia del índice de área foliar en la producción de pepino. 25	
2.6.2 Estrategias para mantener un índice de área foliar óptimo en cultivos hidropónicos en invernadero.	26
2.7 Sistemas de producción de pepino en invernadero	28
2.7.1 Ciclos largos y baja densidad.....	28
2.7.2 Ciclos cortos con despunte temprano y alta densidad	29
2.7.3 Ciclos cortos con despunte temprano, alta densidad y tres fases de cultivo (antecedentes con jitomate).	31
2.8 Literatura citada	32
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS ECOFISIOLÓGICO EN VARIEDADES DE PEPINO BAJO UN SISTEMA HIDROPÓNICO DE CULTIVO EN TRES FASES	44
RESUMEN.....	44
ABSTRACT	45
3.1 Introducción	46
3.2 Materiales y métodos.....	50
3.3 Resultados y discusión	53
3.4 Conclusiones	67
3.5 Literatura citada	68

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1. Comparaciones de medias para grosor de tallo medidos a lo largo del ciclo de cultivo en cinco variedades de pepino.....	54
Cuadro 3. 2 Comparaciones de medias para área foliar medidos a lo largo del ciclo de cultivo en cinco variedades de pepino.....	56
Cuadro 3.3. Comparaciones de medias para el índice de área foliar a lo largo del ciclo de cultivo en cinco variedades de pepino.....	58
Cuadro 3.4. Comparaciones de medias para peso seco total de planta, medidos en cinco variedades de pepino.....	60
Cuadro 3.5. Comparaciones de medias para la tasa de asimilación neta en cinco variedades de pepino.	62
Cuadro 3.6. Comparaciones de medias para la tasa de crecimiento del cultivo en cinco variedades de pepino.....	63
Cuadro 3.7. Comparaciones de medias del análisis de varianza de la proyección del rendimiento del cultivo.	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema convencional en dos fases de cultivo: a) fase de semillero (15 a 21 días) y b) fase de producción a una densidad de 1.5 a 3 plantas m⁻² con duración de cinco a seis meses.....	3
Figura 2. Sistema alternativo bajo invernadero en dos fases: a) fase de semillero a 30 días b) fase de reproducción de 60 días con densidad de 6 a 7 plantas m⁻².	4
Figura 3. Sistema de cultivo de pepino en tres fases: a) fase de semillero de 30 días. b) fase de alta densidad de 30 días. c) fase de producción de 30 días.....	6
Figura 4. Volumen de la producción nacional de pepino en los últimos 11 años (SIAP, 2025).....	11
Figura 5. Sistema convencional en dos fases de cultivo: a) Fase de semillero (15 a 21 días) y b) Fase de producción a una densidad de 1.5 a 3 plantas m⁻² con duración de cinco a seis meses.....	47
Figura 6. Sistema alternativo bajo invernadero en dos fases: a) Fase de semillero a 30 días b) Fase de reproducción de 60 días con densidad de 6 a 7 plantas m⁻².....	48
Figura 7. Sistema de cultivo de pepino en tres fases: a) Fase de semillero de 30 días. b) Fase de alta densidad de 30 días. c) Fase de producción de 30 días.....	50
Figura 8. Grosor del tallo, promedio de las cinco variedades de pepino a lo largo del ciclo de cultivo.....	55
Figura 9. Área foliar promedio de las cinco variedades de pepino a lo largo del ciclo de cultivo.....	57

Figura 10. Índice de área foliar promedio de las cinco variedades de pepino a lo largo del ciclo de cultivo.	59
Figura 11. Peso seco total de planta promedio de las cinco variedades de pepino a lo largo del ciclo de cultivo.	61
Figura 12. Tasa de asimilación neta (TAN) promedio de cinco variedades de pepino a lo largo del ciclo de cultivo.	63
Figura 13. Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) promedio de cinco variedades de pepino en intervalos a lo largo del ciclo de cultivo.	64
Figura 14. Rendimiento acumulado de los cinco cortes de frutos por m² de invernadero en cinco variedades de pepino.	67

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi familia, quienes son mi motor y mi inspiración.

A mis padres Verónica Urbina y Martín Moral, que son mi motivación para empezar y culminar nuevos proyectos, con su apoyo, cobijo y su confianza en mí, hoy esto es posible ¡SÍ SE PUDO!

A mis segundos padres, Edgar Urbina y Carmen Gutiérrez, que no dimensionan lo eternamente agradecida que estoy con ustedes. La distancia durante esta etapa se ve reflejada en la culminación de este proyecto.



A mi hermano Martincito, que hace mi vida más amena con sus ocurrencias y su existencia. A Xtabay Urbina que es mi confidente y mi cómplice.

A mis amigos, Gio, Alma, Yaret, Dani y Angie que estuvieron conmigo en este proceso, escuchándome y haciendo más ligera esta etapa.

¡Y a la vida, que cada día me enseña cosas nuevas, me pone nuevos retos y me muestra que los límites los pongo yo... y la verdad, no me gusta limitarme!

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnologías (CONAHCYT) por brindarme una beca para poder realizar mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo por permitirme realizar mis estudios en sus instalaciones, por brindarme todo su apoyo para hacer posible la presente tesis y por su calidez y cobijo con sus alumnos.

Al Dr. Felipe Sánchez del Castillo por todo su conocimiento compartido, por su dirección, paciencia y tiempo para la elaboración de esta tesis. Por su compromiso con mi formación académica y profesional, por ser una fuente constante de inspiración, pues más allá de su excelencia como investigador y docente, tiene una gran calidad humana. ¡Gracias!

Al Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez por su tiempo para la revisión y colaboración de la presente tesis y por su amabilidad y confianza para resolver cualquier duda que surgía.

Al Dr. Natanael Magaña Lira por su experiencia profesional, por su apoyo durante los análisis estadísticos, por su acompañamiento, su gran conocimiento y por su atinada colaboración.

Al laboratorio de Ecología en el departamento de Fitotecnia por permitirme analizar las muestras del material vegetal.

Al M. en C. César Daniel Ibarra Meléndez por su infinito apoyo durante este proceso, infinitas gracias.

A la coordinación de Posgrado del Instituto de Horticultura de la UACH por el acompañamiento en todos los procesos para lograr la culminación de mis estudios de posgrado.

A mis profesores por todo su conocimiento compartido y por enriquecer mi formación profesional.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre completo: Wendy Moral Urbina
Fecha de nacimiento: 04 de marzo de 1994
Lugar de nacimiento: Iztapalapa, CDMX. México
CURP: MOUW940304MDFRRN03
Profesión: Bióloga
Cédula profesional: 11849808



Desarrollo académico

Bachillerato Escuela Nacional Preparatoria N° 1 “Gabino Barreda” (UNAM)
Licenciatura Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)
Posgrado Maestría en Ciencias en Horticultura. Instituto de Horticultura, Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México, México.

RESUMEN GENERAL

ANÁLISIS ECOFISIOLÓGICO EN VARIEDADES DE PEPINO BAJO UN SISTEMA HIDROPÓNICO DE CULTIVO EN TRES FASES

Se trabajó en la implementación de un innovador sistema intensivo de cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en hidroponía bajo invernadero, con la finalidad de maximizar su producción anual. Se buscó acortar cada ciclo de producción a un máximo de 40 días mediante el despunte de las plantas a 1.2 m de altura y un manejo especial en tres fases de cultivo: semillero, fase intermedia de alta densidad de población (17 plantas m⁻²) y fase final de producción (7 plantas m⁻²). El objetivo particular de este trabajo fue evaluar el comportamiento morfológico, ecofisiológico y agronómico de cinco variedades de pepino tipo americano partenocárpico para escoger la de mejor desempeño en rendimiento para este sistema de producción. El diseño experimental fue bloques completos al azar con cinco tratamientos correspondientes a las variedades evaluadas ('Coatzin', 'Centauro', 'Altaria', 'Anaconda' y 'Swayne'), cuatro repeticiones y 20 plantas por unidad experimental. Al final de la fase intermedia (54 días después de la siembra), a pesar del despunte a 1.2 m de altura, el índice de área foliar (IAF) promedio era de 7, por lo que se reubicaron las plantas en su fase final de producción bajando la densidad de población a 7 plantas m⁻² y el IAF a aproximadamente 3 hasta el final del ciclo de cultivo, que duró 34 días más. El mayor rendimiento de fruto lo tuvo 'Coatzin' con 9.8 kg m⁻² en un ciclo de cultivo que ocupó el invernadero de producción final sólo 34 días, lo que posibilita lograr hasta 10 ciclos de cultivo al año con un rendimiento potencial anual de casi 100 kg m⁻².

Palabras clave: *Cucumis sativus* L., agricultura protegida, sistemas de producción, densidad de población, productividad.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: Wendy Moral-Urbina.

Director de tesis: Dr. Felipe Sánchez Del Castillo.

GENERAL ABSTRACT

Ecophysiological Analysis in Cucumber Varieties Under a Three-Phase Hydroponic Cultivation System

An innovative intensive cucumber (*Cucumis sativus* L.) cultivation system in hydroponics under greenhouse conditions was implemented, with the aim of maximizing annual production. The goal is to shorten each production cycle to a maximum of 40 days by blunting off the plants at 1.2 m in height and a special management in three cultivation phases: seedbed, intermediate phase of high population density (17 plants m⁻²) and final production phase (7 plants m⁻²). The particular objective of this work was to evaluate the morphological, ecophysiological and agronomic behavior of five varieties of American parthenocarpic cucumber to choose the best performing one in yield for this production system. The experimental design was a randomized complete blocks with five treatments corresponding to the varieties evaluated ('Coatzin', 'Centauro', 'Altaria', 'Anaconda' and 'Swayne'), four replications and 20 plants per experimental unit. At the end of the intermediate phase (54 days after sowing), despite the plants blunting off at 1.2 m in height, the average leaf area index (LAI) was 7, so the plants were relocated in their final production phase, lowering the population density to 7 plants m⁻² and LAI to approximately 3 until the end of the crop cycle, which lasted 34 more days. The highest fruit yield was obtained by 'Coatzin' with 9.8 kg m⁻² in a growing cycle that occupied the final production greenhouse for only 34 days, which makes it possible to achieve up to 10 crop cycles per year with a potential annual yield of almost 100 kg m⁻².

Keywords: *Cucumis sativus* L., protected agriculture, production systems, population density, productivity.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La agricultura protegida basada en el uso de invernaderos y sistemas hidropónicos para la producción de cultivos, por el alto grado de control que logra sobre factores climáticos, edáficos y bióticos, ofrece mayor rendimiento, reducción de riesgos en el cultivo e incremento de la rentabilidad económica para pequeños productores (Sánchez & Moreno, 2017a). La implementación de estas tecnologías en especies de alto rendimiento y valor económico en el mercado permite ingresos para una vida digna de los productores involucrados, además generan un impacto positivo en el empleo local (10 a 15 puestos de trabajo de tiempo completo por hectárea), lo que contribuye al desarrollo económico regional (Pratt & Ortega, 2019).

La agricultura protegida en México ha tenido un crecimiento explosivo en los últimos años, llegando en 2022 a un total de 107,220 infraestructuras, que equivalen a 86,777.55 hectáreas entre invernaderos, casas-sombras y macrotúneles (SIAP, 2023).

La producción bajo invernadero, al minimizar las restricciones y efectos que imponen los fenómenos climáticos permite el desarrollo de cultivos agrícolas fuera de su ciclo natural y en menor tiempo, se enfrenta con éxito a plagas y enfermedades, con mejores rendimientos en menor espacio, sanos y con un mejor precio en los mercados, generando, evidentemente, un mejor ingreso para los productores (FAO-SAGARPA, 2007).

Si, además, en los invernaderos se produce con tecnologías como los sistemas hidropónicos, se logra un alto grado de control sobre otras variables relevantes para el óptimo desarrollo del cultivo, como son: nutrición mineral, oxigenación de la raíz, conductividad eléctrica, pH, etc. (Ponce et al., 2015).

La combinación de invernaderos, que permiten un control preciso del clima, e hidroponía, que optimiza las condiciones para el desarrollo radicular, representa la tecnología agrícola más avanzada e intensiva que existe a nivel comercial.

Estos sistemas de producción pueden aumentar los rendimientos hasta en un 1000 % en comparación con los cultivos convencionales en suelo a cielo abierto. Además, ofrecen productos de mayor calidad, inocuidad y seguridad, al tiempo que minimizan el riesgo de pérdidas por eventos climáticos, plagas o enfermedades (Sánchez & Moreno, 2017a; Chen et al., 2020).

En 2023, México se posicionó como el 5° productor y 3° exportador de pepino a nivel mundial. En 4,651 hectáreas de invernaderos, casas sombra y macrotúneles se produjeron 519,034 toneladas, con un valor de la producción de 4,845 millones de pesos, lo que representa un rendimiento promedio de 111.59 toneladas por hectárea. Por otro lado, la producción nacional de pepino a cielo abierto se extendió por 14,837 hectáreas, con una producción total de 517,682 toneladas y un valor de la producción de 4,044 millones de pesos, con un rendimiento promedio de 35.63 toneladas por hectárea (SIAP, 2025).

En los últimos 10 años la exportación de pepino se ha estado condicionando cada vez más a su producción en invernaderos o casas sombra. Esta restricción obedece a la necesidad de garantizar la sanidad y calidad del producto, satisfaciendo las exigencias de los consumidores finales (AMHPAC, 2018).

El sistema de producción de pepino predominante en los invernaderos o casas sombra en México ha sido importado del Norte de Europa y se caracteriza por el uso de densidades de población de 1.5 a 3 plantas m^{-2} . El cultivo se da en dos fases bien diferenciadas: una de semillero que dura de 15 a 21 días y otra que comprende desde el trasplante hasta el final de la cosecha (Figura 1). Después del trasplante, las plantas crecen apoyadas por tutores en el invernadero hasta superar los 3 metros de altura en ciclos de cultivo que duran cinco a seis meses desde el trasplante a cosecha. Con invernaderos de alta tecnología, o incluso de mediana tecnología, en localidades con condiciones óptimas de clima, se pueden obtener dos ciclos de cultivo al año con rendimiento aproximado de 400 toneladas por hectárea anuales (Zamora, 2017; New South Wales Government, 2019; Chen et al., 2020).

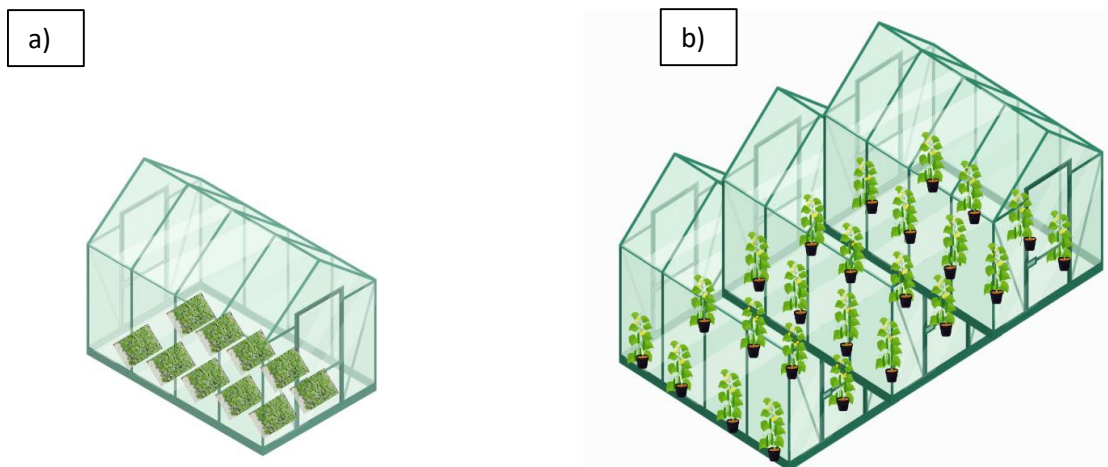


Figura 1. Sistema convencional en dos fases de cultivo: a) fase de semillero (15 a 21 días) y b) fase de producción a una densidad de 1.5 a 3 plantas m⁻² con duración de cinco a seis meses.

Investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo han desarrollado, un sistema alternativo de producción de pepino en hidroponía bajo invernadero. En este sistema se extiende la fase de semillero hasta 30 días y la de trasplante a fin de cosecha se hace durar sólo 60 días (Figura 2) limitando el crecimiento de las plantas a una altura de 1 a 1.2 metros mediante la práctica del despunte (eliminación de la yema terminal). Sólo se cosechan entre 6 a 8 frutos por planta. Sin embargo, debido a que cada planta tiene menos follaje, es posible aumentar la densidad de población entre 6 y 7 plantas m⁻², lo que ayuda a mantener un rendimiento similar por unidad de superficie respecto al sistema convencional, pero acortando el periodo de trasplante a fin de cosecha, de 5 meses a sólo 60 días, por lo que potencialmente se pueden obtener seis ciclos de cultivo por año, lo que aumenta considerablemente la productividad y el beneficio económico anual en comparación con el sistema convencional (Villegas, 1999; Camarena, 2002; Sánchez et al., 2006; Ortiz, et al., 2009; Flores, 2013; Sánchez et al., 2014c).

a)



b)

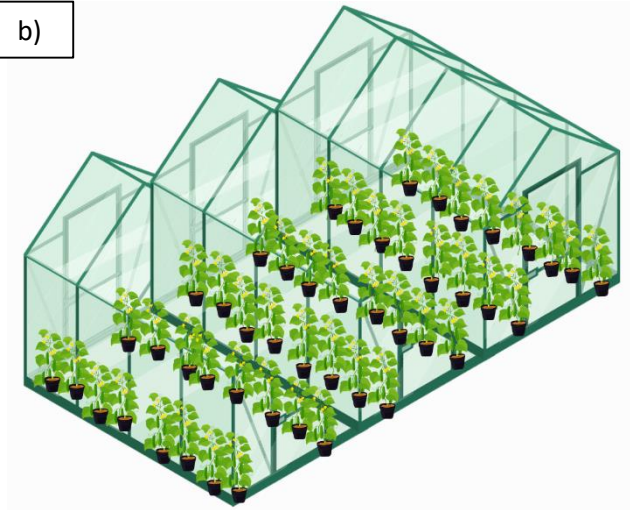


Figura 2. Sistema alternativo bajo invernadero en dos fases: a) fase de semillero a 30 días b) fase de reproducción de 60 días con densidad de 6 a 7 plantas m^{-2} .

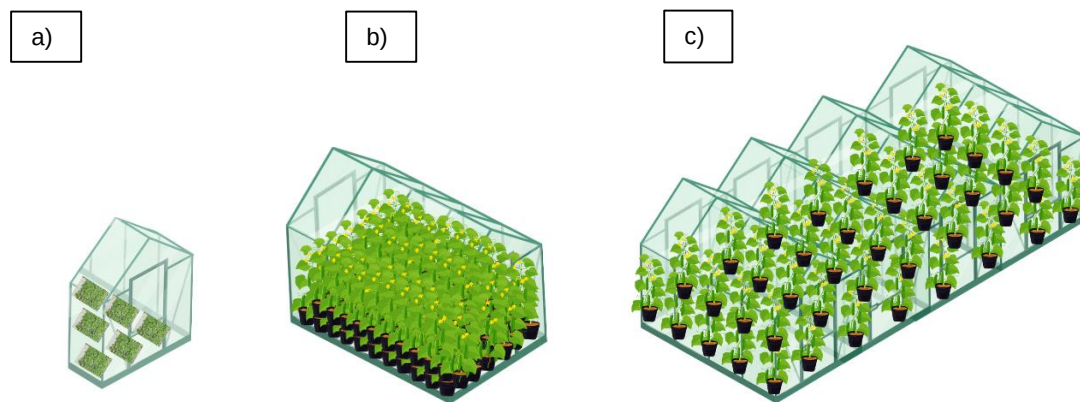
Si bien este sistema de trasplante tardío, alta densidad y despunte temprano en dos fases de cultivo ha demostrado ser exitoso en comparación con el sistema convencional debido a que se hizo posible la reducción de la fase de producción a 60 días, surge la interrogante de si todavía es posible acortar más esta fase final de producción y lograr así ciclos al año y, en consecuencia, incrementar la productividad anual.

