



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

COORDINACIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



**COMPARACIÓN DE SUSTRATOS HIDROPÓNICOS CON
VOLUMEN LIMITADO PARA UN SISTEMA INTENSIVO DE
PRODUCCIÓN DE PEPINO**

TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

Luisa Fernanda Rios Navarrete

Bajo la dirección del Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez



APROBADA



Chapingo, Estado de México, mayo de 2025

**COMPARACIÓN DE SUSTRATOS HIDROPÓNICOS CON VOLUMEN
LIMITADO PARA UN SISTEMA INTENSIVO DE PRODUCCIÓN DE PEPINO**

Tesis realizada por **Rios Navarrete Luisa Fernanda** bajo la supervisión del
Comité Asesor Indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



DR. ESAÚ DEL CARMEN MORENO PÉREZ

ASESOR:



DR. FELIPE SÁNCHEZ DEL CASTILLO

ASESOR:



DR. J. JESÚS MAGDALENO VILLAR

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
DATOS BIOGRÁFICOS	viii
COMPARACIÓN DE SUSTRATOS HIDROPÓNICOS CON VOLUMEN LIMITADO PARA UN SISTEMA INTENSIVO DE PRODUCCIÓN DE PEPINO ..	ix
ABSTRACT	x
COMPARISON OF HYDROPONIC SUBSTRATES WITH LIMITED VOLUME FOR A INTENSIVE CUCUMBER PRODUCTION SYSTEM	x
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL	1
BIBLIOGRAFÍA	4
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA	6
1. Importancia del cultivo	6
2. Producción convencional de pepino	6
3. Producción intensiva de pepino	7
4. Características deseables en las plantas bajo el sistema de altas densidades	10
5. Cultivo en sustrato	10
6. Propiedades físicas de los sustratos	12
7. Propiedades químicas de los sustratos	13
8. Efecto del volumen de sustrato o contenedor	14
BIBLIOGRAFÍA	15
CAPÍTULO 3: INTRODUCCIÓN	15

MATERIALES Y MÉTODOS	17
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	25
CONCLUSIONES.....	37
BIBLIOGRAFÍA.....	38

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Propiedades físicas de los sustratos previas al inicio del ciclo de producción.	20
Cuadro 2. Variables registradas en plántulas de pepino variedad Centauro al finalizar la Fase I (producción de plántula en semillero).	25
Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza de variables evaluadas a los 15 días después del trasplante (mitad de la fase intermedia) en plantas de pepino, variedad Centauro.	26
Cuadro 4. Comparación de medias de las variables evaluadas a los 15 días después del trasplante (mitad de la fase intermedia) en plantas de pepino, variedad Centauro.	26
Cuadro 5. Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables evaluadas a los 60 días después de la siembra (30 días después del trasplante y fin de la fase intermedia) en plantas de pepino, variedad Centauro.	27
Cuadro 6. Comparación de medias de las variables evaluadas a los 60 días después de la siembra (30 días después del trasplante y final de la fase intermedia) en plantas de pepino, variedad Centauro.	28
Cuadro 7. Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables evaluadas a los 90 días después de la siembra (60 días después del trasplante y término de la fase final de producción) en plantas de pepino, variedad Centauro.	29
Cuadro 8. Comparación de medias de las variables evaluadas a los 90 días después de la siembra (60 días después del trasplante y término de la fase de producción) en plantas de pepino, variedad Centauro.	30
Cuadro 9. Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables de rendimiento evaluadas a los 90 días después de la siembra (término de la fase final de producción) en plantas de pepino, variedad Centauro.	31
Cuadro 10. Comparación de medias de las variables de rendimiento evaluadas a los 90 días después de la siembra trasplante (término de la fase final de producción) en plantas de pepino, variedad Centauro.	32
Cuadro 11. Comparación de las propiedades físicas al inicio y al final ciclo de cultivo.	35

Cuadro 12. Propiedades químicas de los sustratos al finalizar el ciclo de producción.	35
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Acomodo a cinco hileras a 20 cm entre hilera y entre plantas (fase intermedia).....	19
Figura 2. Comportamiento de la Temperatura (°C) y Humedad Relativa (%) en las distintas fases de desarrollo del cultivo.....	23
Figura 3. Comportamiento de la temperatura (°C) de los sustratos en diferentes horas del día durante la fase intermedia (de alta densidad).....	36
Figura 4. Comportamiento de la temperatura (°C) de los sustratos en diferentes horas del día durante la fase intermedia (de alta densidad).....	37

DEDICATORIA

*“Acepta los retos para sentir la euforia del triunfo”
(George S. Patton).·*

Con todo mi amor y cariño a mis padres Fernando Rios Huerta y Ma. del Socorro Navarrete Carrola, quienes siempre me han enseñado que vale la pena esforzarse por todo aquello a lo que aspiramos, gracias por su apoyo y acompañamiento durante esta etapa de mi vida.