Sin embargo, retrasar el trasplante de las plántulas a edades mayores a 30 días, para acortar más la fase de trasplante a fin de cosecha, no parece viable desde un punto de vista práctico. Se necesitan contenedores de mucho volumen para su mantenimiento en el semillero, lo que implica el uso de gran cantidad de sustrato en las siembras para lograr un adecuado desarrollo radicular, además de cuidados especiales para evitar deshidratación del follaje o daños al tallo durante el trasplante. Tampoco sería beneficioso despuntar las plantas a una altura menor, ya que se reduciría el número de frutos por planta y, por lo tanto, el rendimiento por ciclo, o bien para compensar el menor rendimiento por planta, se tendría que aumentar la densidad lo que implicaría fuertes gastos en semilla, en sustrato para siembra, en más charolas para el crecimiento de las plántulas y en más bolsas o macetas y sustrato para crecer las plantas después del trasplante.

La densidad de población ideal para maximizar la producción diaria de materia seca en un cultivo de pepino se determina buscando establecer y mantener un IAF entre 3 y 4 (Gao et al., 2013). No obstante, este valor no se alcanza hasta varios días después del trasplante debido al crecimiento gradual del follaje. Sin embargo, podría alcanzarse y mantenerse un IAF constante entre 3 y 4 a lo largo de casi todo el ciclo si las plántulas se trasplantaran a contenedores móviles (bolsas o macetas) a densidades de población relativamente altas en un espacio adicional de invernadero, para después de un tiempo determinado, reubicar dichos contenedores con sus plantas a distancias que permitan la densidad adecuada para mantener ese IAF hasta el final del ciclo. Esto acortaría aún más la fase de producción permitiendo potencialmente más ciclos por año.

Por ejemplo, el sistema de producción de seis ciclos de cultivo por año en dos fases se basa en una fase de semillero de 30 días y una fase de trasplante a fin cosecha de 60 días. Si se dispusiera de un espacio adicional en invernadero (no mayor al 30 % del área final de producción), después del trasplante se podría implementar una fase intermedia de manejo del cultivo en alta densidad (17 plantas m^{-2}) de unos 30 días de duración. Luego, las plantas se reubicarían, con sus mismos contenedores (bolsas o macetas), a su densidad final (6 a 7 plantas m^{-2}) en otro invernadero para una fase final de producción de solo 30 días. Esto permitiría alcanzar potencialmente hasta 12 ciclos de cultivo por año (Figura 3).

Los resultados de investigaciones sobre un sistema similar de producción de jitomate en tres fases de cultivo (Silva, 2021; Martínez, 2022; Villafuerte, 2022) y estudios previos con el cultivo de pepino (Ortiz et al., 2009; Sánchez et al., 2014c) sugieren que efectivamente es posible aumentar la productividad anual de pepino en invernadero mediante un sistema de producción en tres fases (semillero, alta densidad y producción final) con el que se podrían obtener potencialmente más de 10 ciclos de cultivo por año, con rendimientos anuales que podrían superar los 100 kg m^2 de superficie cubierta por año (1000 t ha^{-1}) y con un beneficio económico muy alto por unidad de superficie para los pequeños y medianos productores que lo utilizaran, aún vendiendo su producto en mercados locales.



12 ciclos de cultivo al año

Figura 3. Sistema de cultivo de pepino en tres fases: a) fase de semillero de 30 días. b) fase de alta densidad de 30 días. c) fase de producción de 30 días.

Un primer paso hacia la implementación de este sistema de producción de pepino consiste en evaluar el comportamiento ecofisiológico, morfológico y de rendimiento de diferentes variedades, a fin de seleccionar las más idóneas y ajustar posteriormente los tiempos de duración de cada fase, las densidades de población más adecuadas para mantener un IAF óptimo y otros aspectos del cultivo.

La producción de pepino en invernadero es muy dinámica, continuamente están apareciendo nuevas variedades, recientemente se han incorporado cultivares de tipo partenocárpico con alta calidad de fruto y con un potencial de muy alto rendimiento por unidad de superficie. Se plantea como muy importante manejarlas y evaluar su comportamiento bajo las restricciones que impone este sistema de producción de tres fases.

A pesar del conocimiento que ya se tiene sobre el manejo de las fases inicial y final del sistema, la fase intermedia de alta densidad ($17 \text{ plantas m}^{-2}$) por su novedad, presenta un desafío. La alta densidad puede generar estrés en las plantas por el sombreado mutuo debido al paulatino incremento del IAF del dosel,

especialmente al final de la fase, antes de su reubicación a la densidad final de 7 plantas m⁻². Este estrés podría afectar negativamente su comportamiento fisiológico (Ortiz et al., 2009). Por ello, es necesario estudiar esta fase desde una perspectiva fisiotécnica comparando el desempeño de distintas variedades híbridas y coadyuvando a definir estrategias que mitiguen el estrés y optimicen el rendimiento anual por unidad de superficie.

1.1 Justificación

La inclusión de esta etapa intermedia dentro del paquete tecnológico de producción de pepino con despunte temprano es una innovación que tiene como objetivo optimizar el manejo del espacio y del tiempo en el invernadero, lo cual hace posible obtener más de 10 ciclos de cultivo por año. Esto promete el doble de rendimiento anual por unidad de superficie y una muy importante reducción en los costos de producción por tonelada, lo que potencialmente se traduce en más del triple de rentabilidad económica anual para los pequeños productores que adopten este sistema respecto al sistema convencional de producción en invernadero. Además, el estudio de diversas variedades de pepino brinda información de los híbridos comerciales que mejor se adapten a este sistema de cultivo en tres fases en aspectos morfológicos, fisiológicos y de rendimiento.

El rendimiento anual por unidad de superficie que este sistema de producción pudiera dar como potencial, si mediante la investigación que se desarrolle con este proyecto se vencen o mitigan los posibles problemas relacionados con la alta densidad de población a la que las plantas serán sometidas temporalmente en la fase intermedia de cultivo, se ubica por encima de lo reportado a nivel mundial con invernaderos de alta tecnología para el sistema convencional de producción de pepino.

Adicionalmente, de tener éxito el sistema de producción, puede redundar en un beneficio económico muy importante para pequeños o medianos productores en invernadero debido a un mayor rendimiento, pero manteniendo un costo similar por kilogramo producido. Por último, pero no menos importante, Se trata de una

tecnología innovadora muy intensiva basada en la ocupación de mano de obra no calificada, por lo que se genera mucho empleo bien remunerado (8 a 10 personas de tiempo completo por hectárea) contribuyendo a facilitar estrategias de desarrollo regional.

Con la implementación de esta línea de investigación, se propone continuar con investigación aplicada interdisciplinaria enfocada a desarrollar un paquete tecnológico, de tal manera que se logre optimizar el sistema de producción propuesto en beneficio de los pequeños y medianos productores en invernadero del país.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Comparar experimentalmente parámetros morfológicos, ecofisiológicos y de rendimiento de cinco híbridos comerciales de pepinos partenocárpicos ('Altaria', 'Anaconda', 'Coatzin', 'Centauro' y 'Swayne') bajo un sistema de producción hidropónico basado en tres fases de cultivo, despunte de las plantas a 1.2 m de altura tempranos y altas densidades de población, a fin de identificar la variedad con mejor desempeño agronómico y adaptación al sistema mencionado.

1.2.2 Objetivos particulares

- Seleccionar la variedad de pepino con el mejor desempeño agronómico y ecofisiológico para su implementación en experimentos futuros, orientados al desarrollo del sistema de producción de tres fases.
- Definir si la duración de cada fase es la más adecuada para mantener un índice de área foliar que optimice la producción en un ciclo de cultivo.

1.3 Hipótesis

La implementación de un sistema de producción de pepino en tres fases de cultivo con despunte de las plantas a 1.2 m de altura usando altas densidades de

población optimizará el uso del espacio y del tiempo en el invernadero, lo que hará posible obtener más de 10 ciclos de cultivo por año.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Producción intensiva de pepino en invernadero

2.1.1 Definición y alcance de la producción intensiva de pepino en invernadero.

La agricultura protegida (AP) es un sistema de producción que se lleva a cabo bajo diversas estructuras. En México, la superficie destinada a este tipo de agricultura ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas. Aunque la industria de los invernaderos nació y se desarrolló en Europa, a principios de los años ochenta empezó a expandirse en América, especialmente en Canadá y algunas regiones de Estados Unidos. En México, si bien su desarrollo inició en el altiplano durante los años setenta con cultivos de flores (principalmente en el Estado de México y Morelos), fue a finales de los años noventa cuando la producción intensiva de hortalizas bajo agricultura protegida comenzó a consolidarse de manera más notable (López-Elías et al., 2015).

De la información obtenida en el II Simposio Internacional de Invernaderos (2008), de 8,834 ha con agricultura protegida, el 49 % eran de invernaderos tecnificados y de mediana tecnificación y el 51 % de malla sombra (Moreno et al., 2011). En 2013, de las 20,000 hectáreas de agricultura protegida en México, 12,000 ha eran invernaderos, el 79 % de los sistemas agrícolas protegidos eran de media-alta tecnología, el 17 % de tecnología media y un 4 % con baja tecnología (Ponce, 2013).

En 2022, la agricultura protegida creció a un total de 86,777.55 hectáreas. Michoacán, Jalisco y Sinaloa representan el 47 % del total de la superficie de agricultura protegida en México. En los últimos cinco años la agricultura protegida del estado de Michoacán ha crecido casi un 300 %, con una superficie total de

16,841 hectáreas. Por tercer año consecutivo, Michoacán ocupa el primer lugar en superficie destinada a la agricultura protegida, concentrando casi el 20 % del total nacional. Entre los principales cultivos de la agricultura protegida en México destacan el tomate rojo, el chile verde, las berries (arándano, fresa, frambuesa, zarzamora y grosella), el pimiento y el pepino (SIAP, 2023).

2.1.2 Importancia económica de la producción de pepino

México destaca como el quinto productor y segundo exportador mundial de pepino, pues aprovecha su potencial productivo para generar cosechas durante todo el año, principalmente en el primer semestre, lo que le permite abastecer por completo al mercado interno, además de generar excedentes importantes para exportación. México se encuentra dentro de las cinco principales naciones productoras del orbe, superando a países como Uzbekistán, España y Estados Unidos con 1,028,568 toneladas en 2022, 1 % menos de la producción del año 2021 (Figura 4). De las entidades federativas del país, Sinaloa es preponderante en la producción de pepino. La derrama económica por la venta de las 308 mil 487 toneladas obtenidas en 2022 fue de dos mil 57 millones de pesos y representa el 26.1% del valor total nacional, seguido de Sonora (16.3%) y de Michoacán (9.9%). Los cinco países que adquirieron más pepino mexicano en 2022 fueron Estados Unidos, Canadá, Costa Rica, Guatemala y Emiratos Árabes. EE.UU. demandó las cantidades más sustantivas (489,210,886 dólares) (SIAP, 2023).

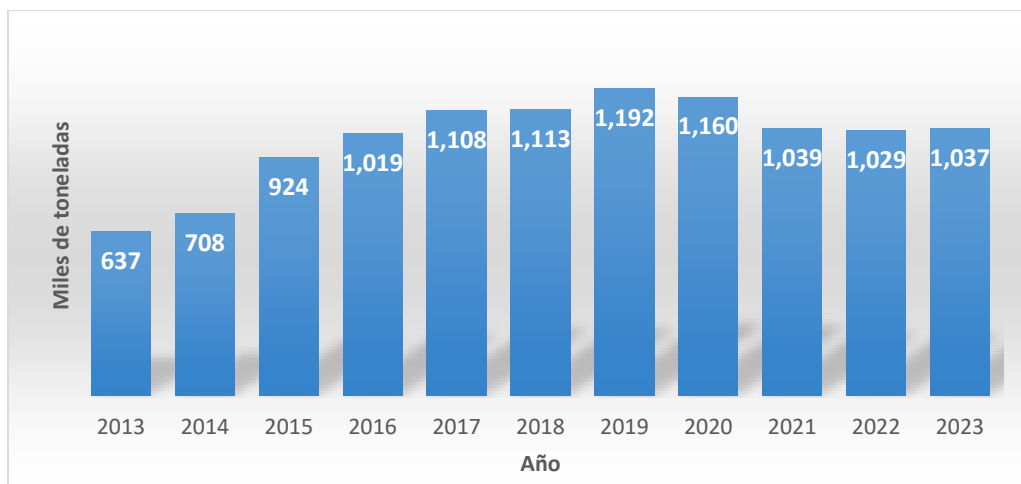


Figura 4. Volumen de la producción nacional de pepino en los últimos 11 años (SIAP, 2025).

2.1.3 Ventajas y desafíos de la agricultura protegida.

La agricultura protegida en invernaderos ha modificado las formas de producir alimentos y genera múltiples ventajas para los productores, por ejemplo, permite el desarrollo de cultivos agrícolas fuera de su ciclo natural y en menor tiempo, se enfrenta con éxito a plagas y enfermedades, con mejores rendimientos en menor espacio, sanos y con un mejor precio en los mercados, generando un mejor ingreso para los productores (FAO-SAGARPA, 2007).

El objetivo de la agricultura intensiva es producir al máximo utilizando la menor cantidad de superficie posible, por lo que hoy en día se utilizan muchas técnicas para acelerar la producción, un ejemplo de este tipo de producción es el cultivo en invernadero. Se pretende obtener los mayores rendimientos aislándolo de las condiciones naturales, controlando el cultivo mediante técnicas de climatización (calefacción, humidificación, iluminación, etc.) y técnicas culturales (fertirrigación, sustratos, etcétera) para rentabilizar al máximo el uso del suelo. Esta rentabilidad supone un mejor uso de los recursos naturales, el agua y el suelo (Antón, 2004).

La implementación de la producción hortícola en invernaderos disminuye el riesgo en la producción e incrementa la rentabilidad del sector productivo;

además de que genera fuente de trabajo, disminuye la contaminación ambiental y los daños a la salud (Grijalva & Robles, 2003).

Bajo condiciones de invernadero, la producción de pepino es de dos a nueve veces más que en campo abierto, dependiendo del nivel tecnológico, el manejo y las condiciones climatológicas (FUMIAF, 2005; SIAP, 2013) al minimizar las restricciones y efectos que imponen los fenómenos climáticos. La agricultura, por su naturaleza, se encuentra asociada al riesgo, de ahí que este sistema tenga como característica básica la protección contra los riesgos inherentes a esta actividad (Moreno et al., 2011).

Los invernaderos están transformando la agricultura y maximizando el potencial de nuestros cultivos, pues se utilizan para una amplia variedad de cultivos que van desde hortalizas hasta hierbas, especias y árboles. Los desafíos pueden ser climatológicos, económicos (rentabilidad, mercado) o de limitaciones de recursos productivos (agua o de superficie) (Moreno et al., 2011). De acuerdo con Gommès (1998), la vulnerabilidad o el grado al que un sistema es susceptible de enfrentarse a los efectos negativos del cambio climático está en función del carácter, magnitud y rapidez de dicho cambio y de la variación a la que un sistema está expuesto.

Estudios han puesto de relieve el impacto a humanos, de los residuos generados en los sistemas de producción de invernaderos, los más destacados son plásticos (PVC, PVDC), materia orgánica y agroquímicos (pesticidas DDT y Lindano), los disolventes (percloroetileno, tetrácloruro de carbono) y los refrigerantes (CFC, HCFC). También se destaca la contaminación de la atmósfera, los acuíferos, el riesgo de incendios y la pérdida de calidad de vida de los ciudadanos por la transmisión de enfermedades, olores y descomposición orgánica (Moreno et al., 2011) lo cual implica un verdadero reto a mejorar.

La vulnerabilidad de los sistemas agropecuarios ante el mercado, es igualmente perniciosa, se afirma incluso que es este el que destruye y no tanto las contingencias climatológicas (Nelson, 1990). Es pues necesario encontrar un

buen mercado para asegurar la venta de la producción, además, se debe cumplir con una serie de características para satisfacer a los consumidores y que éstos paguen el valor justo de la cosecha.

De los principales desafíos a los que se enfrentan los productores en invernaderos son los elevados costos de la infraestructura inicial y del mantenimiento de la misma (Moreno et al., 2011).

2.2 Sistemas hidropónicos en la producción de pepino

2.2.1 Descripción de los sistemas hidropónicos y su aplicación en el cultivo de pepino.

La hidroponía deriva de las palabras griegas Hydro = Agua y Ponos = Labor o trabajo y traducido literalmente significa “trabajo en agua”. Constituye una técnica de producción de cultivos en la cual no se requiere del uso del suelo (Urrestarazu, 2000; Beltrano & Gimenez, 2015), el cual es reemplazado por agua con los nutrientes minerales esenciales disueltos en ella, a la cual se le denomina solución nutritiva. Cuando se utiliza un sustrato sólido (arena, grava, vermiculita, lana de roca, perlita, turba, fibra de coco, aserrín, etc.), algunos autores utilizan el término cultivo sin suelo en vez de hidroponía (Jensen, 1997).

La formulación y supervisión de la solución nutritiva, junto a una adecuada elección de las fuentes minerales solubles, constituyen una de las bases para el éxito del cultivo hidropónico (López, 2018). la solución nutritiva es quizá la parte más importante de toda técnica hidropónica.

La hidroponía se ha extendido en el mundo entero, desarrollándose en numerosos países, en los cuales compañías transnacionales la utilizan para producir de manera intensiva (López, 2018). Actualmente, la producción de vegetales en sistemas hidropónicos es muy utilizada en países con problemas de invierno riguroso, limitaciones de área y escasez hídrica. Los sistemas típicos de hidroponía se caracterizan por la demanda de equipos eléctricos utilizados en la aireación o circulación de la solución nutritiva. Además, presentan un alto

mantenimiento de la solución nutritiva, mayores costos de inversión y alto conocimiento técnico (Prieto & Clemente, 2011).

En México, el cultivo hidropónico de hortalizas bajo invernadero está cobrando auge (Montoya & Brindis, 2001) y, en particular, la producción de pepino en invernadero ha aumentado debido a la introducción de cultivares de plantas ginoicas con pepinos partenocárpicos, que son muy adecuados para la producción en invernaderos y debido al ambiente controlado, puede realizarse durante todo el año (Crosby, 2008).

En 2006 se cultivaban unas 4,000 ha de hortalizas en hidroponía. El jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), melón (*Cucumis melo* L.), sandía (*Citrullus vulgaris* Schard), pimiento (*Capsicum annuum* L.) y el pepino (*Cucumis sativus* L.) son las especies hortícolas más cultivadas en este sistema por su alta rentabilidad a pesar de sus altos costos de producción (Sánchez et al., 2006).

Los pepinos hidropónicos se cultivan tradicionalmente en medios estériles como perlita o lana de roca (Shaw et al., 2000; Papadopoulos et al., 2006; Heuvelink & Korner, 2001). Las plantas de pepino son tutoradas individualmente en un cordel colgado de un cable atado por encima de cada plantación y sin los brotes laterales (Shaw et al., 2000; Shetty & Wehner, 1998). Un intervalo de temperatura de 24 °C a 26 °C durante el día y 18 °C por la noche es óptimo. Pueden producirse daños por frío si las temperaturas caen por debajo de 12 °C (Chung et al., 2003).

2.2.2 Beneficios y consideraciones clave al utilizar sistemas hidropónicos.

La producción de hortalizas en hidroponía presenta ciertas ventajas como un mayor rendimiento por área, mejora en la calidad nutricional de los productos, disminución de daños por plagas y enfermedades, reducción del ciclo del cultivo, condiciones ambientales controladas, mayor sanidad e inocuidad (Cánovas & Magán, 2003; Prieto & Clemente, 2011), también se evita el uso de maquinaria

agrícola (tractores, rastras, etcétera), hay más limpieza e higiene en el manejo del cultivo, mayor precocidad de los cultivos y la posibilidad de cosechar repetidamente la misma especie de planta al año (Beltrano & Gimenez, 2015). Los rendimientos por unidad de área cultivada son mayores con respecto a la agricultura tradicional, dada la mayor densidad de plantación y la elevada producción por unidad de superficie, obteniéndose mayor número de cosechas al año (López, 2018).

Con el objetivo de minimizar el impacto negativo al ambiente (Giuffrida & Leonardi, 2009; Nakano et al., 2010; Massa et al., 2010), esta forma de producción es óptima, pues asegura un uso más eficiente del agua y los fertilizantes (Sánchez & Moreno, 2017b) que, debido a su encarecimiento, la hidroponía también contribuye a incrementar la rentabilidad económica. Por lo anterior, los sistemas hidropónicos abiertos (sin recirculación de la solución nutritiva) empiezan a ser reemplazados por los sistemas cerrados (con recirculación de la solución nutritiva) (Alarcón, 2006). Estos últimos presentan ventajas importantes respecto a los primeros como ahorro de agua y fertilizantes y menor impacto ambiental al evitar que grandes cantidades de minerales contaminen ríos, lagos, mantos freáticos y mares (Giuffrida & Leonardi, 2009; Pardossi et al., 2009; Nakano et al., 2010; Massa et al., 2010).

Con el invernadero se logra el control de los requerimientos de las plantas en cuanto a los factores climáticos, mientras que los sistemas hidropónicos se diseñan con el objetivo de poner a la raíz en las condiciones ambientales más adecuadas para su óptimo funcionamiento. La conjunción de ambas tecnologías representa la agricultura comercial más avanzada con la que se cuenta en la actualidad a nivel mundial (Sánchez & Moreno, 2017a).

Para que plantas de cultivo como jitomates, pepino, y lechugas crezcan sin limitaciones nutricionales, la solución nutritiva debe tener un pH entre 5.5 a 6.5, una conductividad eléctrica (CE) entre 1.5 y 3 dS m⁻¹, y los nutrimentos minerales deben estar disociados en forma iónica en las proporciones y concentraciones

adecuadas según sus tasas de absorción y en condiciones que eviten precipitados y antagonismos (Adams, 2004).

2.2.3 Días-grado

La temperatura, el fotoperiodo (Porter & Delecolle, 1988; Fischer, 1983) y en ocasiones la vernalización son los factores climáticos que tienen mayor influencia en el crecimiento de los cultivos (Fischer, 1983).

La duración de un ciclo de cultivo en días o de una etapa fenológica o fase de crecimiento, en el caso del pepino (que es un cultivo termosensible), depende fuertemente de la temperatura media (Tewari & Singh, 1993). Dentro de ciertos límites, a mayor temperatura promedio menor la duración del ciclo de cultivo y de cada una de sus fases (Hoyos et al., 2012).

Los días grado de desarrollo (GDD por *Growing Degree Days*), o las unidades térmicas (HU por *Heat Units*), son los índices más comúnmente utilizados para estimar el desarrollo de las plantas (Qadir et al., 2007) y son una herramienta que permite predecir el tiempo (en días) que tarda el cultivo en cumplir cada etapa fenológica o fase de cultivo y puede ser usado con fines de planeación de las fechas de siembra, trasplante y reubicación de las plantas de pepino en los diferentes ciclos de producción que se pueden realizar en un año (Perry et al., 1986; Qadir et al., 2007).

2.3 Manejo de variedades en la producción de pepino

2.3.1 Importancia de la selección de variedades para la producción óptima de pepino.

La selección de variedades y el fitomejoramiento son aspectos muy importantes para optimizar el rendimiento del cultivo y calidad del fruto y, a su vez, el rendimiento es una característica cuantitativa compleja, controlada por una gran cantidad de genes e influenciada significativamente por las diferentes variables

del entorno. Por ende, el mejoramiento del rendimiento debe llevarse a cabo a través de la selección de componentes de rendimiento (Ene et al., 2016; Kumar et al., 2011).

Es importante que, a la hora de elegir la variedad a cultivar, se tome en cuenta la adaptabilidad al clima y a las condiciones locales para garantizar un crecimiento vigoroso y resistencia a condiciones climáticas adversas. A su vez, es importante elegir variedades resistentes a plagas y agentes patógenos causantes de enfermedades para disminuir el uso de pesticidas o tratamientos fitosanitarios y con ello disminuir los costos y el impacto ambiental.

La elección adecuada de una variedad es crucial debido al impacto que tiene sobre el rendimiento, el cual puede variar significativamente con respecto a la calidad y cantidad de frutos producidos. En algunos casos se priorizan características específicas del fruto como el sabor, el color, el tamaño o la forma, mientras que, en otros, es más importante obtener un mayor rendimiento por planta, por lo que elegir la mejor variedad para cada caso, es fundamental.

Para una producción más sostenible también es de gran importancia elegir bien la variedad a cultivar, pues algunas variedades son más eficientes que otras en el uso de los recursos como el agua y los nutrientes, por lo que se vuelve de vital importancia (Altieri, 1997), sobre todo en sistemas de producción intensiva o en regiones con limitaciones hídricas.

Para poder llevar a cabo la planificación del cultivo, es de gran ayuda conocer si la variedad a elegir es de ciclo corto o largo y así tener la posibilidad de realizar varias cosechas al año. También es necesaria la compatibilidad con sistemas de manejo intensivo pues en un sistema como el que se propone en la presente tesis, se requiere de variedades que mantengan un índice de área foliar adecuado para evitar el autosombreo y maximizar la eficiencia fotosintética, bien adaptadas a las altas densidades y con ciclos cortos de producción.

2.3.2 Características deseables en variedades de pepino para invernadero.

Existen una gran cantidad de cultivares de pepino en el mercado, con diferente tamaño, forma y coloración de los frutos, textura de la cáscara, sabor, y características vegetativas (Crosby, 2008). Una de las clasificaciones utiliza como criterio el origen, como es el caso de los tipos holandés y francés (también llamados europeos), y el tipo asiático. Otro criterio de clasificación es el tamaño del fruto: largo (tipo holandés), mediano (tipo americano o “slicer”, y francés), y pequeño (tipo Beit Alpha, mini, o pepinillo) (Cruz-Coronado et al., 2020). Algunos autores los dividen en dos clases dependiendo de la forma de consumo: los pepinos para rebanar y los pepinos para encurtir (USDA, 2000).

Los pepinos de tipo holandés / europeo son delgados y sin espinas, miden de 30 a 36 cm de largo y suelen cultivarse en invernaderos. Al igual que los pepinos para picar, su piel fina contribuye a una excelente calidad de consumo, pero también provoca una rápida deshidratación, tienen sabor suave y por lo general no presentan semillas. A menudo se encuentran en los supermercados envueltos en plástico. Un tipo europeo bien cultivado debe tener pocas semillas, y las semillas que tenga serán de tamaño muy pequeño (Cruz-Coronado et al., 2020; Johnny's Selected Seeds, 2014).

Los pepinos híbridos tipo Beit-Alfa, también llamados “persas”, son relativamente delgados, de cáscara fina, lisa y sin espinas, de color verde claro uniforme, y se cosechan de entre 12 a 20 cm. Generalmente producen varios frutos por nudo, lo que aumenta el rendimiento de frutos, al compararlo con los tipos holandeses que sólo producen un fruto por nudo (Crosby, 2008). Se utilizan para invernaderos, y al igual que el tipo holandés, tienen la cáscara delgada, y se deben proteger de los insectos y la deshidratación (Johnny's Selected Seeds, 2014).

Los pepinos tipo americano (“slicer”) son de color oscuro y cáscara gruesa, lo que hace que tengan un buen comportamiento poscosecha. Si bien la piel es

comestible, a menudo imparte un ligero amargor; se cosechan de 18 a 23 cm de longitud y tienen una cantidad moderada de espinas y protuberancias distribuidas sobre una piel verde oscuro (Crosby, 2008; Johnny's Selected Seeds, 2014).

Los pepinos tipo asiático son espinosos, muy largos, delgados y requieren tutorado para mantener los frutos rectos, pues algunos frutos miden hasta 30 cm de largo. Su piel es generalmente más fina y menos amarga que la de los pepinos americanos, pero lo suficientemente gruesa como para disuadir a los escarabajos del pepino y retardar la deshidratación (Johnny's Selected Seeds, 2014).

En sistemas de cultivo en altas densidades, las plantas idóneas para incrementar el rendimiento por unidad de superficie son las que poseen características morfológicas que minimizan la competencia y sufren menor interferencia de sus vecinas, con alta eficiencia fisiológica que les permite explotar al máximo el ambiente favorable que les rodea y optimizar la distribución de asimilados hacia el fruto. En baja densidad de población, este arquetipo o modelo de planta subutilizará los recursos disponibles, pero en densidades altas será más eficiente y su rendimiento aumentará (Sedgley, 1991).

Sedgley (1991) y Acquaah et al. (1991) consideraron posible concebir un arquetipo básico general para alta productividad, semejante para varias especies cultivadas. Este modelo incluiría características como a) tallo grueso, que generalmente implica mayor área de floema y en consecuencia un transporte más eficiente, y mayor capacidad de reserva de asimilados para su uso posterior en el llenado de frutos; b) menor altura de planta, con menor gasto de asimilados en elongación, mayor índice de cosecha y menor competencia por radiación; c) hojas pequeñas pero fotosintéticamente eficientes, que permitan el uso de altas densidades de población sin efectos adversos de competencia y propicien una mayor tasa de producción de fotoasimilados por unidad de superficie de suelo cubierto por el dosel; d) hábito determinado, con un tallo sin ramas que reduce la competencia por asimilados entre órganos reproductivos y vegetativos, lo que favorece así a los primeros y acorta el ciclo para posibilitar más cosechas por año; e) alto número de estructuras reproductivas con una actividad de demanda

fisiológica que se traduzca en alto peso unitario, para transformar los fotoasimilados disponibles en rendimiento económico.

2.4 Densidades de producción en cultivos de pepino

2.4.1 Impacto de las densidades de siembra en la producción y calidad del pepino.

La elección de la densidad de siembra, es decir, la cantidad de plantas que se establecen en una determinada área de cultivo, es clave en el cultivo del pepino (Treviño et al., 2021) ya que, puede tener un impacto significativo en el desarrollo de las plantas, el rendimiento, la calidad de los frutos (Ortega-Torres et al., 2020) y la eficiencia en el uso de recursos (Abasolo-Pacheco et al., 2020). La relación entre la densidad de plantas y el crecimiento o el rendimiento depende del genotipo de la planta (Nienhuis et al., 1984) así como del ambiente (O'Sullivan, 1980; Tan et al., 1983).

Se ha publicado mucha información sobre cómo responden varias especies de plantas a la presión demográfica. Los rendimientos de judías verdes (Leakey, 1972), soja (Leakey & Rubaihayo, 1972), coles de Bruselas (Jones, 1972), tomates (Fery & Janick, 1970; Fery & Janick, 1971; Loughton, 1968; Nicklow & Downes, 1971) y pepinos (Wiebe, 1965) se han aumentado teniendo más plantas por unidad de superficie.

Una densidad de siembra alta puede aumentar la competencia por los recursos entre las plantas, lo que a menudo resulta en un crecimiento más vertical de las plantas, pero una mayor producción de frutos por unidad de área (Wang et al., 2021). Sin embargo, este aumento en la densidad también puede llevar a una mayor susceptibilidad a enfermedades y plagas, así como a una mayor necesidad de manejo y control (Pilamunga, 2023).

Por otro lado, una densidad de siembra baja puede permitir un mejor desarrollo individual de las plantas, con menos competencia por recursos y menos necesidad de manejo. Sin embargo, esto podría resultar en un menor rendimiento

por unidad de área (Parkash et al., 2021). Es crucial encontrar un equilibrio adecuado en la densidad de siembra para maximizar tanto el rendimiento, como la calidad de los frutos del pepino. Esto implica considerar factores como el tipo de variedad de pepino, las condiciones de crecimiento locales y los objetivos de producción del agricultor (Maeda et al., 2022).

Conocer la respuesta de los híbridos de pepino a diferentes densidades de siembra o, mejor dicho, a diferentes índices de área foliar, es de gran importancia (Alejo-Santiago et al., 2021) pues esta información permite tomar decisiones sobre la planificación de siembra, el manejo de cultivos y la optimización de recursos. Al determinar la densidad de siembra óptima, los agricultores pueden maximizar el rendimiento de sus cultivos y lograr una producción más eficiente y rentable (Abasolo-Pacheco et al., 2020; Ding et al., 2022).

Ciertos genotipos responden diferente a los espaciamientos entre planta y planta, siendo más productivos individualmente a densidades menores que en altas densidades por ser más pesados los frutos en menor densidad (Staub et al., 1992), pues a pesar de usar la luz de manera eficiente en altas densidades (Widders & Price, 1989), la fuente de recursos es limitada y a densidades mayores, se generan competencias entre plantas (nutrientes, agua y luz) lo que dificulta que los frutos sean más grandes y numerosos (Staub et al., 1992; Villegas et al., 2004). Dicha respuesta es diferente según el cultivo se realice a campo abierto o en invernadero, pues mientras que a campo abierto el rendimiento disminuye al incrementar la densidad, en condiciones de invernadero aumenta (Villegas et al., 2004). Por otro lado, López-Elías et al. (2015) indicaron que el largo y diámetro del fruto de pepino, así como la firmeza y concentración de sólidos solubles fueron similares para diferentes densidades de plantas evaluadas.

Las plantas de pepino, tanto indeterminadas como determinadas cultivadas a altas densidades de 242,000 y 272,000 plantas/ha, produjeron un mayor número de frutos por unidad de área en comparación con aquellas establecidas a una menor densidad de 109,000 plantas/ha⁻¹. Sin embargo, se registró una

disminución concomitante en el número y peso de frutos por planta con el aumento de las poblaciones de plantas en todos los genotipos evaluados (Staub et al., 1992). También se ha descrito que la alta densidad de plantas, además de que los frutos producidos son más pequeños, aumenta la precocidad y reduce el ciclo biológico (Villegas et al., 2004; El-Hamed & Elwan, 2011).

En condiciones protegidas (invernadero), la acumulación de biomasa en la planta aumenta en forma notoria conforme aumenta la densidad de población, de manera que la mayor biomasa se registra en la mayor densidad (Villegas et al., 2004). Pero también se ha reportado que, con menores densidades, el tallo de plantas de pepino, acumula mayor biomasa fresca (Ayala-Tafoya et al., 2019). Díaz et al., (1999) y Widders y Price (1989), señalaron que la producción de biomasa por planta disminuye conforme aumenta la densidad, debido a una mayor competencia entre plantas por luz, CO₂, agua y minerales. También se ha reportado que a mayor densidad de población hay incrementos en el área foliar por planta y en el IAF (Ayala-Tafoya et al., 2019).

La densidad de plantas puede influir en el verdor foliar, observándose en hojas de soja una tendencia a disminuir el índice de verde a medida que la densidad aumenta (Moreira et al., 2015), en el caso de pepino, tras el aumento del área foliar provocado por el aumento de tallos por planta, el índice de verde de las hojas también disminuyó (Ayala-Tafoya et al., 2019).

2.4.2 Recomendaciones y mejores prácticas para la densidad de plantas en invernaderos.

Para optimizar la densidad de plantas en invernaderos es crucial seleccionar características específicas en los cultivares y aplicar prácticas de manejo adecuadas a las necesidades del agricultor. La optimización de la arquitectura de las plantas juega un papel fundamental para la eficiencia de plantación a alta densidad. Las características de enanismo o determinación (Prend & John, 1976) y de hojas pequeñas (Bowers et al., 1981) son especialmente útiles en cultivos de pepino destinados a una cosecha única y mecanizada ya que permiten

la concentración de frutos sin comprometer el acceso a la luz en una alta densidad de plantas (Staub et al., 1992).

Las plantas enanas, por ejemplo, tienen menos ramas y tallos laterales más cortos que sus contrapartes indeterminadas (Sandhu et al., 1972) lo que reduce el espacio que cada planta ocupa. El crecimiento de las plantas de pepino determinadas al terminar con la conversión de la yema simpodial en tejido floral, concentran la energía en el crecimiento de los frutos (Hutchins, 1940).

Si se emplean cultivares con hojas pequeñas y hábito de ramificación múltiple, se puede lograr un dosel denso que maximice la fotosíntesis y, por tanto, el rendimiento por área, así al combinarse en altas densidades, se asegura que cada planta reciba suficiente luz, incluso en áreas restringidas (Bowers et al., 1981).

En invernaderos, los genotipos ginoicos tienen una gran ventaja, ya que pueden concentrar la producción de frutos en un breve periodo, lo cual puede ser económicamente viable en altas densidades de población, por lo que seleccionar un cultivar adaptado y establecer la densidad de población de plantas óptima es una decisión importante para maximizar el rendimiento (Wann, 1993).

Otra estrategia prometedora en la gestión de densidades en invernadero es comenzar con una densidad inicial baja de plantas y luego aumentarla permitiendo el desarrollo de tallos laterales. Esta práctica incrementa el número de tallos por metro cuadrado sin la necesidad de plantar más ejemplares, lo que puede aumentar el número de frutos y optimizar el uso de espacio, además reduce el costo inicial en plantas y asegura un mejor manejo de los recursos (Kleinhenz et al., 2006; Rahmatian et al., 2014).

En la Universidad Autónoma Chapingo se ha estado desarrollando una estrategia de producción de pepino en alta densidad, enfocada en acortar su ciclo de cultivo, desde el trasplante hasta el fin de cosecha, a un máximo de dos meses. Esta estrategia incluye prácticas como el uso de plantas de mayor edad en el

trasplante; el despunte de la planta (eliminación de la yema terminal) a 1.5 m de altura, lo que favorece a una estructura compacta, reduce el área foliar por planta y disminuye la competencia por luz entre plantas. Además, se emplea una alta densidad de población para compensar el menor rendimiento por planta. Esto resulta en una mayor producción por área, ya que la menor área foliar por planta permite incrementar el número de plantas sin comprometer significativamente el acceso a la luz y a los nutrientes (Sánchez et al., 2006; Ortiz et al., 2009).

2.5 Podas y despuntes de plantas de pepino

2.5.1 Efectos de la poda en el crecimiento, rendimiento y calidad del pepino.

La poda en los cultivos de pepino bajo invernadero tiene como objetivo que haya un equilibrio entre el crecimiento vegetativo y el crecimiento reproductivo de la planta. Es decir, evitan que se presente un crecimiento excesivo de hojas y tallos en la planta que conlleve a un IAF excesivo y a que se genere una disminución en la calidad de los frutos (Schapendonk & Brouwer, 1984).

Cuando se realizan adecuadamente las podas en plantas de pepino bajo invernadero, se aumenta la intercepción de luz solar por parte de las hojas disminuyendo la competencia que se presenta entre las plantas por espacio y luz dentro de un invernadero (Pettersen et al., 2010) y consigo mejora el rendimiento del cultivo (Hovi-Pekkanen & Tahvonen, 2008), pues al aumentar los niveles de radiación dentro del follaje de la planta se produce un aumento en el peso fresco de los frutos y se mejora la calidad de los mismos (Marcelis & Gijzen, 1998).

Durante la poda de formación en el sistema de producción convencional de pepino en invernadero, al quitar las primeras flores, frutos y chupones o guías secundarias, se busca acelerar el crecimiento apical de la planta y estimular la formación de nuevas hojas que se convertirán en órganos fuente de fotoasimilados para el desarrollo de nuevos órganos. Otro efecto que tiene la eliminación de frutos y chupones en los primeros 50 cm de la planta es que, se evita la producción de frutos con coloraciones pálidas debido a que estos quedan

cerca del suelo, además se mejora la calidad de los frutos formados en la parte superior de la planta (Bojacá et al., 2012). También con la poda de formación se pretende facilitar posteriormente las labores culturales, la cosecha, el entutorado, etc. (Reche, 1995).

Durante la poda de fructificación, se tiene un efecto sobre la producción para que esta sea más abundante y de calidad, pero es importante tener un equilibrio entre el sistema radicular y la actividad de las hojas. Durante esta poda, otro de los efectos es un mejor mantenimiento de la planta mediante la eliminación de brotes enfermos, mal situados, no funcionales o viejos y se reduce la difusión de algunas plagas y enfermedades. Con la poda se amplían las posibilidades para cultivar plantas con marcos más reducidos y se puede conseguir una mayor precocidad (Reche, 1995).

2.6 Mantenimiento de un índice de área foliar óptimo

2.6.1 Importancia del índice de área foliar en la producción de pepino.

El índice de área foliar (IAF) que cuantifica el área de hojas por unidad de área de suelo, representa directamente la superficie fotosintética del cultivo. Mantener un IAF óptimo asegura que el cultivo intercepte la máxima cantidad de luz, haciendo más eficiente el proceso de fotosíntesis sin generar un exceso de sombra entre las hojas, lo cual maximiza la producción de materia seca (Escalante, 1999).