A mis hermanos que siempre estuvieron para mí, brindándome palabras de aliento para salir adelante.

A mis amigos y colegas que celebran mis logros y me motivan a superarme día con día.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia quienes son mi mayor inspiración, por el apoyo y motivación para culminar mis estudios y seguir preparándome profesionalmente.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el otorgamiento de la beca para la realización de mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), por brindarme la oportunidad de estudiar y enriquecer mis conocimientos para desenvolverme personal y profesionalmente.

Al comité asesor con quienes ha sido un honor trabajar: Al Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez, al Dr. Felipe Sánchez del Castillo y al Dr. J. Jesús Magdaleno Villar por brindarme orientación, por compartir sus conocimientos, experiencias y encaminarme durante el desarrollo de la investigación.

Con una mención especial al Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez, quien dirigió la tesis, gracias por la disposición y los conocimientos que me transmitió para la ejecución del trabajo de investigación.

Al Sr. Luis Angel Romero Rivero, por su colaboración en la fase de investigación en campo.

A mis colegas y amigos del posgrado por el apoyo, la disposición y las palabras de aliento durante esta etapa.

DATOS BIOGRÁFICOS

Luisa Fernanda Rios Navarrete, nació el 22 de mayo de 1999 en el estado de Durango, realizó sus estudios de bachillerato en el Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 152 “Lauro L. Méndez” en Apan, Hidalgo, sus estudios universitarios en la Universidad Politécnica de Tlaxcala Región Poniente en San Ildefonso Hueyotlipan, Tlaxcala, graduada en diciembre de 2020 como Ing. Agrotecnología. Durante el periodo de 2021-2022, inicio a laborar para una empresa dedicada a la comercialización de productos agroquímicos, fertilizantes y semillas. En el periodo 2023-2024, realizó estudios a nivel Maestría en el Posgrado de Horticultura del Departamento de Fitotecnia, en la Universidad Autónoma Chapingo.



COMPARACIÓN DE SUSTRATOS HIDROPÓNICOS CON VOLUMEN LIMITADO PARA UN SISTEMA INTENSIVO DE PRODUCCIÓN DE PEPINO

RESUMEN

Actualmente se está desarrollando un sistema altamente intensivo de producción de pepino (*Cucumis sativus L.*) en hidroponía bajo invernadero, con la finalidad de maximizar la productividad anual. Consiste en despuntar a las plantas a 1.2 m de altura y de un manejo de tres fases del cultivo: semillero, fase intermedia (de alta densidad de población) y fase final de producción. El objetivo fue comparar el efecto de diferentes sustratos colocados en un contenedor limitado a un volumen de 8 L, sobre el crecimiento y rendimiento de plantas de pepino bajo el sistema de tres fases mencionado. El diseño experimental fue bloques completos al azar con ocho tratamientos (Tezontle, Tepojal, Perlita, Vermiculita, Fibra de coco, Aserrín de pino compostado, Mezcla de Peat moss + Vermiculita + Perlita y Mezcla de Tepojal + Perlita), cuatro repeticiones y 15 plantas como unidad experimental. Al final de la fase intermedia no hubo efecto de tratamientos para las variables morfológicas. El ciclo de cultivo se terminó a los 90 días después de la siembra, con una fase final de producción que duró solamente 30 días, donde el mayor rendimiento obtenido fue de 1.4 kg planta⁻¹ (10.3 kg m⁻² de invernadero) al utilizarse como sustrato, la mezcla de Peat moss + Vermiculita + Perlita. Con invernaderos en donde se tiene control climático o en localidades con un clima benigno para el cultivo de pepino, con este sistema, es posible lograr hasta 12 ciclos de cultivo al año, con un rendimiento potencial anual de alrededor de 123 kg m⁻² año⁻¹ (1200 t ha⁻¹ año⁻¹).

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

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Luisa Fernanda Rios-Navarrete.
Director de tesis: Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez.