Dado que la producción de materia seca en las plantas, depende tanto de la superficie fotosintética como de la tasa de fijación de dióxido de carbono (fotosíntesis por unidad de área), el crecimiento y desarrollo del área foliar se vuelve crucial. De hecho, la mayor parte de la variación en el rendimiento de los cultivos agrícolas está más relacionada con las diferencias en la tasa de aumento del área foliar, que incrementa el IAF, que con las diferencias en la tasa de asimilación neta (Watson, 1952).

Existe una aceptación general sobre el área foliar y el índice de área foliar como dos de los parámetros más importantes en la evaluación del crecimiento de las plantas, de ahí que la determinación adecuada de la misma sea esencial para la correcta interpretación de los procesos fisiológicos en una especie vegetal (Ayala-Tafoya et al., 2019).

Campagnol et al. (2012), en su estudio sobre la influencia de la densidad de plantas en el cultivo de sandías mini, observaron que un espaciamiento más denso entre plantas, resultó en un índice de área foliar más alto, optimizando la intercepción de luz, lo que aumentó la producción. Esto coincide con estudios en pepino que muestran que la reducción del área foliar impacta negativamente el rendimiento, disminuyendo el peso total de la planta y el peso de la materia fresca y seca de los frutos (Ramirez et al., 1988).

Sin embargo, algunos estudios sugieren que un índice de área foliar demasiado alto, puede tener efectos adversos. Malik et al. (2004) argumentaron que, a medida que aumenta el índice de área foliar, las hojas más cercanas al suelo quedan cubiertas por sombra, lo que reduce la tasa de fotosíntesis neta media de toda la planta. Esto resalta la importancia de mantener un IAF óptimo en diferentes cultivos para maximizar el desarrollo y la producción de biomasa, lo que se alinea con la observación de que un IAF superior al óptimo (que se sitúa entre 3 y 4 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) (Heuvelink et al., 2018), puede afectar el rendimiento por unidad de superficie (Silva, 2021).

2.6.2 Estrategias para mantener un índice de área foliar óptimo en cultivos hidropónicos en invernadero.

El manejo adecuado del índice de área foliar es clave para maximizar la producción, pues se ha demostrado que el incremento de la radiación interceptada por el dosel mejora el rendimiento (Richards, 2000). Una estrategia para mantener un IAF óptimo en cultivos bajo alta densidad, es el uso de híbridos que presenten una menor área foliar en las hojas del estrato superior, para

aumentar la penetración de luz a los estratos basales y así tener una mejor distribución de luz en el dosel (Valentinuz & Tollenaar, 2004).

En sistemas de cultivo convencionales de ciclos largos, resulta benéfico el uso de híbridos que presenten una demora en la senescencia foliar (Lee & Tollenaar, 2007) lo que prolonga la actividad fotosintética después de la antesis y maximiza la disponibilidad de asimilados durante el llenado de frutos (Duvick, 1997; Valentinuz & Tollenaar, 2004).

Otra práctica importante para controlar el IAF es el uso de densidades de población ajustadas, para incrementar el área foliar, el índice de área foliar y consigo la producción de biomasa, mejorando el rendimiento de los cultivos (Olalde et al., 2000). Sin embargo, la alta densidad también puede generar mayor sombreado, producido por el mayor número de hojas por metro cuadrado, lo que afecta negativamente algunos procesos fisiológicos, como la fotosíntesis, respiración, fotorrespiración y transpiración (Aguilar-García et al., 2005).

Para reducir los efectos negativos del sombreado, se ha probado el uso de retardadores de crecimiento como el Paclobutrazol, que limita el desarrollo excesivo del área foliar (Miguel-Zarate et al., 2021; Moreno-Pérez et al., 2021; Pérez, 2021), así como la poda de hojas inferiores para maximizar la eficiencia fotosintética, pues estas contribuyen menos a la fotosíntesis (Silva, 2021).

Otra estrategia utilizada en cultivos bajo alta densidad es realizar despuntes tempranos (eliminación de la yema terminal) dejando plantas de 1 a 1.5 m de altura en el caso de pepino, y una altura similar con tres racimos por planta en el caso de jitomate, para reducir el área foliar por planta y, mediante la compensación por la alta densidad, mantener un IAF óptimo (Sánchez et al., 2006; Ortiz et al., 2009; Sánchez et al., 2014a; Sánchez et al., 2014b; Sánchez et al., 2014c).

Finalmente, una estrategia probada en jitomate es la implementación de sistemas de cultivo en tres fases, donde las plantas se mantienen en alta densidad y con

despuntos tempranos en las primeras dos fases hasta alcanzar el IAF óptimo y posterior a ello, en la fase final, las plantas se redistribuyan a una densidad menor para conservar un IAF adecuado hasta el fin del ciclo (Silva, 2021).

2.7 Sistemas de producción de pepino en invernadero

2.7.1 Ciclos largos y baja densidad

Los ciclos largos y la baja densidad de plantación son prácticas fundamentales en la producción comercial de pepino tipo slicer, especialmente en invernaderos. El trasplante se realiza a los 20 ó 30 días después de la siembra (Zamora, 2017), cuando las plántulas de pepino alcanzan una altura de 25 cm y han desarrollado de 2 a 4 hojas verdaderas. En ese momento, se trasplantan en el suelo húmedo o en cualquier sustrato seleccionado (Hochmuth, 1990; Burt, 2007; Johnny's Selected Seeds, 2016).

Una vez trasplantado, las plántulas de pepino son entutoradas antes de los seis días después del trasplante (Zamora, 2017). Las plantas son cultivadas a un solo tallo principal y los brotes axilares se eliminan de forma regular (Maboko et al., 2011; Max et al., 2016). En algunos casos se eliminan los primeros cuatro frutos de cada planta, con el fin de lograr una cosecha más uniforme (Chacón-Padilla & Monge-Pérez, 2020; Cruz-Coronado et al., 2020).

El sistema convencional de manejo consiste en la conducción de la planta a más de tres metros de altura (Flores, 2013) y en utilizar distancias de 1.5 a 2 m entre hileras y de 0.2 a 0.3 m entre plantas; es decir, de 1.7 a 3.3 plantas m^{-2} , con rendimientos desde 54.8 t ha^{-1} o 5.48 kg m^{-2} (SIAP, 2023) hasta 305 t ha^{-1} o 30.5 kg m^{-2} (SIAP, 2015; Chacón-Padilla & Monge-Pérez, 2020) con un potencial de dos ciclos por año (Hernández, 2006).

Cuando el cultivo es más tardío, o está el objetivo de llegar produciendo a pleno invierno, la densidad es menor para evitar la competencia de luz en las fechas con días más cortos, además de proporcionar mayor ventilación que resultará en un cultivo con menos problemas en la producción y con frutos de buena calidad.

Los marcos en general para estos casos son de 2 m entre hileras y 0.4 ó 0.5 m entre plantas, o bien 1.5 m y 0.5 ó 0.6 m entre plantas, lo que resulta en 1 ó 1.2 plantas m^{-2} (Vasco, 2003).

El punto de crecimiento del tallo principal se elimina cuando una o dos hojas se han desarrollado por encima del alambre donde esta soportado su peso. Se permite que crezcan dos ramas laterales cerca de la parte superior de la planta y se les guía por encima del alambre superior, lo que da como resultado que estas dos ramas crezcan hacia abajo. El punto de crecimiento de cada rama lateral se elimina cuando está casi al nivel del suelo. Los frutos se desarrollan en el nudo de cada hoja y los frutos desarrollados en los 70 cm de la base del tallo principal deben podarse tan pronto como aparecen (Hochmuth, 1990).

En el norte del país, por lo general la siembra para el ciclo de otoño-invierno comienza a mediados de agosto hasta mediados de septiembre para trasplantar temprano en septiembre y comenzar a cosechar temprano en octubre. La otra época de siembra es durante la temporada de primavera-verano sembrando a mediados de diciembre y trasplantar temprano en febrero (Zamora, 2017) con una frecuencia de cosechas de tres a cuatro días (Lewis & Quinn, 2005) y en un periodo de producción extendido de hasta tres meses (Gnayem, 2006; Owens, 2004).

2.7.2 Ciclos cortos con despunte temprano y alta densidad

A pesar de que la producción tradicional de pepino tipo slicer en invernadero se basa en ciclos largos. Hay investigadores interesados en acortar el ciclo de cultivo. Por ejemplo, en 1999, Villegas evaluó el efecto de la edad del trasplante y el despunte temprano en el rendimiento y la precocidad de pepino en altas densidades (10 plantas m^{-2}), concluyendo que es posible realizar un ciclo de cultivo en 60 días de trasplante a fin de cosecha, con una etapa en semillero de 30 días y un despunte de las plantas a 1 m de altura dejando alrededor de 4 frutos por planta.

Sánchez et al. (2006) hicieron investigación para determinar la edad de trasplante de plántulas de pepino europeo para reducir el ciclo de cultivo sin comprometer el rendimiento, implementando un sistema de cultivo manejado en altas densidades de población y con podas tempranas de las yemas terminales (despunte de las plantas a 1.5 m de altura) y concluyeron que es posible producir pepino en un periodo de 70 días de trasplante a final de cosecha, sin disminuir el rendimiento por unidad de superficie (11.67 kg m^{-2}).

Ortiz et al., (2009) evaluaron 11 variedades de pepino y su rendimiento en sistemas de ciclo corto, realizaron despuntes tempranos de la yema terminal (plantas de 1 m de altura) y probaron dos densidades altas de población (9 y 16 plantas m^{-2}). El sistema consistió en un periodo de siembra de 35 días y un total de 72 días del trasplante al fin de la cosecha. Después del trasplante, fueron eliminados los brotes laterales de las plantas y se obtuvo un promedio de 6 frutos por planta a una densidad de 9 plantas m^{-2} , dos frutos más por planta respecto a la densidad de 16 plantas m^{-2} . El rendimiento fue de 19 kg m^{-2} útil en ambas densidades, concluyendo que, para ese sistema, es mejor la densidad de 9 plantas m^{-2} .

Otro estudio basado en el efecto de la edad del trasplante en ciclos cortos, altas densidades de producción y con despuntes tempranos (1.2 m de altura) mostró que es posible concluir un ciclo de cultivo en un periodo de 60 días, de trasplante a fin de cosecha, utilizando plántulas de 30 días de edad, sin disminuir el rendimiento (12.90 kg m^{-2}) y permitiendo hasta seis ciclos de cultivo por año (Flores, 2013).

El despunte de las plantas entre 1 y 1.5 m de altura, combinado con una densidad de población que permita el establecimiento temprano y el mantenimiento de un IAF entre 3 y 4 es una práctica que ha funcionado para acortar el ciclo de cultivo de trasplante a fin de cosecha, permitiendo tener más ciclos de cultivo por año. Las altas densidades permiten que el índice de área foliar óptimo se establezca más rápido haciendo más productiva a la planta. El despunte temprano reduce el rendimiento por planta, pero el rendimiento por unidad de superficie es

compensado por el aumento de la densidad de población y se logra un aumento en el número de ciclos de cultivo por año incrementando la productividad anual (Flores, 2013).

2.7.3 Ciclos cortos con despunte temprano, alta densidad y tres fases de cultivo (antecedentes con jitomate).

En jitomate, el sistema de producción convencional bajo invernadero en México consiste en el manejo de variedades de hábito indeterminado en un sólo ciclo de cultivo por año con rendimiento promedio entre 200 y 300 t ha⁻¹. Con alta tecnología es posible obtener producciones de hasta 500 t ha⁻¹ al año, pero a costos de producción muy altos (Sánchez & Moreno, 2017b). Se manejan densidades de población de entre 2 y 3 plantas m⁻² dejando crecer la planta hasta más de 9 m de longitud y cosechando 15 o más racimos por planta (Resh, 2004).

Como alternativa al sistema de producción convencional, se ha implementado un nuevo sistema de producción para jitomate hidropónico en invernadero apropiado para pequeños productores. Este sistema se basa en dos fases: una de semillero donde se retarda el trasplante hasta los 45 a 50 dds y otra de producción en alta densidad dejando sólo tres racimos por planta para acortar el ciclo de cultivo. El resultado a sido un sistema que permite hasta tres ciclos por año con un incremento de 50 % en el rendimiento anual y eso sin incrementar el costo de producción por kilogramo, lo que favorece la rentabilidad económica de la empresa (Sánchez et al., 2010; Sánchez et al., 2012; Sánchez et al., 2017; Sánchez et al., 2021).

Posteriormente se ha trabajado en el desarrollo de un innovador sistema de producción de tres fases (Silva, 2021; Martínez, 2022; Villafuerte, 2022) en vez de las dos antes mencionadas. Para ello, es necesario un espacio adicional de invernadero, equivalente a no más de 25 a 30 % de la superficie que se desea cultivar con jitomate, con el objetivo de incrementar hasta en 100 % el rendimiento anual del sistema de producción de tres racimos por planta en alta densidad de población.

En la primera fase del cultivo (semillero), las plántulas permanecen 45 días desde la siembra hasta el trasplante. La segunda fase, que representa la principal innovación de este sistema de cultivo, comprende desde el trasplante (a los 45 dds) hasta los 90 dds. Las plantas son trasplantadas en bolsas de 6 a 8 L de capacidad y rellenas con tezontle, a una densidad poblacional de hasta 30 plantas m^{-2} , en esta fase, cada planta es tutorada individualmente con un alambrón metálico de 1.2 m de largo enterrado en cada bolsa o maceta. En la tercera fase, las plantas del invernadero de la fase dos, son movidas para reubicarlas en el invernadero de producción final, lo que se hace con todo y su bolsa y con su tutor, donde se acomodan a una menor densidad de siembra (6 a 8 plantas m^{-2}), de manera similar al sistema a tres racimos en alta densidad de dos fases (Sánchez et al., 2017). Esta fase tiene una duración aproximada de 50 días, es decir, de los 90 a los 140 dds, así las plantas de cada ciclo de cultivo ocupan el invernadero sólo 50 días, lo que en teoría permite la obtención de siete ciclos de cultivo por año a costa de un 25 a 30 % de espacio adicional de invernadero para alojar a las plantas en la fase intermedia. El rendimiento por unidad de superficie fue de 16 kg m^{-2} equivalente a 160 t ha^{-1} ciclo $^{-1}$, lo que en siete ciclos da un potencial de rendimiento de 1120 t ha^{-1} año $^{-1}$, más del doble de lo reportado en sistemas convencionales.

2.8 Literatura citada

- Abasolo-Pacheco, F., Ojeda-Silvera, C. M., García-Gallirgos, V., Melgar-Valdes, C., Nuñez-Cerezo, K., & Mazón-Suástegui, J. M. (2020). Efecto de medicamentos homeopáticos durante la etapa inicial y desarrollo vegetativo de plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.). *Revista Terra Latinoamericana*, 38(1), 165-181.
- Acquaah, G., Adams, M. W., & Kelly, J. D. (1991). Identification of effective indicators of erect plant architecture in dry bean. *Crop Science*, 31(2), 261-264.
- Adams, P. (2004). Aspectos de la nutrición mineral en cultivos sin suelo en relación al suelo. In G. M. Urrestarazu (Ed.), *Tratado de cultivo sin suelo* (pp. 81-111). Editorial MundiPrensa.
- Aguilar-García, L., Escalante-Estrada, J. A., Fucikovsky-Zak, L., Tijerina-Chávez, L., & Engleman, E. M. (2005). Área foliar, tasa de asimilación neta,

- rendimiento y densidad de población en girasol. *Terra Latinoamericana*, 23(3), 303-310.
- Alarcón, V. A. (2006). Proyectos en cultivo sin suelo ¿Cómo empezar? In V. A. Alarcón (Ed.), *Cultivos sin suelo* (pp. 11-21). Compendios de Horticultura 17. Ediciones de Horticultura, S. L.
- Alejo-Santiago, G., Becerra-Venegas, S. G., Bugarín-Montoya, R., Aburto-González, C. A., Quiñones-Aguilar, E. E., Rincón-Enríquez, G., & Juárez-Rosete, C. R. (2021). Requerimiento nutrimental y nutrición potásica en pepino persa con poda a un solo tallo. *Terra Latinoamericana*, 39(1), 1-10.
- Altieri, M. A. (1997). *Agroecología: Bases científicas para una agricultura sustentable* (338 p.). Nordan-Comunidad.
- AMHPAC. (2018). *Agricultura protegida en México*. <http://.org/2018/images/PDFoficial/HorticulturaenMexico.pdf>
- Antón, V. M. A. (2004). *Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo* (Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Ayala-Tafoya, F., López-Orona, C. A., Yáñez-Juárez, M. G., Díaz-Valdez, T., Velázquez-Alcaraz, T. D. J., & Parra Delgado, J. M. (2019). Plant density and stem pruning in greenhouse cucumber production. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(1), 79-90.
- Beltrano, J., & Gimenez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía* (180 p.). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Bojacá, C., Casilimas, H., Monsalve, O., Gil, R., Villagrán, E., Arias, L., & Fuentes, L. S. (2012). *Manual de producción de pepino bajo invernadero* (1ª ed. 208 p). Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.
- Bowers, J. L., Goode, M. J., & Peerson, M. E. (1981). Studies with little leaf cucumber. *Proceedings of the Annual Meeting Arkansas State Horticultural Society*, 102(1), 1-19.
- Burt, J. (2007). *Growing cucumbers in protected cultivation in Western Australia* (15 p.). Department of Primary Industries and Regional Development, Western Australia, Perth.. <https://library.dpird.wa.gov.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1034&context=pubns>.
- Camarena, B. J. G. (2002). *Acortamiento del ciclo de cultivo del pepino europeo mediante despuntes tempranos* (Tesis Profesional, Universidad Autónoma Chapingo).
- Campagnol, R., Mello, S. D. C., & Barbosa, J. C. (2012). Vertical growth of mini watermelon according to the training height and plant density. *Horticultura Brasileira*, 30(4), 726-732.

- Cánovas, M. F., & Magán, C. J. (2003). Cultivos sin suelo. In F. F. Camacho (Ed.), *Técnicas de producción en cultivos protegidos* (Tomo 2, pp. 409-453). Instituto Cajamar.
- Chacón-Padilla, K., & Monge-Pérez, J. E. (2020). Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo invernadero: comparación entre tipos de pepino. *Revista Tecnología En Marcha*, 33(1), 17-35.
- Chen, T.W., Stützel, H., & Wien, H. C. (2020). The cucurbits. In H. C. Wien & H. Stützel (Eds.), *The physiology of vegetable crops* (pp. 244-270). CABI publishing.
- Chung, S. M., Staub, J. E., & Fazio, G. (2003). Inheritance of chilling injury: a maternally inherited trait in cucumber. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 128(4), 526-530.
- Crosby, L. C. (2008). *Growth and consumer evaluation of Cucumis sativus L. cultivated in controlled environments* (Tesis de maestría, Texas Tech University)
- Cruz-Coronado, J. A., Monge-Pérez, J. E., & Loría-Coto, M. (2020). Comparación agronómica entre tipos de pepino (*Cucumis sativus*). *UNED Research Journal*, 12(1), 2842-2850.
- Díaz, L., Arteaga, L., & Vilorio, A. (1999). Crecimiento vegetativo del pimentón en función de la densidad de plantas y edad del cultivo. *Bioagro*, 11(2), 69-73.
- Ding, X., Nie, W., Qian, T., He, L., Zhang, H., Jin, H., Cui, J., Wang, H., Zhou, Q., & Yu, J. (2022). Low plant density improves fruit quality without affecting yield of cucumber in different cultivation periods in greenhouse. *Agronomy*, 12(6), 1-14.
- Duvick, D. N. (1997). What is yield. In G. O. Edmeades, B. Banziger, H. R. Mickelson & C. B. Peña-Valdivia (Eds.), *Developing drought and low N-tolerant maize* (pp. 332-335). CIMMYT.
- El-Hamed, K. E. S., & Elwan, M. W. M. (2011). Dependence of pumpkin yield on plant density and variety. *American Journal of Plant Sciences*, 2(5), 636-643.
- Ene, C. O., Ogbonna, P. E., Agbo, C. U., & Chukwudi, U. P. (2016). Evaluation of sixteen cucumber (*Cucumis sativus* L.) genotypes in derived savannah environment using path coefficient analysis. *Notulae Scientia Biologicae*, 8(1), 85-92.
- Escalante, E. J. A. (1999). Área foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra Latinoamericana*, 17(2), 149-157.
- FAO-SAGARPA. (2007). *Producción de hortalizas a cielo abierto y bajo condiciones protegidas* (33 pp.). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y Secretaría de Agricultura Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

- Fery, R. L., & Janick, J. (1970). Response of the tomato to population pressure. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 95(5), 614-624.
- Fery, R. L., & Janick, J. (1971). Effect of time of harvest on the response of tomato to population pressure. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 96(2), 172-176.
- Fischer, R. A. (1983). Wheat. In W. H. Smith & S. J. Banta (Eds.), *Symposium on potential productivity of field crops under different environments* (pp. 129-154). International Rice Research Institute.
- Flores, O. A. D. (2013). *Efecto de la edad de trasplante en el crecimiento y rendimiento de pepino, jitomate y pimienta hidropónico bajo invernadero* (Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo).
- FUMIAF. (2005). *Cultivo de pepino europeo en invernaderos de alta tecnología en México* (37 p.). Fundación Mexicana para la Investigación Agropecuaria y Forestal. A.C.
- Gao, S., Niu, Z., Huang, N. & Hou, X. (2013). Estimating the leaf area index, height and biomass of maize using HJ-1 and RADARSAT-2. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 24(1), 1-8.
- Giuffrida, F., & Leonardi, C. (2009). Nutrient solution concentrations in soilless closed system. *Acta Horticulturae*, 807(66), 463-468.
- Gnayem, N. (2006). *Recommendation on growing greenhouse beita cucumbers*. Ministry of Agriculture-Israel. www.bashaar.org.il/files/126102006165020.doc
- Gommes, R. (1998). *Climate-related risk in agriculture*. In IPCC Expert meeting on risk management methods (13 pp.). Atmospheric Environment Service, Environment Canada.
- Grijalva, R. L., & Robles, F. (2003). Avances en la producción de hortalizas en invernaderos. *Publicación Técnica*, 7(1), 14-18.
- Hernández, G. (2006). Manejo del pepino en invernadero (Módulo 5). In *Diplomado Internacional en Agricultura Protegida*.
- Heuvelink, E., Tao, L., & Dorais, M. (2018). Crop growth and yield. In E. Heuvelink (Ed.), *Tomatoes* (2.^o ed., pp. 89-136). CABI Publishing.
- Heuvelink, E., & Korner, O. (2001). Parthenocarpic fruit growth reduces yield fluctuation and blossom-end rot in sweet pepper. *Annals of Botany*, 88(1), 69-74.
- Hochmuth, R. (1990). Greenhouse cucumber production. In *Florida Greenhouse Vegetable Production Handbook* (Vol. 3: HS790 CV268). University of Florida, IFAS Extension.
- Hovi-Pekkanen, T., & Tahvonen, R. (2008). Effects of interlighting on yield and external fruit quality in year-round cultivated cucumber. *Scientia Horticulturae*, 116(2), 152-161.

- Hoyos, G. D., Morales, O. J. G., Chavarría, A. H., Montoya, R. A. P., Correa, L. G., & Jaramillo, V. S. D. C. (2012). Acumulación de grados-día en un cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en un modelo de producción aeropónico. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 65(1), 6389-6398.
- Hutchins, A. E. (1940). Inheritance in the cucumber. *Journal of Agricultural Research*, 60(2), 117-128.
- Jensen, M. H. (1997). Hydroponics. *HortScience*, 32(6), 1018-1021.
- Johnny's Selected Seeds. (2014). *Cucumber types and terminology*. <http://www.johnnyseeds.com/assets/information/cucumbers-types-terminology-8989.pdf>
- Johnny's Selected Seeds. (2016). *Greenhouse Cucumber Production*. <https://www.johnnyseeds.com/on/demandware.static/-/Library-Sites-JSSSharedLibrary/default/dw7d29818a/assets/information/8987-cucumbers-greenhouse-production.pdf?srsId=AfmBOorz627zyHJj0tPbE5ihRWuUdm244TCONRQHNCcv4MJWjG7ZPpqM>
- Jones, L. H. (1972). The effects of topping and plant population on dry matter synthesis and distribution in Brussels sprouts. *Annals of Applied Biology*, 70(1), 77-87.
- Kleinhenz, V., Katroschan, K., Schutt, F., & Stutzel, H. (2006). Biomass accumulation and partitioning of tomato under protected cultivation in the humid tropics. *European Journal of Horticultural Science*, 71(4), 173-182.
- Kumar, S., Kumar, R., Gupta, R. K., & Sephia, R. (2011). Studies on correlation and path-coefficient analysis for yield and its contributing traits in cucumber. *Crop Improvement*, 38(1), 18-23.
- Leakey, C. L. A. (1972). The effect of plant population and fertility level on yield and its components in two determinate cultivars of *Phaseolus vulgaris* (L.) Savi. *The Journal of Agricultural Science*, 79(2), 259-267.
- Leakey, C. L. A., & Rubaihayo, P. R. (1972). Soyabean agronomy in Uganda. I. Plant populations and spacing. *East African Agricultural and Forestry Journal*, 37(3), 201-205.
- Lee, E. A., & Tollenaar, M. (2007). Physiological basis of successful breeding strategies for maize grain yield. *Crop science*, 47(3), 202-215.
- Lewis, W., & Quinn, J. (2005). *Growing Cucumbers within a High Tunnel*. Department of Horticulture, University of Missouri, Columbia. http://hightunnels.org/wp-content/uploads/2013/06/Growing_Cucumbers_In_High_Tunnel.pdf
- López, E. J. (2018). La producción hidropónica de cultivos. *Idesia*, 36(2), 139-141.
- López-Elías, J., Ortega, S. G., López, M. A. H., León, J. J., Puente, E. O. R., & Amador, B. M. (2015). Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) en función

- de la densidad de plantación en condiciones de invernadero. *European Scientific Journal*, 11(24), 25-36.
- Loughton, A. (1968). Effect of plant density on yields of field tomatoes. *Horticultural Research Institute*, 4(2), 35-37.
- Maboko, M. M., Du Plooy, C. P., & Chiloane, S. (2011). Effect of plant population, fruit and stem pruning on yield and quality of hydroponically grown tomato. *African Journal of Agricultural Research*, 6(22), 5144-5148.
- Maeda, K., Nomura, K., & Ahn, D. H. (2022). Dry matter production and light use efficiency at different developmental stages of japanese cucumber. *Environmental Control in Biology*, 60(3), 181-186.
- Malik, M. A. (2004). Agrophysiological response of canola (*Brassica napus* L.) to different planting patterns and stand densities. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 2(2), 148-152.
- Marcelis, L. F. M., & Gijzen, H. (1998). Evaluation under commercial conditions of a model of prediction of the yield and quality of cucumber fruits. *Scientia Horticulturae*, 76(3-4), 171-181.
- Martínez, A. K. (2022). *Comportamiento agronómico de plantas de jitomate establecidas en un arreglo de dosel escaleriforme en periodos de alta densidad de población* (Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo).
- Massa, D., Incrocci, L., Maggini, R., Carmassi, G., Campiotti, C. A., & Pardossi, A. (2010). Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless cultures of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management*, 97(7), 971-980.
- Max, J. F. J., Schmidt, L., Mutwiwa, U. N., & Kahlen, K. (2016). Effects of shoot pruning and inflorescence thinning on plant growth, yield and fruit quality of greenhouse tomatoes in a tropical climate. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics*, 117(1), 45-56.
- Miguel-Zarate, N., Ayala-Garay, O. J., Sánchez-del Castillo, F., & Magdaleno-Villar, J. J. (2021). The use of plant growth retardants in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings. *Revista Chapingo Serie horticultura*, 27(3), 157-169.
- Montoya, M. I., & Brindis, J. G. G. (2001). 25 mil hectáreas de cultivos bajo invernaderos. Informe especial: Cierre de temporada 1999-2000. *Revista Hortalizas, Frutas y Flores*, 28(1), 14-20.
- Moreira, A., Moraes, L. A., Schroth, G., & Mandarino, J. M. (2015). Effect of nitrogen, row spacing, and plant density on yield, yield components, and plant physiology in soybean-wheat intercropping. *Agronomy Journal*, 107(6), 2162-2170.
- Moreno-Pérez, E. D. C., Sánchez-del Castillo, F., Ruiz-Díaz, M., & Contreras-Magaña, E. (2021). Effect of population densities and paclobutrazol

- applications on seedling quality and yield in tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(1), 5-17.
- Moreno, R. A., Aguilar, D. J., & Luévano, G. A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 29(1), 763-774.
- Nakano, Y., Sasaki, H., Nakano, A., Suzuki, K., & Takaichi, M. (2010). Growth and yield of tomato plants as influenced by nutrient application rates with quantitative control in closed rockwool cultivation. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 79(1), 47-55.
- Nelson, D. (1990). Mitigating disasters: power to the community. *International Nursing Review*, 37(6), 371.
- New South Wales Government. (2019). *Greenhouse cucumber production* (224 pp.). Industry and Investment.
- Nicklow, C. W., & Downes, J. D. (1971). Influence of nitrogen, potassium and plant population on the maturity of field seeded tomatoes for once-over harvest. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 96(1), 46-49.
- Nienhuis, J., Lower, R. L., & Miller, C. H. (1984). Effects of genotype and within-row spacing on the stability of sex expression in cucumber. *HortScience*, 19(2), 273-274.
- Olalde, G. V. M., Escalante, E. J., Sánchez, G. P., Tijerina, C. L., Mastache, L. A. A., & Carreño, R. E. (2000). Crecimiento y distribución de biomasa en girasol en función del nitrógeno y densidad de población en clima cálido. *Terra Latinoamericana*, 18(4), 313-323.
- Ortega-Torres, A. E., Flores-Tejeida, L. B., Guevara-González, R. G., Rico-García, E., & Soto-Zarazúa, G. M. (2020). Hidrogel acrilato de potasio como sustrato en cultivo de pepino y jitomate. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1447–1455.
- Ortiz, C. J., Sánchez-del Castillo, F., Mendoza, C. M., & Torres, G. A. (2009). Características deseables de plantas de pepino crecidas en invernadero e hidroponía en altas densidades de población. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(4), 289-294.
- O'Sullivan, J. (1980). Irrigation, spacing, and nitrogen effects on yield and quality of pickling cucumbers grown for mechanical harvesting. *Canadian Journal of Plant Science*, 60(3), 923-928.
- Owens, G. (2004). *Lebanese cucumber* (Growing NoteVG5). Department of Primary Industry, Fisheries and Mines. https://daf.nt.gov.au/__data/assets/pdf_file/0003/268041/VG5-Lebanese-cucumbers.pdf
- Papadopoulos, A. P., Saha, U., Hao, X., & Khosla, S. (2006). Response of rockwool-grown greenhouse cucumber, tomato, and pepper to kinetin foliar sprays. *HortTechnology*, 16(3), 493-501.

- Pardossi, A., Incrocci, L., Massa, D., Carmassi, G., & Maggini, R. (2009). The influence of fertigation strategies on water and nutrient efficiency of tomato grown in closed soilless culture with saline water. *Acta Horticulturae*, 807(63), 445-450.
- Parkash, V., Singh, S., Deb, S. K., Ritchie, G. L., & Wallace, R. W. (2021). Effect of deficit irrigation on physiology, plant growth, and fruit yield of cucumber cultivars. *Plant Stress*, 1(6), 1-11.
- Pérez, M. J. (2021). *Efecto de dosis de nitrógeno, fósforo, luz suplementaria, paclobutrazol y aminoácidos sobre calidad de plántula y floración en jitomate* (Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo).
- Perry, K. B., Wehner, T. C., & Johnson, G. L. (1986). Comparison of 14 methods to determine heat unit requirements for cucumber harvest. *HortScience*, 21(3), 419-423.
- Pettersen, R. I., Torre, S., & Gislerød, H. R. (2010). Effects of intracanopy lighting on photosynthetic characteristics in cucumber. *Scientia Horticulturae*, 125(2), 77-81.
- Pilamunga, E. R. M. (2023). *Evaluación de híbridos de pepino sometido a dos densidades de siembra* (Tesis profesional, Universidad Técnica de Machala).
- Ponce, C. P. (2013). Producción de tomates en invernadero en México. *Revista Productores de Hortalizas*. <http://www.hortalizas.com/horticultura-protegida/produccion-de-tomates-en-invernadero-en-mexico/>
- Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E., & Maccleery, B. (2015). *Greenhouse design and control* (380 p.). CRC Press.
- Porter, J. R., & Delecolle, R. (1988). Interaction of temperature with other environmental factors in controlling the development of plants. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 42(1), 133-156.
- Pratt, L., & Ortega, J. M. (2019). *Agricultura protegida en México. Elaboración de la metodología para el primer bono verde agrícola certificado* (73 p.). Banco Interamericano de Desarrollo.
- Prend, J., & John, C. A. (1976). Improvement of pickling cucumber with the determinate (de) gene. *HortScience*, 11(4), 427-428.
- Prieto, H., & Clemente, M. (2011). *O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa* (76 p.). Editora UFV. Universidade Federal de Viçosa.
- Qadir, G., Cheema, M. A., Hassan, F., Ashraf, M., & Wahid, M. A. (2007). Relationship of heat units accumulation and fatty acid composition in sunflower. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences*, 44(1), 24-29.
- Rahmatian, A., Delshad, M., & Salehi, R. (2014). Effect of grafting on growth, yield and fruit quality of single and double stemmed tomato plants grown hydroponically. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 55(2), 115-119.

- Ramirez, D. R., Wehner, T. C., & Miller, C. H. (1988). Source limitation by defoliation and its effect on dry matter production and yield of cucumber. *HortScience*, 23(4), 704-706.
- Reche, M. J. (1995). *Poda de hortalizas en invernadero (calabacín, melón, pepino y sandía)* (32 p.). Hojas divulgadoras Núm. 1-2/95 HD. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Resh, H. M. (2004). *Cultivos Hidropónicos* (3.^a ed. 369 p.). Ediciones Mundi-Prensa.
- Richards, R. A. (2000). Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops. *Journal of Experimental Botany*, 51(1), 447-458.
- Sánchez, Del C. F., Moreno, P. E del C., Coatzín, R. R., Colinas, L. M. T., & Peña, L. A. (2010). Evaluación agronómica y fisiotécnica de cuatro sistemas de producción en dos híbridos de jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 16(3), 207-214.
- Sánchez, Del C. F., Moreno, P. E del C., & Contreras, M. E. (2012). Development of alternative crop systems for commercial production of vegetables in hydroponics-I: Tomato. *Acta Horticulturae*, 947(22), 179-187.
- Sánchez, Del C. F., Moreno, P. E del C., Vázquez, R. J. C., & González, N. M. Á. (2017). Densidades de población y niveles de despunte para variedades contrastantes de jitomate en invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 23(3), 163-174.
- Sánchez, Del C. F., & Moreno, P. E del C. (2017a). *Diseño Agronómico y Manejo de Invernaderos* (405 p.). Universidad Autónoma Chapingo.
- Sánchez, Del C. F., & Moreno, P. E del C. (2017b). *Rendimiento y ahorro de agua y fertilizantes en cultivos hidropónicos de jitomate, pepino y lechuga con recirculación de la solución nutritiva*. III Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII. <https://www.riego.mx/congresos/comeii2017/assets/documentos/ponencias/extenso/COMEII-17034.pdf>
- Sánchez, Del C. F., Moreno, P. E del C., Contreras, M. E., & Vicente, G. E. (2006). Reducción del ciclo de crecimiento en pepino europeo, mediante trasplante tardío. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2), 87-90.
- Sánchez, Del C. F., Bastida, C. O. A., Moreno, P. E del C., Contreras, M. E., & Sahagún, C. J. (2014c). Rendimiento de jitomate con diferentes métodos de cultivo hidropónico basados en doseles escaleriformes. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(3), 239-251.
- Sánchez, Del C. F., Moreno, P. E del C., Pineda, P. J., Osuna, M. J., Rodríguez, P. J. E., & Osuna, E. T. (2014a). Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, 48(2), 185-197.

- Sánchez, Del C. F., González, M. L., Moreno, P. E. del C., Pineda, P. J., & Reyes, G. C. E. (2014b). Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(3), 261-269.
- Sánchez, Del C. F., Portillo, M. L., Moreno, P. E. del C., Magdaleno, V. J., & Vázquez, R. J. C. (2021). Efectos del volumen de contenedor y densidad de plántula sobre trasplante tardío y número de flores en jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(2), 71-84.
- Sandhu, M. S., Mohr, H. C., & Knavel, D. E. (1972). Comparisons of a genetic dwarf and a normal vine cultivar of cucumber. *HortScience*, 7(3), 287-287.
- Schapendonk, A. H. C. M., & Brouwer, P. (1984). Fruit growth of cucumber in relation to assimilate supply and sink activity. *Scientia Horticulturae*, 23(1), 21-33.
- Sedgley, R. H. (1991). An appraisal of the Donald ideotype after 21 years. *Field Crops Research*, 26(2), 93-112.
- Shaw, N. L., Canliffe, D. J., Rodriguez, J. C., Taylor, S., & Spencer, D. M. (2000). Beit alpha cucumber- an exciting new greenhouse crop. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, 113(14), 247- 253.
- Shetty, N. V., & Wehner, T.C. (1998). Evaluation of oriental trellis cucumbers for production in North Carolina. *HortScience*, 33(5), 891-896.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2013). *Boletín de producción agrícola*. SAGARPA. Disponible en <http://www.campomexicano.gob.mx/boletinsiap/002-e.html> [Consulta: 23 de marzo de 2024].
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2015). *Resumen de producción agrícola por producto*. SAGARPA. Disponible en http://reportes.siap.gob.mx/Agricola_siap/ResumenProducto.do. [Consulta: 23 de marzo de 2024].
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Panorama Agroalimentario 2023. (2023). Panorama agroalimentario 2023. SAGARPA. Disponible en https://drive.google.com/file/d/1FWHntHMgju_uOse_MsOF9jZQDAm_FOD9/view [Consulta: 23 de marzo de 2024].
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola* (2025). SAGARPA. Disponible en https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/ [Consulta: 25 de marzo de 2025].
- Silva, A. G. E. (2021). *Híbridos de jitomate sometidos a periodos de alta densidad de población en condiciones de invernadero* (Tesis de Maestría, Universidad Autónoma Chapingo).

- Staub, J. E., Knerr, L. D., & Hopen, H. J. (1992). Plant density and herbicides affect cucumber productivity. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 117(1), 48-53.
- Tan, C. S., Fulton, J. M., & Nuttall, V. W. (1983). The influence of soil moisture stress and plant populations on the yield of pickling cucumbers. *Scientia Horticulturae*, 21(3), 217-224.
- Tewari, S. K., & Singh. M. (1993). Yielding ability of wheat (*Triticum aestivum*) at different dates of sowing: A temperature-dependent performance. *Indian Journal of Agronomy*, 38(2), 204-209.
- Treviño, L. E. A., Sandoval-Rangel, A., Benavides, M. A., Benavides, M. A., Ortega, O. H., Cadenas, P. G., & Cabrera de la Fuente, M. (2021). Nanopartículas de selenio absorbidas en hidrogeles de quitosán-polivinil alcohol en la producción de pepino injertado. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26(1), 159-169.
- Urrestarazu, G. M. (2000). Bases y sistemas de los cultivos sin suelo. In G. M. Urrestarazu (Ed.), *Manual de cultivos sin suelo* (pp. 51-94). Mundi-Prensa.
- United States Department of Agriculture USDA. (2000). *Americans relish cucumbers*. USDA, Economic Research Service. www.ers.usda.gov/publications/agoutlook/dec2000/ao277d.pdf
- Valentinuz, O. R., & Tollenaar, M. (2004). Vertical profile of leaf senescence during the grain-filling period in older and newer maize hybrids. *Crop Science*, 44(3), 827-834.
- Vasco, M. R. (2003). El cultivo del pepino bajo invernadero. In F. F. Camacho (Ed.), *Técnicas de producción en cultivos protegidos* (pp. 691-722). Ediciones Agrotécnicas.
- Villafuerte, M. A. (2022). *Poda selectiva de hojas en plantas de jitomate sometidas temporalmente a alta densidad de población* (Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo).
- Villegas, C. J. R., González, H. V. A., Carrillo, S. J. A., Livera, M. M., Sánchez, del C. F., & Osuna, E. T. (2004). Crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a densidades de población en dos sistemas de producción. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 27(4), 333-338.
- Villegas, V. A. (1999). *Efectos de la edad de trasplante y despunte temprano en la precocidad y rendimiento de pepino (Cucumis sativus L.)* (Tesis profesional, Universidad Autónoma Chapingo).
- Wang, Y., Chu, Y., Wan, Z., Zhang, G., Liu, L., & Yan, Z. (2021). Root architecture, growth and photon yield of cucumber seedlings as influenced by daily light integral at different stages in the closed transplant production system. *Horticulturae*, 7(328), 1-14.
- Wann, E. V. (1993). Cucumber yield response to plant density and spatial arrangement. *Journal of Production Agriculture*, 6(2), 253-255.