ABSTRACT

COMPARISON OF HYDROPONIC SUBSTRATES WITH LIMITED VOLUME FOR A INTENSIVE CUCUMBER PRODUCTION SYSTEM

A highly intensive cucumber (*Cucumis sativus* L.) production system is currently being developed in hydroponics under greenhouse conditions, with the aim of maximizing annual productivity. This system involves topping the plants at 1.2 m in height and managing three cultivation phases: seedling, intermediate phase (with high population density), and final production phase. The objective was to compare the effect of different substrates placed in containers limited to a volume of 8 L, on the growth and yield of cucumber plants under the mentioned three-phases system. The experimental design was a randomized complete block with eight treatments (Tezontle, Tepojal, Perlite, Vermiculite, Coconut fiber, Composted pine sawdust, a mixture of Peat moss + Vermiculite + Perlite, and a mixture of Tepojal + Perlite), four replications, and 15 plants as the experimental unit. At the end of the intermediate phase, there was no treatment effect on the morphological variables. The crop cycle ended 90 days after sowing, with a final production phase lasting only 30 days, during which the highest yield obtained was 1.4 kg per plant (10.3 kg m⁻² of greenhouse) using the Peat moss + Vermiculite + Perlite mixture as the substrate. In greenhouses with climate control or in locations with

a favorable climate for cucumber cultivation, this system allows up to 12 cropping cycles per year, with an annual potential yield of approximately $123 \text{ kg m}^{-2} \text{ year}^{-1}$ ($1200 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$).

Keywords: *Cucumis sativus* L., substrates, protected agriculture, three-phase production system, population density.

Thesis o Master in Science in Horticulture, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: Luisa Fernanda Rios-Navarrete.
Thesis Advisor: Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

La productividad agrícola en México enfrenta una serie de desafíos, principalmente derivados de la topografía accidentada, la escasez de agua, las heladas y otros fenómenos climáticos que ponen en riesgo la actividad. Ante estas limitaciones, los sistemas de producción intensivos como los invernaderos y la hidroponía representan opciones tecnológicas viables para aumentar la producción y asegurar la alimentación (Sánchez & Moreno, 2017).

Los sistemas de producción intensivos como los invernaderos y la hidroponía requieren una inversión inicial considerable; la Asociación Mexicana de Horticultura Protegida [AMHPAC], (2018) destacaron que estas tecnologías se basan en el uso permanente de mano de obra, pero al cultivar productos de alto rendimiento y valor económico, incluso en pequeñas superficies, se puede generar una ganancia económica importante para el productor.

La combinación de invernaderos tecnificados, que permiten un control preciso del clima, y la 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 100% 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, 2017).

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una hortaliza de importancia a nivel nacional y mundial, debido a la versatilidad que presenta en cuanto a manejo agronómico, producción y comercialización; al ser una hortaliza de alto consumo dentro del territorio, permite la generación de empleo ya que es una fuente de ocupación de una gran cantidad de mano de obra (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2020). En México, alrededor del 60 % de su producción se concentra en tres entidades: Sinaloa, Sonora y Michoacán, y a nivel mundial México se encuentra posicionado en el sexto lugar (SIAP, 2020).

En 2019, las exportaciones de pepino ascendieron a 776 mil toneladas, el 98.2 % dirigidas a Estados Unidos y el 1.2 % a Canadá (Rebollar et al., 2022). La producción promedio de esta hortaliza en los últimos años se mantuvo en crecimiento, y para 2022 se logró producir 1 millón 29 mil toneladas (SIAP, 2024).

El sistema de producción de pepino que predomina en los invernaderos de México consiste en el establecimiento de las plantas a densidades de población de 1.5 a 3 plantas·m⁻² en las que se dejan crecer a más de 3 m de altura en un ciclo de cultivo de 5 a 7 meses. Con este manejo, la fructificación se da en “sets”, es decir, primero se forman y amarran unos 8 a 12 frutos, los frutos subsecuentes (unos 4 ó 5) abortan por falta de azúcares y agua que los primeros están consumiendo. Una vez que estos primeros alcanzan su tamaño comercial y son cosechados, entonces nuevamente hay amarre y crecimiento de otros 6 a 8 frutos (segundo set de producción), y así sucesivamente, donde regularmente se conducen unos tres flujos de cosecha en los seis meses que dura el ciclo (Wien, 1999; NSW government, 2019). Se logra un rendimiento promedio que fluctúa de 150 a 300 t ha⁻¹ al año en dos ciclos de cultivo (Ortiz et al., 2009). Kaiser et al. (2024) mencionan que la estacionalidad de producción es un factor para alcanzar rendimientos altos en un solo ciclo.