- Watson, D. J. (1952). The physiological basis of variation in yield. *Advances in Agronomy*, 4(6), 101-145.
- Widders, I. E., & Price, H. C. (1989). Effects of plant density on growth and biomass partitioning in pickling cucumbers. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 114(5), 751-755.
- Wiebe, J. (1965). Spacing, harvesting, and sequence of planting of pickling cucumbers. *Horticulture Research Institute*, 7(1), 13-77.
- Zamora, E. (2017). *El cultivo de pepino tipo slicer – americano (Cucumis sativus L.) bajo cubiertas plásticas* (pp. 1-8). Universidad de Sonora. Departamento de Agricultura y Ganadería.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS ECOFISIOLÓGICO EN VARIEDADES DE PEPINO BAJO UN SISTEMA HIDROPÓNICO DE CULTIVO EN TRES FASES

RESUMEN

Se trabajó en la implementación de un innovador sistema intensivo de cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en hidroponía bajo invernadero, con la finalidad de maximizar su producción anual. Se buscó acortar cada ciclo de producción a un máximo de 40 días mediante el despunte de las plantas a 1.2 m de altura y un manejo especial en tres fases de cultivo: semillero, fase intermedia de alta densidad de población (17 plantas m⁻²) y fase final de producción (7 plantas m⁻²). El objetivo particular de este trabajo fue evaluar el comportamiento morfológico, ecofisiológico y agronómico de cinco variedades de pepino tipo americano partenocárpico para escoger la de mejor desempeño en rendimiento para este sistema de producción. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cinco tratamientos correspondientes a las variedades evaluadas ('Coatzin', 'Centauro', 'Altaria', 'Anaconda' y 'Swayne'), cuatro repeticiones y 20 plantas por unidad experimental. Al final de la fase intermedia (54 días después de la siembra), a pesar del despunte a 1.2 m de altura, el índice de área foliar (IAF) promedio era de 7, por lo que se reubicaron las plantas en su fase final de producción bajando la densidad de población a 7 plantas m⁻² y el IAF a aproximadamente 3 hasta el final del ciclo de cultivo, que duró 34 días más. El mayor rendimiento de fruto lo tuvo 'Coatzin' con 9.8 kg m⁻² (p≤0.01) en un ciclo de cultivo que ocupó el invernadero de producción final sólo 34 días, lo que posibilita lograr hasta 10 ciclos de cultivo al año con un rendimiento potencial anual de casi 100 kg m⁻².

Palabras clave: *Cucumis sativus* L., agricultura protegida, sistemas de producción, densidad de población, productividad.

ECOPHYSIOLOGICAL ANALYSIS OF CUCUMBER VARIETIES UNDER A THREE-PHASE HYDROPONIC CULTIVATION SYSTEM

ABSTRACT

An innovative intensive cucumber (*Cucumis sativus* L.) cultivation system in hydroponics under greenhouse conditions was implemented, with the aim of maximizing annual production. The goal is to shorten each production cycle to a maximum of 40 days by blunting off the plants at 1.2 m in height and a special management in three cultivation phases: seedbed, intermediate phase of high population density (17 plants m⁻²) and final production phase (7 plants m⁻²). The particular objective of this work was to evaluate the morphological, ecophysiological and agronomic behavior of five varieties of American parthenocarpic cucumber to choose the best performing one in yield for this production system. The experimental design was a randomized complete blocks with five treatments corresponding to the varieties evaluated ('Coatzin', 'Centauro', 'Altaria', 'Anaconda' and 'Swayne'), four replications and 20 plants per experimental unit. At the end of the intermediate phase (54 days after sowing), despite the plants blunting off at 1.2 m in height, the average leaf area index (LAI) was 7, so the plants were relocated in their final production phase, lowering the population density to 7 plants m⁻² and LAI to approximately 3 until the end of the crop cycle, which lasted 34 more days. The highest fruit yield was obtained by 'Coatzin' with 9.8 kg m⁻² in a growing cycle that occupied the final production greenhouse for only 34 days, which makes it possible to achieve up to 10 crop cycles per year with a potential annual yield of almost 100 kg m⁻².

Keywords: *Cucumis sativus* L., protected agriculture, production systems, population density, productivity.

3.1 Introducción

La agricultura protegida basada en el uso de invernaderos y sistemas hidropónicos para la producción de cultivos, por el alto grado de control que logra sobre factores climáticos, edáficos y bióticos, ofrece mayor rendimiento, reducción de riesgos en el cultivo e incremento de la rentabilidad económica para pequeños productores (Sánchez & Moreno, 2017).

En 2023, México se posicionó como el 5° productor y 3° exportador de pepino a nivel mundial. En 4,651 hectáreas de invernaderos, casas sombra y macrotúneles se produjeron 519,034 toneladas, con un valor de la producción de 4,845 millones de pesos, lo que representa un rendimiento promedio de 111.59 toneladas por hectárea. Por otro lado, la producción nacional de pepino a cielo abierto se extendió por 14,837 hectáreas, con una producción total de 517,682 toneladas y un valor de la producción de 4,044 millones de pesos, con un rendimiento promedio de 35.63 toneladas por hectárea (SIAP, 2025).

El sistema de producción de pepino predominante en los invernaderos o casas sombra en México ha sido importado del Norte de Europa y se caracteriza por el uso de densidades de población de 1.5 a 3 plantas m^{-2} . El cultivo se da en dos fases bien diferenciadas: una de semillero que dura de 15 a 21 días y otra que comprende desde el trasplante hasta el final de la cosecha (Figura 5). Después del trasplante, las plantas crecen apoyadas por tutores en el invernadero hasta superar los 3 metros de altura en ciclos de cultivo que duran cinco a seis meses desde el trasplante a cosecha. Con invernaderos de alta tecnología, o incluso de mediana tecnología, en localidades con condiciones óptimas de clima, se pueden obtener dos ciclos de cultivo al año con rendimiento aproximado de 400 toneladas por hectárea anuales (Zamora, 2017; NSW government, 2019; Chen et al., 2020).



Figura 5. Sistema convencional en dos fases de cultivo: a) Fase de semillero (15 a 21 días) y b) Fase de producción a una densidad de 1.5 a 3 plantas m^{-2} con duración de cinco a seis meses.

Investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo han desarrollado un sistema alternativo de producción de pepino en hidroponía bajo invernadero. En este sistema se extiende la fase de semillero hasta 30 días y la de trasplante a fin de cosecha se hace durar sólo 60 días (Figura 6) limitando el crecimiento de las plantas a una altura de 1 a 1.2 metros mediante la práctica del despunte (eliminación de la yema terminal). Sólo se cosechan entre 6 a 8 frutos por planta; sin embargo, debido a que cada planta tiene menos follaje, se puede aumentar la densidad de población entre 6 y 7 plantas m^{-2} , lo que ayuda a mantener un rendimiento similar por unidad de superficie respecto al sistema convencional, pero acortando el periodo de trasplante a fin de cosecha, de 5 meses a sólo 60 días, por lo que potencialmente se pueden obtener seis ciclos de cultivo por año, aumentando considerablemente la productividad y el beneficio económico anual en comparación con el sistema convencional (Villegas, 1999; Camarena, 2002; Sánchez et al., 2006; Ortiz, et al., 2009; Flores, 2013; Sánchez et al., 2014).

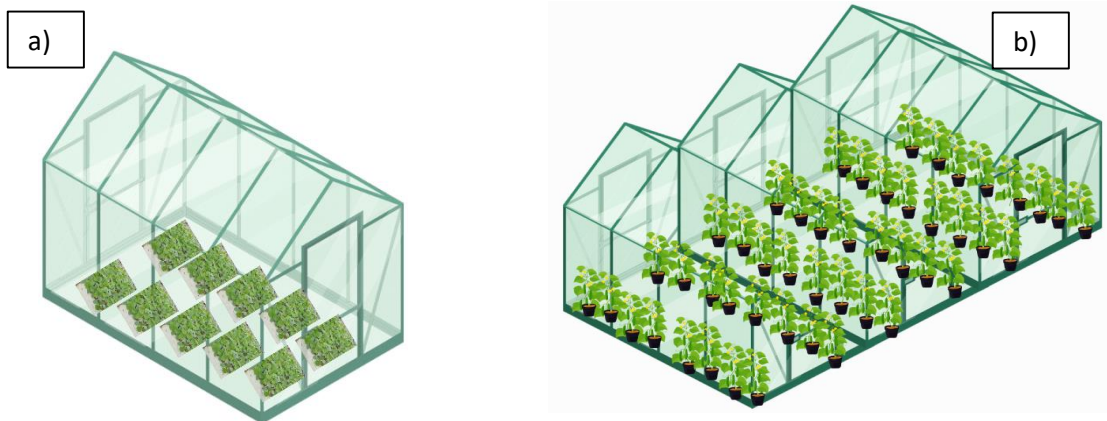


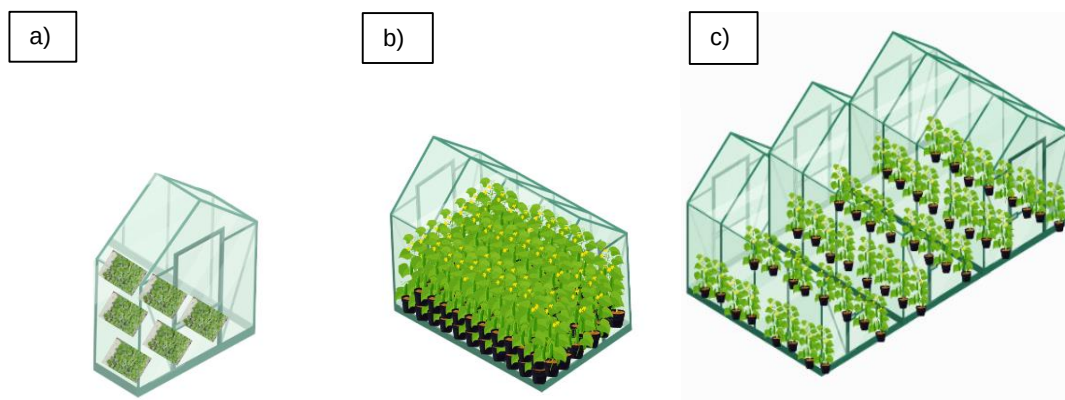
Figura 6. Sistema alternativo bajo invernadero en dos fases: a) Fase de semillero a 30 días b) Fase de reproducción de 60 días con densidad de 6 a 7 plantas m^{-2} .

Si bien este sistema de trasplante tardío, alta densidad y despunte temprano en dos fases de cultivo ha demostrado ser exitoso en comparación con el sistema convencional debido a que se hizo posible la reducción de la fase de producción a 60 días, surge la interrogante de si todavía es posible acortar más esta fase final de producción y lograr así más ciclos al año y, en consecuencia, incrementar la productividad anual.

La densidad de población ideal para maximizar la producción diaria de materia seca en un cultivo de pepino se determina buscando establecer y mantener un IAF entre 3 y 4 (Gao et al., 2013). No obstante, este valor no se alcanza hasta varios días después del trasplante debido al crecimiento gradual del follaje. Sin embargo, podría alcanzarse y mantenerse un IAF constante entre 3 y 4 a lo largo de casi todo el ciclo si las plántulas se trasplantaran a contenedores móviles (bolsas o macetas) a densidades de población relativamente altas en un espacio adicional de invernadero, para después de un tiempo determinado, reubicar dichos contenedores con sus plantas a distancias que permitan la densidad adecuada para mantener ese IAF hasta el final del ciclo. Esto acortaría aún más la fase de producción permitiendo potencialmente más ciclos por año.

Por ejemplo, el sistema de producción de seis ciclos de cultivo por año en dos fases se basa en una fase de semillero de 30 días y una fase de trasplante a fin cosecha de 60 días. Si se dispusiera de un espacio adicional en invernadero (no mayor al 30 % del área final de producción), después del trasplante se podría implementar una fase intermedia de manejo del cultivo en alta densidad (17 plantas m⁻²) de unos 30 días de duración. Luego, las plantas se reubicarían, con sus mismos contenedores (bolsas o macetas), a su densidad final (6 a 7 plantas m⁻²) en otro invernadero para una fase final de producción de solo 30 días. Esto permitiría alcanzar potencialmente hasta 12 ciclos de cultivo por año (Figura 7).

Los resultados de investigaciones sobre un sistema similar de producción de jitomate en tres fases de cultivo (Silva, 2021; Martínez, 2022; Villafuerte, 2022) y estudios previos con el cultivo de pepino (Ortiz et al., 2009; Sánchez et al., 2014) sugieren que efectivamente es posible aumentar la productividad anual de pepino en invernadero mediante un sistema de producción en tres fases (semillero, alta densidad y producción final) con el que se podrían obtener potencialmente más de 10 ciclos de cultivo por año, con rendimientos anuales que podrían superar los 100 kg m² de superficie cubierta por año (1000 t ha⁻¹) y con un beneficio económico muy alto por unidad de superficie para los pequeños y medianos productores que lo utilizaran, aun vendiendo su producto en mercados locales.



12 ciclos de cultivo al año

Figura 7. Sistema de cultivo de pepino en tres fases: a) Fase de semillero de 30 días. b) Fase de alta densidad de 30 días. c) Fase de producción de 30 días.

3.2 Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en el campo experimental del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México. Se utilizaron semillas de cinco variedades de pepino (*Cucumis sativus* L.) parteocáropico ginoico de tipo americano en hidroponía bajo un invernadero equipado con calefacción y pared húmeda con extractores. El sistema de producción constó de tres fases: semillero, fase intermedia de alta densidad y fase final de producción.

El ciclo completo del cultivo duró 88 días, desde la siembra hasta el final de la cosecha (agosto a octubre del año 2023). Las variedades evaluadas fueron: 'Altaria', 'Coatzin', 'Swayne', 'Anaconda' y 'Centauro'. Las tres primeras pertenecen a la empresa Enza zaden; 'Anaconda' a la empresa Westar y 'Centauro' pertenece a la casa comercial Fitó.

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cinco tratamientos correspondientes a cada una de las variedades mencionadas. Cada tratamiento tuvo cuatro repeticiones con 20 plantas por unidad experimental, totalizando 400 plantas en el experimento.

La siembra se realizó el 31 de Julio del 2023 en charolas de 60 cavidades, cada una con 200 ml de sustrato (50 % peat moss + 50% perlita). Se colocó un data logger marca Extech Rht10, Waltham, Massachusetts, Estados Unidos, registrando una temperatura promedio de 19.8 °C y una humedad relativa promedio de 76.9 % durante esta fase del cultivo.

Las plántulas fueron irrigadas diariamente con una solución nutritiva hidropónica con las siguientes concentraciones (mg L⁻²): N = 200, P = 40, K = 250, Ca = 200, Mg = 60, S = 150, Fe = 2, Mn = 1, B = 0.5, Cu = 0.1 y Zn = 0.1. En la fase de semillero, la concentración de la solución nutritiva fue al 50 % y desde el trasplante hasta la cosecha al 100 %. Esta fase duró 28 días.

La fase intermedia comenzó a los 28 días después de la siembra (dds) con el trasplante a bolsas negras de polietileno de 8 L de capacidad (35 cm de alto x 20 cm de diámetro), a una densidad de 17 plantas m⁻² de invernadero (25 plantas m⁻² útil), con una distancia de 20 cm entre planta y planta y 20 cm entre hilera e hilera, resultando en un marco de plantación rectangular formando juegos de cinco hileras de plantas. El riego fue de 1 a 1.5 L diarios por planta, distribuidos en ocho riegos diarios de aproximadamente 5-7 minutos. Cada planta fue tutorada individualmente con una estaca de alambón de 1.2 m de altura, y se eliminaron manualmente las guías secundarias.

Poco antes de finalizar esta fase intermedia, a los 46 dds, cuando las plantas alcanzaron 1.2 m de altura, se realizó el despunte (eliminación de las yemas terminales). Esta fase duró 26 días, concluyendo a los 54 dds, cuando las plantas fueron reubicadas con bolsa y tutor a la densidad final de 7 plantas m⁻², iniciando así la fase final.

En la fase final, las plantas se reacomodaron con una separación de 30 cm entre plantas y 33 cm entre hileras, formando un marco rectangular de tres hileras. Durante esta fase, la temperatura promedio fue de 19.6 °C y la humedad relativa de 76.3 %. La dosis diaria de riego por planta en esta fase fue de 2 L repartidos en 10 riegos. Esta fase duro 34 días (de los 54 a los 88 dds), y abarcó el periodo

de crecimiento de los frutos y todo el periodo de cosecha en el que se hicieron cinco cortes.

A partir del trasplante, cada 15 días se registraron variables de crecimiento: grosor del tallo (mm), área foliar por planta (cm²), índice de área foliar (m² de hoja m⁻² de suelo) y peso seco total (g).

Con los datos obtenidos de las variables de peso seco y área foliar se calcularon los valores de la tasa de asimilación neta (TAN) y de la tasa del crecimiento del cultivo (TCC) (g m⁻² de suelo día⁻¹), utilizando las siguientes fórmulas:

$$TAN = \frac{PS_2 - PS_1}{T_2 - T_1} \times \frac{2}{AF_1 + AF_2}$$

$$TCC = TAN \times IAF$$

Donde:

TAN: tasa de asimilación neta (g m⁻² día⁻¹)

PS₂: peso seco inicial (g)

PS₁: peso seco final (g)

T₂: tiempo final (días)

T₁: tiempo inicial (días)

AF₁: área foliar inicial (m²)

AF₂: área foliar final (m²)

TCC: tasa de crecimiento del cultivo (g m⁻² día⁻¹)

TAN: tasa de asimilación neta (g m⁻² día⁻¹)

IAF: índice de área foliar (m² hoja / m² suelo)

En los cinco cortes realizados durante la fase de producción, se determinó el número de frutos por unidad de superficie (frutos m⁻²), el rendimiento por unidad de superficie (kg m⁻²) y el peso medio por fruto (g), considerando una densidad de 7 plantas m⁻² durante la fase final del cultivo.

De dos plantas marcadas por unidad experimental, se registraron los datos de peso seco de los frutos cosechados, y tras el último corte, se obtuvo el peso seco

total de cada planta. Con esta información, se calculó el índice de cosecha (IC) de cada variedad, mediante la fórmula:

$$IC = Re / Rb$$

Donde:

IC = índice de cosecha

Re = Rendimiento económico (peso seco de los frutos cosechados)

Rb = Rendimiento biológico (peso seco total de la planta)

Se corroboró la distribución normal de los datos, utilizando la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación múltiple de Tukey al 5 % de probabilidad, empleando el software Statistical Analysis System versión 9.4 (SAS Institute Inc., 2023).

3.3 Resultados y discusión

De acuerdo con los resultados del análisis de comparaciones de medias para las variables relacionadas con el crecimiento, se observaron diferencias significativas entre variedades en el grosor del tallo a lo largo del ciclo de cultivo (Cuadro 3.1). Estas diferencias variaron en el tiempo. A los 28 días después de la siembra (dds) correspondientes al inicio de la fase intermedia de alta densidad, la variedad Coatzin presentó el mayor grosor de tallo, mientras que 'Swayne' registró el valor más bajo. Quince días después, 'Coatzin' y 'Anaconda' mostraron los mayores valores, en tanto que 'Altaria' presentó el menor grosor. A los 58 dds, "Swayne" superó al resto de las variedades, y a los 73 dds, nuevamente 'Coatzin' destacó con el mayor valor. Finalmente, a los 88 dds, la variedad Swayne fue la de mayor grosor y 'Anaconda' presentó el menor valor.

Es importante señalar que estos resultados deben interpretarse con reserva, ya que el grosor del tallo puede fluctuar a lo largo del día debido a múltiples factores ambientales y fisiológicos. Entre ellos se encuentra el estado hídrico de la planta,

que está influenciado por parámetros como la frecuencia y dosis de riego, la tasa de transpiración, la humedad relativa, la temperatura ambiental, y la hora del día, entre otros (Kozlowski, 1967; Fernández & Cuevas, 2010).

Cuadro 3.1. Comparaciones de medias para grosor de tallo medidos a lo largo del ciclo de cultivo en cinco variedades de pepino.

Variedad	Grosor de tallo (mm)				
	28 dds	43 dds	58 dds	73 dds	88 dds
'Altaria'	6.1 ab ^z	6.7 b	6.9 c	8.1 bc	7.7 bc
'Anaconda'	6.0 ab	7.8 a	7.2 bc	7.7 c	7.6 c
'Centaurio'	5.9 ab	7.2 ab	7.5 abc	8.0 bc	8.1 abc
'Coatzin'	6.4 a	7.9 a	7.8 ab	8.9 a	8.3 ab
'Swayne'	5.5 b	7.2 ab	8.1 a	8.7 ab	8.4 a
DMSH	0.8	1.0	0.8	0.6	0.7

dds: días después de la siembra. DMSH: Diferencia mínima significativa honesta. ^z: Valores con letra diferente dentro de columnas, son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P = 0.05$).

Se observó una variación temporal en el promedio del grosor del tallo de las cinco variedades evaluadas (Figura 8), con una tendencia general de crecimiento gradual a lo largo del ciclo de cultivo. No obstante, al inicio de la fase final (de producción), el aumento en el grosor de tallo no fue tan evidente y a los 88 dds, se registró una ligera disminución respecto al valor observado a los 73 dds. Esta reducción podría atribuirse a la cesión o removilización de fotoasimilados desde los tallos hacia los frutos en desarrollo, los cuales representan una elevada demanda en esta fase del cultivo (Santos et al., 2010; Bihmidine et al., 2013; Osorio et al., 2014; Aluko et al., 2021; León-Burgos et al., 2021).

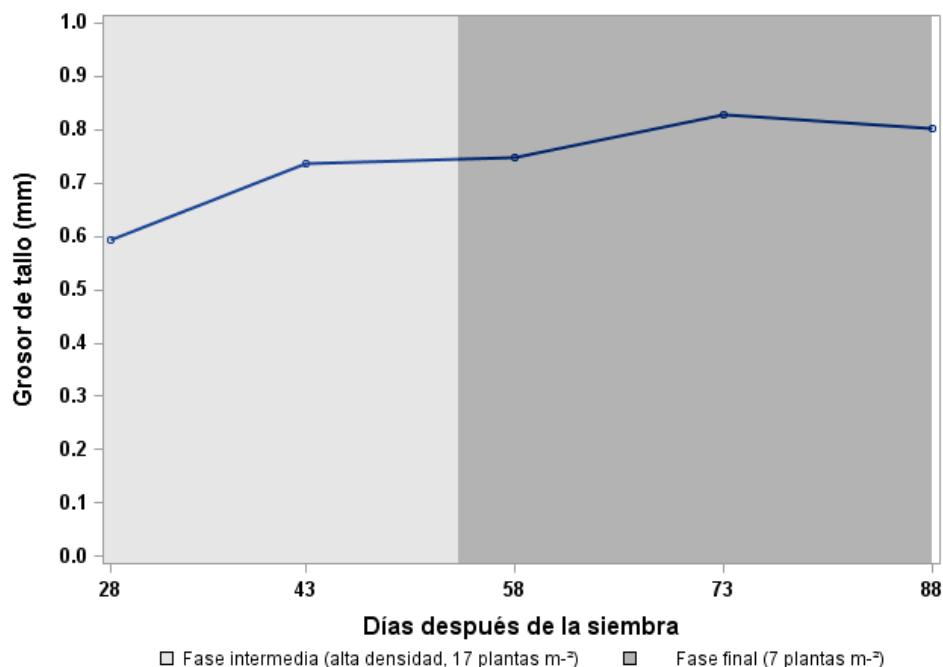


Figura 8. Grosor del tallo, promedio de las cinco variedades de pepino a lo largo del ciclo de cultivo.

En cuanto al área foliar por planta, se detectaron diferencias significativas entre variedades en distintos momentos del ciclo (Cuadro 3.2). A los 28 dds, la variedad Swayne presentó la mayor área foliar por planta, mientras que 'Anaconda' registró el valor más bajo, con una diferencia de 98 cm² entre ambas. A los 73 dds, ya en la fase final de producción, 'Coatzin' destacó con la mayor área foliar, y 'Centauro' presentó la menor, con una diferencia de 609 cm². Finalmente, a los 88 dds, al final del ciclo de cultivo, las variedades Swayne y Coatzin mantuvieron los valores más altos de área foliar, mientras que 'Altaria', 'Centauro' y 'Anaconda' presentaron estadísticamente menor área, con una diferencia de 851 cm² entre la variedad con mayor y menor área foliar por planta.

Cuadro 3. 2 Comparaciones de medias para área foliar medidos a lo largo del ciclo de cultivo en cinco variedades de pepino.

Variedad	Área foliar por planta (cm ²)				
	28 dds	43 dds	58 dds	73 dds	88 dds
'Altaria'	280 abc ^z	1690 a	2948 a	3185 a	2523 b
'Anaconda'	236 c	1932 a	3091 a	3183 a	2771 b
'Centauro'	297 ab	1817 a	2823 a	3077 a	2717 b
'Coatzin'	259 bc	1933 a	2801 a	3686 a	3314 a
'Swayne'	334 a	1771 a	2891 a	3621 a	3374 a
DMSH	54	737	774	691	419

dds: días después de la siembra. DMSH: Diferencia mínima significativa honesta. ^z: Valores con letra diferente dentro de columnas, son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P = 0.05$).

A lo largo del ciclo de cultivo, se observó un aumento gradual en el promedio de crecimiento del área foliar por planta en las cinco variedades de pepino, alcanzando su punto máximo a los 73 dds (Figura 9). La disminución registrada a los 88 dds se asocia con la senescencia natural de las plantas al aproximarse el final de su ciclo (Hoyos et al., 2012) así como con la ausencia de formación de nuevas hojas debido al despunte realizado a los 46 dds (Antonietta, 2013).

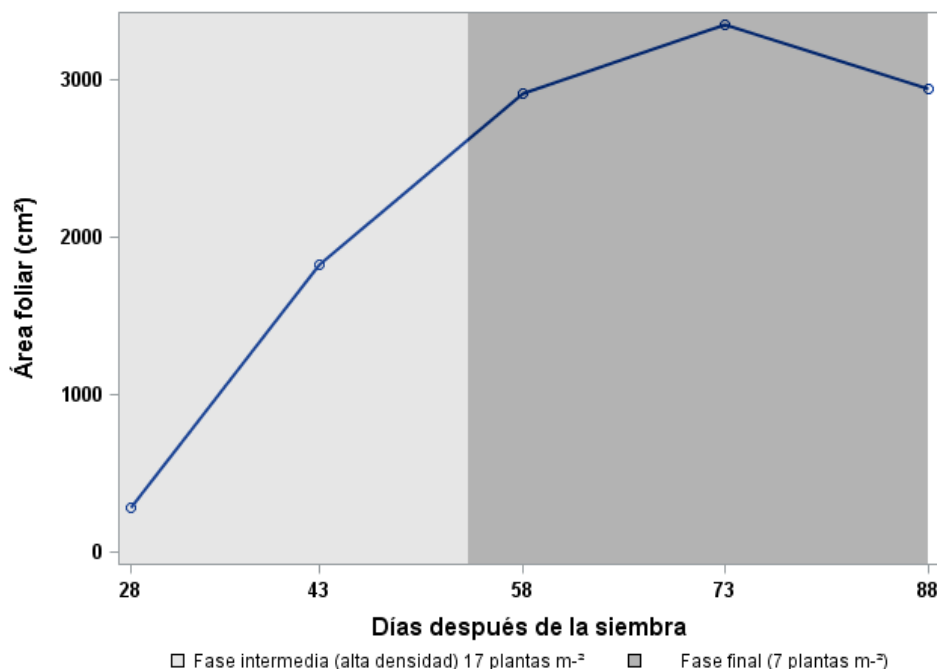


Figura 9. Área foliar promedio de las cinco variedades de pepino a lo largo del ciclo de cultivo.

Dado que el índice de área foliar se calculó a partir del área foliar promedio por planta multiplicada por la densidad de población, sus valores reflejaron directamente los efectos del manejo de densidades implementado en las distintas fases del cultivo. En las comparaciones de medias (Cuadro 3.3), se observó que al día 28 después de la siembra (inicio de fase intermedia de alta densidad), la variedad Swayne presentó el mayor índice de área foliar, mientras que la variedad Anaconda mostró el valor más bajo, con una diferencia de 0.24. A los 88 días después de la siembra, las variedades Swayne y Coatzin nuevamente destacaron con los índices de área foliar más altos, mientras que 'Altaria', 'Centauro' y 'Anaconda' registraron los índices más bajos, con una diferencia de 0.85 entre la variedad con mayor y menor índice.

Cuadro 3.3. Comparaciones de medias para el índice de área foliar a lo largo del ciclo de cultivo en cinco variedades de pepino.

Variedad	Índice de área foliar				
	28 dds	43 dds	58 dds	73 dds	88 dds
'Altaria'	0.70 abc ^z	4.23 a	2.95 a	3.18 a	2.52 b
'Anaconda'	0.59 c	4.83 a	3.10 a	3.18 a	2.77 b
'Centauro'	0.74 ab	4.54 a	2.82 a	3.08 a	2.72 b
'Coatzin'	0.65 bc	4.83 a	2.80 a	3.69 a	3.31 a
'Swayne'	0.83 a	4.43 a	2.90 a	3.62 a	3.37 a
DMSH	0.14	1.84	0.77	0.69	0.42

dds: días después de la siembra. DMSH: Diferencia mínima significativa honesta. ^z: Valores con letra diferente dentro de columnas, son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P = 0.05$).

En cuanto al índice de área foliar promedio de las cinco variedades a lo largo del ciclo de cultivo (Figura 10), se observó que al final de la etapa de semillero, el IAF alcanzó un valor de 8.4 (dato no mostrado). Considerando este comportamiento, se sugiere que, para optimizar el sistema de producción en tres fases, sería conveniente reducir la fase de semillero de 28 a 23 días. Esta modificación podría ayudar a evitar efectos indeseados de elongación que afecten negativamente el crecimiento y desarrollo posterior de las plantas. No obstante, esta reducción implicaría extender la fase final de producción de 30 a 35 días, lo que disminuiría el número de ciclos de producción posibles por año a aproximadamente 10.

A los 54 dds, al finalizar la fase intermedia de alta densidad (17 plantas m⁻²), el índice de área foliar (IAF) superó el valor de 7, esta situación resalta la necesidad de evaluar una posible reducción en la duración de dicha fase, con el objetivo de mitigar el estrés asociado a un IAF elevado, el cual tiende a intensificarse en los últimos días de permanencia de las plantas en condiciones de alta densidad. Dicho estrés podría afectar negativamente el rendimiento por ciclo, aunque una reducción en la fase intermedia también conllevaría una disminución en el número de ciclos de producción anuales. Por tanto, se debe buscar un equilibrio óptimo entre el rendimiento por ciclo y la cantidad de ciclos por año. Por ejemplo,

sería preferible alcanzar ocho ciclos por año con un rendimiento promedio de 12 kg m⁻² por ciclo, en lugar de diez ciclos con rendimiento de 9.6 kg m⁻² por ciclo, ya que ambos escenarios producirían el mismo rendimiento anual (96 kg m⁻² año⁻¹), pero el costo de producción anual sería menor en el primer caso pues implicaría menos gasto anual en semilla, charolas, mano de obra, entre otros.

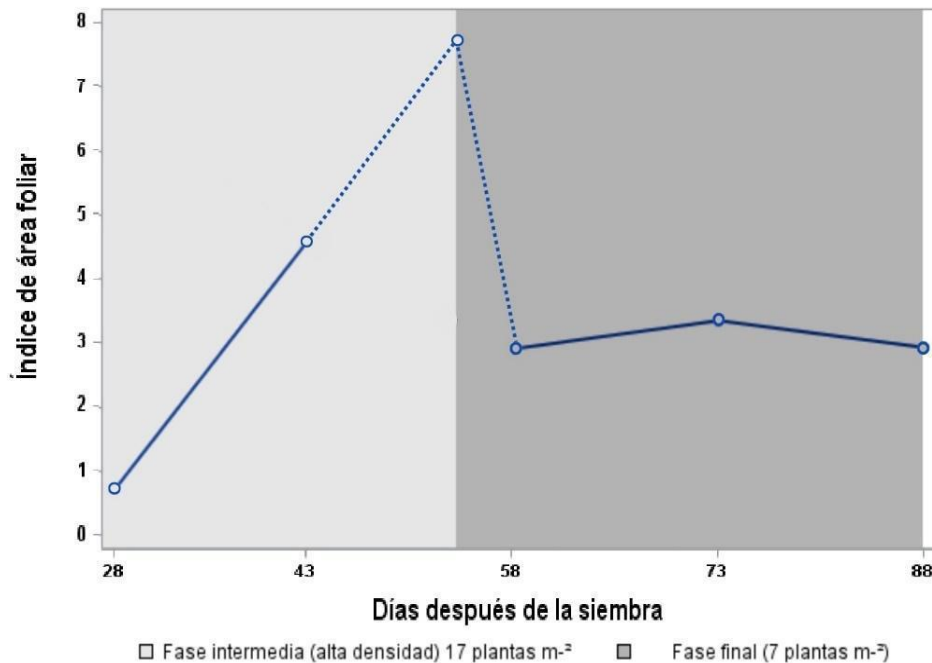


Figura 10. Índice de área foliar promedio de las cinco variedades de pepino a lo largo del ciclo de cultivo.

Con respecto al peso seco total por planta, las comparaciones de medias (Cuadro 3.4) mostraron que, al momento del trasplante (28 dds) y en ausencia de frutos, la variedad Swayne presentó el mayor valor, mientras que 'Anconda' registró el menor, con una diferencia de 0.56 g entre ambas. Al final del ciclo de cultivo (88 dds), ya con frutos en etapa de llenado, 'Coatzin' y 'Swayne' destacaron con los mayores pesos secos totales, mientras que 'Altaria' tuvo el menor valor, con una diferencia de 18.22 g entre sí.

Aunque 'Swayne' presentó los mayores valores de peso seco de hojas, tallos y raíces (datos no mostrados), 'Coatzin' logró superar su peso seco total al final del ciclo gracias a una mayor acumulación de biomasa en los frutos, lo cual sugiere

un mayor índice de cosecha para esta variedad (Cuadro 3.7). Este comportamiento confirmó que, en la fase final del cultivo, la mayor parte de los fotoasimilados se destinaron a la producción de frutos, lo que tuvo implicaciones directas en la eficiencia del uso de los recursos y en el rendimiento final del cultivo.

Cuadro 3.4. Comparaciones de medias para peso seco total de planta, medidos en cinco variedades de pepino.

Variedad	Peso seco total de planta (g)				
	28 dds	43 dds	58 dds	73 dds	88 dds
'Altaria'	1.63 ab ^z	9.90 a	26.04 a	46.43 a	66.96 b
'Anaconda'	1.31 c	11.95 a	32.96 a	49.11 a	77.06 ab
'Centauro'	1.66 ab	12.24 a	28.65 a	47.41 a	76.10 ab
'Coatzin'	1.37 bc	11.81 a	29.72 a	52.28 a	85.18 a
'Swayne'	1.87 a	10.65 a	31.34 a	55.39 a	82.33 a
DMSH	0.29	4.91	8.93	13.51	11.33

dds: días después de la siembra. DMSH: Diferencia mínima significativa honesta. ^z: Valores con letra diferente dentro de columnas, son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P = 0.05$).

La evolución del peso seco total por planta promedio de las cinco variedades en distintos tiempos (Figura 11) mostró un incremento progresivo a lo largo del ciclo, siendo este aumento más marcado durante la fase final del ciclo de cultivo.

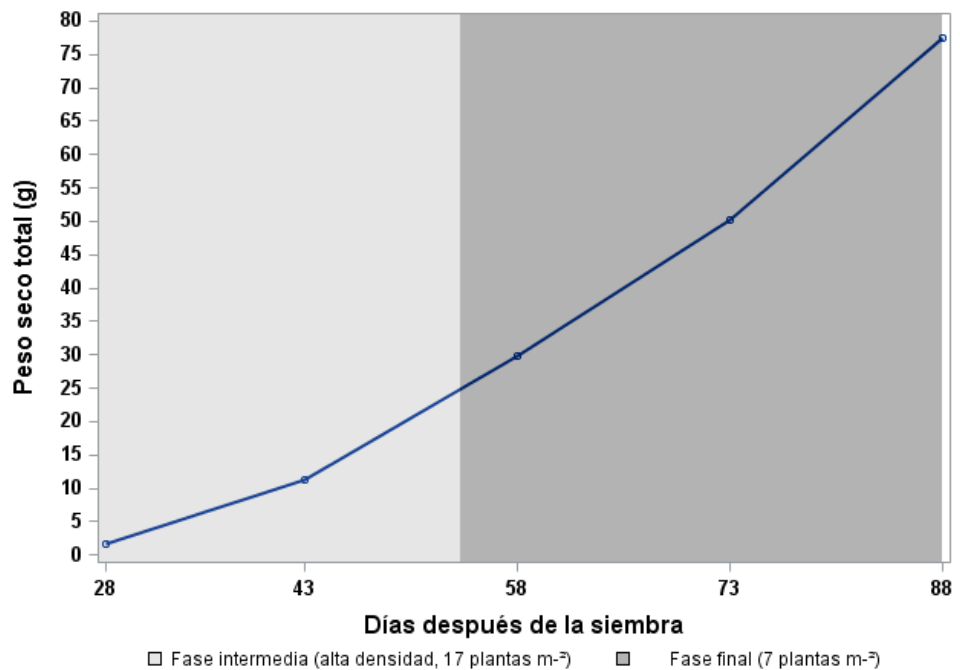


Figura 11. Peso seco total de planta promedio de las cinco variedades de pepino a lo largo del ciclo de cultivo.

La prueba de Tukey no detectó diferencias significativas en la Tasa de Asimilación Neta (TAN) entre las variedades en ninguno de los intervalos evaluados ($P = 0.05$). No obstante, se presenta el cuadro de resultados para mostrar los valores promedio de la TAN por variedad en cada intervalo de tiempo, con el propósito de mostrar las tendencias relativas entre ellas, aún en ausencia de diferencias estadísticamente significativas. (Cuadro 3.5).

Cuadro 3.5. Comparaciones de medias para la tasa de asimilación neta en cinco variedades de pepino.

Variedad	Tasa de asimilación neta (g m ⁻² día ⁻¹)			
	28 – 43 dds	43 – 58 dds	58 – 73 dds	73 – 88 dds
‘Altaria’	5.81 a ^z	4.76 a	4.31 a	4.97 a
‘Anaconda’	7.04 a	5.61 a	3.44 a	6.28 a
‘Centauro’	6.98 a	4.76 a	4.35 a	6.66 a
‘Coatzin’	6.52 a	5.17 a	4.66 a	6.39 a
‘Swayne’	5.82 a	5.86 a	5.03 a	5.22 a
DMSH	1.63	2.67	3.70	4.06

dds: días después de la siembra. DMSH: Diferencia mínima significativa honesta. ^z: Valores con letra diferente dentro de columnas, son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P = 0.05$).

La gráfica correspondiente a la TAN, mostró la dinámica de la ganancia de materia seca por unidad de área foliar y por unidad de tiempo, promediada entre las cinco variedades (Figura 12). Se observó que al inicio de la fase intermedia de alta densidad (intervalo de 28 a 43 dds), la ganancia promedio de materia seca por m² de hoja, fue de 6.4 g por día, mientras que para la parte final de esta fase intermedia (43-58 dds), la ganancia promedio de materia seca por día fue de 5.2 g, 1.2 g menos que en el intervalo anterior. Al inicio de la fase final, donde las plantas se reubicaron a una menor densidad de población, en el intervalo de 58 a 73 días dds, la ganancia promedio de materia seca por m² de hoja por día fue menor que en los demás intervalos. Al final de esta fase, la ganancia promedio de peso seco por m² de hoja por día, aumentó a 5.9 g.

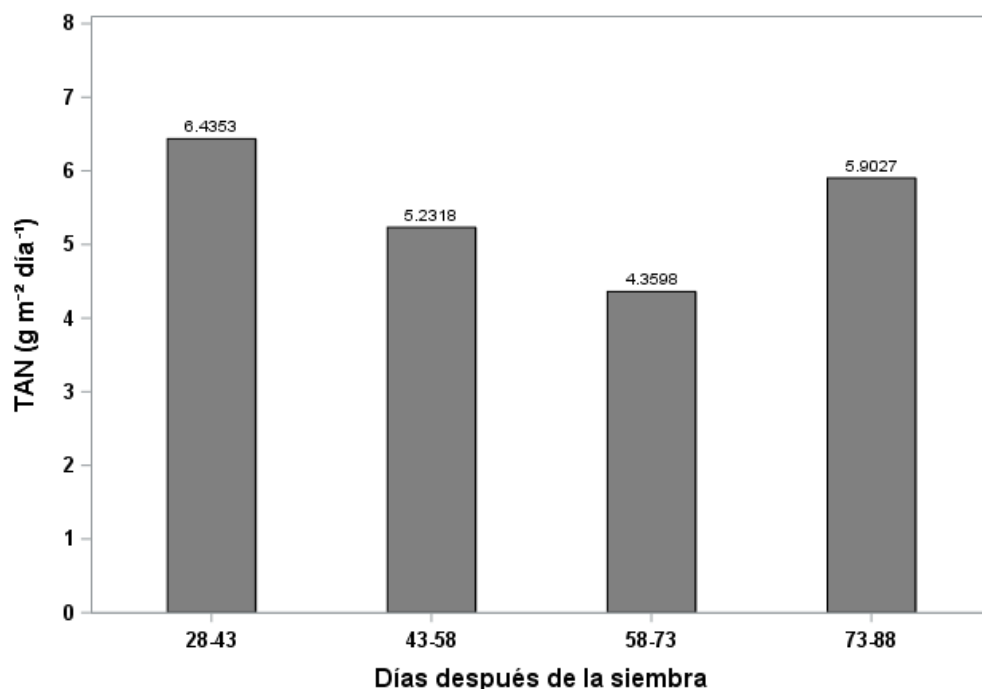


Figura 12. Tasa de asimilación neta (TAN) promedio de cinco variedades de pepino a lo largo del ciclo de cultivo.

En relación a la tasa de crecimiento del cultivo (TCC), la prueba de tukey no detectó diferencias significativas entre las variedades ($P = 0.05$) en los diversos intervalos de tiempo (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.6. Comparaciones de medias para la tasa de crecimiento del cultivo en cinco variedades de pepino.

Variedad	Tasa de crecimiento del cultivo (g m ⁻² día ⁻¹)			
	28 - 43 dds	43 - 58 dds	58 - 73 dds	73 - 88 dds
'Altaria'	14.76 a ^z	19.22 a	13.59 a	13.69 a
'Anaconda'	18.99 a	25.02 a	10.77 a	18.63 a
'Centauro'	18.89 a	19.54 a	12.50 a	19.13 a
'Coatzin'	18.64 a	21.32 a	15.04 a	21.93 a
'Swayne'	15.68 a	24.63 a	16.03 a	17.96 a
DMSH	8.87	10.97	11.38	11.74

dds: Días después de la siembra. DMSH: Diferencia mínima significativa honesta. ^z: Valores con letra diferente dentro de columnas, son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P = 0.05$).

La gráfica de la TCC (Figura 13) mostró que, durante la primera mitad del periodo de la fase intermedia de alta densidad, de los 28 a los 43 dds, el cultivo creció en promedio $17 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ en peso seco, mientras que durante el periodo final de esta fase intermedia (43 a 58 dds) lo hizo a una tasa de $22 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ($5 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ más). Al cambiar a la fase final, donde hubo disminución de la densidad de población y, en consecuencia, del IAF, el crecimiento del cultivo disminuyó a un promedio de $13.6 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ de los 58 a los 73 dds, para luego, al final de esta fase, acelerar su crecimiento a un promedio de $18 \text{ g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$.

Estos resultados concordaron con lo señalado por Aguilar-García et al. (2005) en el sentido de que, al aumentar el IAF, la TAN promedio disminuye, pero la TCC aumenta y viceversa.

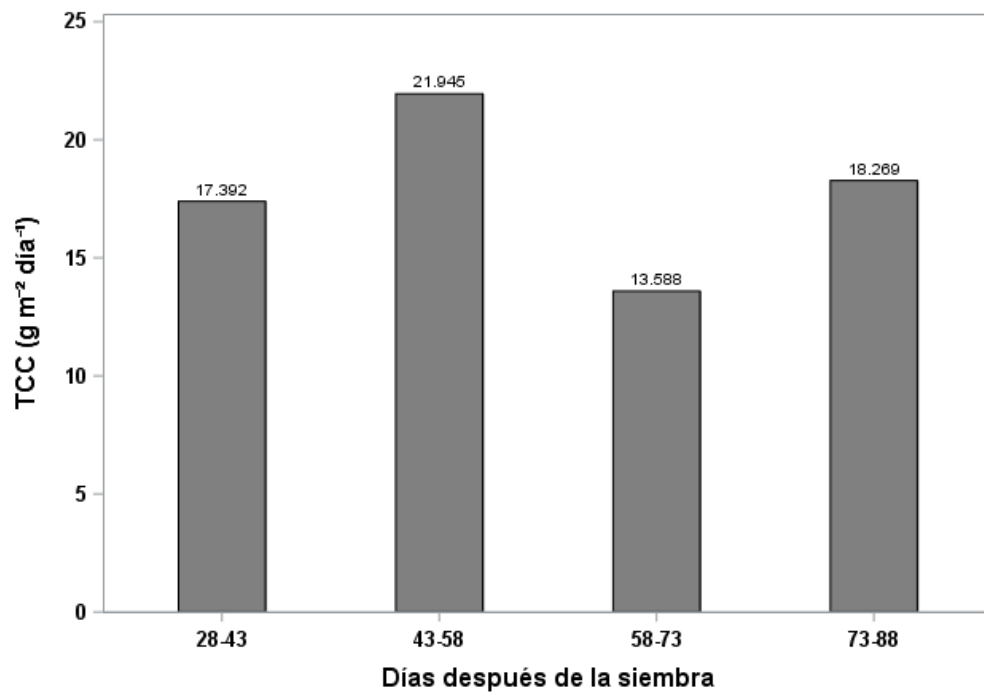


Figura 13. Tasa de Crecimiento del Cultivo (TCC) promedio de cinco variedades de pepino en intervalos a lo largo del ciclo de cultivo.

Los análisis respecto a la cosecha, se realizaron tomando en cuenta los cinco cortes realizados a los 59, 64, 68, 77 y 88 dds. Las variables analizadas fueron:

número de frutos por m² de invernadero, peso medio de frutos, rendimiento total por m² de invernadero e índice de cosecha (IC). El número promedio de frutos por m² fue de 37, con un peso medio de 221 g por fruto, un rendimiento por m² de invernadero de 8.16 kg y un índice de cosecha de 0.63.

Las comparaciones de medias (Cuadro 3.7) indicaron diferencias significativas entre variedades. ‘Altaria’ presentó estadísticamente menos frutos por m² que las otras cuatro variedades evaluadas. ‘Coatzin’ fue la variedad que tuvo el mayor peso de fruto con 244 g, difiriendo estadísticamente de ‘Anaconda’ con 205 g. Sin embargo, hay que considerar que, en el caso del pepino, los frutos se cosechan antes de alcanzar su madurez fisiológica y su peso dependerá de los días que permanezca en la planta antes de su cosecha (López-Elías et al., 2015).

En cuanto al rendimiento por unidad de superficie, también fue ‘Coatzin’ la que presentó el valor más alto (9.81 kg m⁻²), difiriendo estadísticamente de las demás variedades, excepto de ‘Centauro’ que rindió 8.66 kg m⁻². La variedad con menos producción fue ‘Altaria’ y finalmente, se observó que las variedades Centauro, Coatzin y Anaconda registraron los mayores valores de índice de cosecha, difiriendo estadísticamente de ‘Swayne’ con el menor valor.

Cuadro 3.7. Comparaciones de medias del análisis de varianza de la proyección del rendimiento del cultivo.

Variedad	frutos por m ²	Peso por fruto (g)	Rendimiento kg m ²	Índice de Cosecha
‘Altaria’	28 b ^z	226 ab	6.32 c	0.62 ab ^z
‘Anaconda’	39 a	205 b	7.85 b	0.64 a
‘Centauro’	40 a	216 ab	8.66 ab	0.67 a
‘Coatzin’	40 a	244 a	9.81 a	0.64 a
‘Swayne’	39 a	212 ab	8.14 b	0.59 b
DMSH	7.20	35	1.46	0.05

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta. ^z: Valores con letra diferente dentro de columnas, son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P = 0.05$).

Se observó el rendimiento acumulado por corte durante el periodo de cosecha (Figura 14). A partir de los 68 dds (corte tres), la tendencia al alza se acentuó en todas las variedades, mostrando un incremento más pronunciado en la variedad Coatzin desde esa fecha de corte hasta el último día (88 dds), que fue la variedad más productiva. La variedad Anaconda mostró valores altos de rendimiento (pero por debajo de 'Coatzin'), desde los 59 hasta los 77 dds y posteriormente, el rendimiento disminuyó a los 88 días. La variedad Centauro mantuvo un incremento más constante ocasionando que al final de la cosecha, su rendimiento acumulado fuera mayor que el de 'Anaconda', posicionándose como la segunda variedad más productiva. 'Swayne' y 'Altaria' tuvieron los rendimientos más bajos por corte, no obstante, 'Swayne' tuvo un aumento en su producción a los 88 dds mientras que 'Altaria' se mantuvo con valores de rendimiento bajos pero constantes.

De estos resultados, cabe destacar el potencial de alto rendimiento anual que puede tener el sistema de producción de tres fases que se propone en este trabajo de investigación. El rendimiento promedio de un ciclo de cultivo bajo sistema convencional de producción de pepino en invernadero de mediana tecnología oscila entre 150 y 200 t ha⁻¹ (López-Elías et al., 2015; Chacón-Padilla & Monge-Pérez, 2020) con un máximo de tres ciclos por año que se pueden lograr, lo que representa un rendimiento potencial anual de 600 t ha⁻¹.

Bajo el sistema de tres fases, el rendimiento de un ciclo de cultivo de la variedad Coatzin fue de 9.81 kg m⁻² equivalente a 98 ton ha⁻¹, pero con una duración de la fase final de sólo 30 días, bajo condiciones de invernadero de mediana tecnología, es posible obtener 10 ciclos de producción al año con un potencial cercano a 1000 t ha⁻¹, casi el doble del rendimiento en comparación con el sistema convencionalmente utilizado para la producción de pepino bajo invernadero.

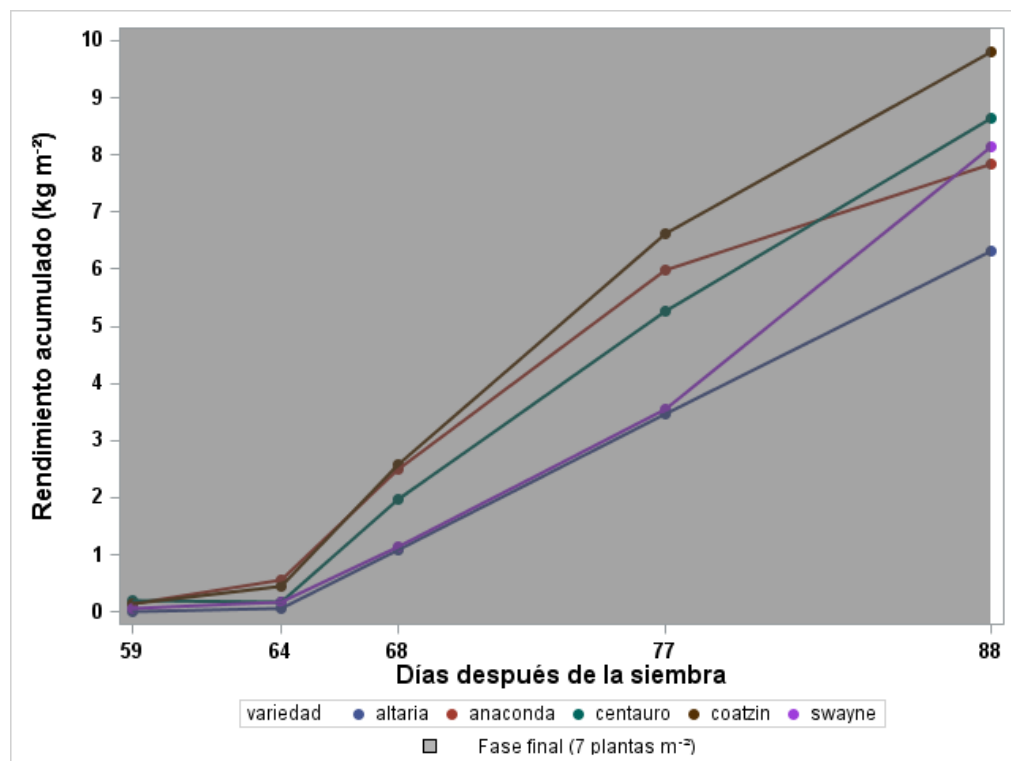


Figura 14. Rendimiento acumulado de los cinco cortes de frutos por m² de invernadero en cinco variedades de pepino.

3.4 Conclusiones

Aunque hubo algunas diferencias entre variedades en cuanto a variables morfológicas y de peso seco, las variedades se comportaron agronómicamente de manera similar, por lo que se considera que estas diferencias no influyeron de manera significativa en el rendimiento final. De cualquier manera, se considera importante evaluar el comportamiento de más variedades con relación al sistema de producción basado en tres fases de cultivo.

Las cinco variedades, despuntadas a 1.2 m de altura, completaron su ciclo de siembra a cosecha en 88 días con una fase final de producción de 30 días, lo que da un potencial de hasta 12 ciclos de cultivo al año con el sistema de producción basado en tres fases de cultivo; sin embargo, los índices de área foliar en el semillero los días previos al trasplante, y al final de la etapa intermedia alcanzaron valores elevados que pueden influir negativamente en el crecimiento posterior,

por lo que se sugiere realizar experimentos encaminados a precisar la duración máxima que pueden tener estas fases sin menoscabo del rendimiento por ciclo, aunque signifique el reducir el número de ciclos posibles de cultivo al año. El objetivo sería maximizar el rendimiento anual o, mejor dicho, la ganancia económica del productor por año.

Bajo el sistema de tres fases de cultivo, 'Coatzin' fue la variedad más productiva con un rendimiento de 9.81 kg m⁻² en un ciclo; con el despunte de las plantas a 1.2 m de altura, ocupó sólo 34 días de fase final de producción, mostrando un potencial anual de más de 10 ciclos de cultivo al año bajo condiciones de invernaderos que cuenten con un control ambiental adecuado, lo que equivale a una productividad posible de casi 100 kg m⁻² año⁻¹.

3.5 Literatura citada

- Aguilar-García, L., Escalante-Estrada, J. Alberto., Fucikovsky-Zak, L., Tijerina-Chávez, L., & Mark Engleman, E. (2005). Área foliar, tasa de asimilación neta, rendimiento y densidad de población en girasol. *Terra Latinoamericana*, 23(3), 303-310
- Aluko, O. O., Li, C., Wang, Q., & Liu, H. (2021). Sucrose utilization for improved crop yields: A review article. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(9), 1-29.
- Antonietta, M. A. (2013). *Impacto de la senescencia foliar sobre la producción de fotoasimilados y el rendimiento de maíz (Zea mays L.) bajo condiciones de estrés abiótico* (Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata).
- Bihmidine, S., Hunter III, C. T., Johns, C. E., Koch, K. E., & Braun, D. M. (2013). Regulation of assimilate import into sink organs: Update on molecular drivers of sink strength. *Frontiers in Plant Science*, 4(177), 1-15.
- Camarena, B. J. G. (2002). *Acortamiento del ciclo de cultivo del pepino europeo mediante despuntes tempranos* (Tesis profesional, Universidad Autónoma Chapingo). Departamento de Fitotecnia.
- Chacón-Padilla, K., & Monge-Pérez, J. E. (2020). Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo invernadero: Comparación entre tipos de pepino. *Revista Tecnología En Marcha*, 33(1), 17-35.

- Chen, T.W., Stützel, H., & Wien, H. C. (2020). The cucurbits. In H. C. Wien & H. Stützel (Eds.), *The physiology of vegetable crops* (pp. 244-270). CABI publishing.
- Fernández, J. E., & Cuevas, M. V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(2), 135-151.
- Flores, O. A. D. (2013). *Efecto de la edad de trasplante en el crecimiento y rendimiento de pepino, jitomate y pimiento hidropónico bajo Invernadero* (Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo). Departamento de Fitotecnia.
- Gao, S., Niu, Z., Huang, N., & Hou, X. (2013). Estimating the leaf area index, height and biomass of maize using Hj-1 and RADARSAT-2. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 24(1), 1-8.
- Hoyos G. D., Morales O. J. G., Chavarría A. H., Montoya R. A. P., Correa L. G., & Jaramillo V. S. D. C. (2012). Acumulación de grados-día en un cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en un modelo de producción aeropónico. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 65(1), 6389-6398.
- Kozłowski, T. T. (1967). Diurnal variations in stem diameters of small trees. *Botanical Gazette*, 128(1), 60-68.
- León-Burgos, A. F., Cortes, G. Y. B., Pérez, A. L. B., & Balaguera-López, H. E. (2021). Distribución de fotoasimilados en los órganos vertederos de plantas Solanaceas, caso tomate y papa. Una revisión. *Ciencia y Agricultura*, 18(3), 79-97.
- López-Elías, J., Ortega, S. G., López, M. A. H., León, J. J., Puente, E. O. R., & Amador, B. M. (2015). Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) en función de la densidad de plantación en condiciones de invernadero. *European Scientific Journal*, 11(24), 25-36.
- Martínez, A. K. (2022). *Comportamiento agronómico de plantas de jitomate establecidas en un arreglo de dosel escaleriforme en periodos de alta densidad de población* (Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo). Departamento de Fitotecnia.
- New South Wales Government. (2019). *Greenhouse cucumber production* (224 p.). Industry and Investment. New South Wales, Australia.
- Ortiz, C. J., Sánchez, del C. F., Mendoza, C. M., & Torres, G. A. (2009). Características deseables de plantas de pepino crecidas en invernadero e hidroponía en altas densidades de población. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(4), 289-294.
- Osorio, S., Ruan, Y. L., & Fernie, A. R. (2014). An update on source-to-sink carbon partitioning in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 5(516), 1-11.
- Sánchez, Del C. F., & Moreno, P. E del C. (2017a). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo, México.

- Sánchez, Del C. F., Moreno, P. E del C., Contreras, M. E., & Vicente, G. E. (2006). Reducción del ciclo de crecimiento en pepino europeo, mediante trasplante tardío. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2), 87-90.
- Sánchez, Del C. F., Bastida, C. O. A., Moreno, P. E del C., Contreras, M. E., & Sahagún, C. J. (2014). Rendimiento de jitomate con diferentes métodos de cultivo hidropónico basados en doseles escaleriformes. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 20(3), 239-251.
- Santos, C. M., Segura, A. M., & Núñez, L. C. E. (2010). Análisis de crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1), 5253-5266.
- SAS Institute Inc. (2023). *SAS software* (Versión 9.4) [Software de computadora]. SAS Institute Inc.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). *Anuario estadístico de la producción agrícola* (2025). SAGARPA. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/ [Consulta: 25 de marzo de 2025].
- Silva, A. G. E. (2021). *Híbridos de jitomate sometidos a periodos de alta densidad de población en condiciones de invernadero* (Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo).
- Villafuerte, M. A. (2022). *Poda selectiva de hojas en plantas de jitomate sometidas temporalmente a alta densidad de población* (Tesis de maestría, Universidad Autónoma Chapingo).
- Villegas, V. A. (1999). *Efectos de la edad de trasplante y despunte temprano en la precocidad y rendimiento de pepino (Cucumis sativus L.)* (Tesis profesional, Universidad Autónoma Chapingo).
- Zamora, E. (2017). *El cultivo de pepino tipo slicer – americano (Cucumis sativus L.) bajo cubiertas plásticas* (pp. 1-8). Universidad de Sonora. Departamento de Agricultura y Ganadería.