Alternativamente, en la Universidad Autónoma Chapingo, se ha desarrollado un sistema de manejo del pepino que consiste en establecer las plantas a densidades de población de 6 plantas m⁻² de invernadero, con poda de ápice de crecimiento cuando han alcanzado una altura de 1.2 a 1.5 m (Ortiz et al., 2009). El trasplante se hace con plántulas de 25 a 30 días de edad, crecidas en charolas de 60 cavidades, un ciclo de trasplante a fin de cosecha dura solamente 60-70 días, por lo que es posible obtener hasta 5 ciclos de cultivo al año, con rendimientos promedios por ciclo de 12 kg m⁻², que equivale a 600 t ha⁻¹ año⁻¹ si se establecen los cinco ciclos de cultivo al año (Sánchez et al., 2021), en condiciones climáticas muy favorables o en invernaderos con control del clima agronómicamente bien diseñados (Sánchez & Moreno, 2017).

Ortiz et al. (2009), señalaron que con este sistema se cosecha solamente el primer set de producción con un rendimiento de aproximadamente 2 kg planta⁻¹ (12 kg m⁻²), es decir, 120 t ha⁻¹ en un ciclo de 90 días de trasplante a fin de cosecha, por lo que es posible establecer al menos tres ciclos al año, con un rendimiento potencial de 360 t ha⁻¹ año⁻¹.

Además, recientemente se está estudiando la posibilidad de obtener un mayor número de ciclos de cultivo al año, mediante la reducción del periodo de tiempo que el cultivo permanece en el invernadero de producción en cada ciclo. Este sistema resulta más intensivo y productivo, pero hace falta optimizarlo. El sistema consta de tres etapas o fases: una primera fase de plántula en semillero (fase inicial); una segunda fase (fase intermedia) en la que las plántulas son trasplantadas a macetas y manejadas a una alta densidad de población (18 plantas·m⁻²) y una tercera fase (fase final de producción), en la que las plantas son reubicadas en el invernadero de producción para dejarlas a una densidad de 6 a 7 plantas·m⁻² de invernadero. Cada fase dura 30 días, incluyendo la fase final de producción, que daría la posibilidad de obtener por lo menos 10 ciclos de cultivo al año e incluso hasta 12 ciclos. En este caso, la fase inicial e intermedia de alta densidad de población ocupa un espacio adicional de invernadero de aproximadamente una cuarta parte más del invernadero de producción, pero la alta producción que se puede lograr compensa el gasto al que se incurre por el espacio adicional requerido.

Un problema que presenta la fase intermedia es que requiere mantener una alta densidad (18 plantas·m⁻²) durante 30 días para luego reubicar las plantas con todo y contenedor y tutor a una densidad de 6 a 7 plantas m⁻² en el invernadero de producción final. Esta situación condiciona al sistema a requerir de contenedores móviles (bolsas o macetas) y con volumen limitado (hasta 8 L de capacidad), por lo que se requiere de sustratos con propiedades que garanticen a la raíz las condiciones adecuadas aún con esa restricción de volumen.

Bajo este sistema, el sustrato deberá poseer características físicas y químicas que den a la raíz las condiciones ambientales más favorables para su crecimiento

y desarrollo (Cabrera, 1999; Urrestarazu, 2015). En este sentido, un aspecto también relevante, es el volumen de sustrato o volumen del contenedor en que crecen las plantas. Luna et al. (2012), mencionaron que el tamaño y el tipo de contenedor determina la cantidad de agua y nutrientes minerales que estarán disponibles para el crecimiento de una planta, de la misma forma se deben tomar consideraciones como: tamaño (volumen, profundidad y diámetro), forma, densidad y orificios de drenaje.

Con base en lo anterior, se llevó a cabo la presente investigación con el objetivo de comparar el efecto de diferentes sustratos colocados en un contenedor limitado a un volumen de 8 L, sobre el crecimiento y rendimiento de plantas de pepino manejadas en un sistema de tres fases de cultivo.

Se plantea la hipótesis de que las características físicas y químicas de los sustratos seleccionados permitirán que las plantas muestren un comportamiento agronómico similar para la producción de pepino bajo este sistema.

Con los resultados que se obtengan, se espera obtener criterios objetivos para sugerir los sustratos más idóneos para un manejo de pepino en tres fases de cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Asociación Mexicana de Horticultura Protegida. (2018). Agricultura Protegida en México. <http://.org/2018/images/PDFoficial/Horticulturaen Mexico.pdf>
- Cabrera, R. (1999). Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5(1),5-11. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.1998.03.025>.
- Kaiser, P. A., García, S. J. A. & Mora, F. J. S. (2024). Planeación de la superficie sembrada para evitar la volatilidad de precios de pepino en México. *Estudios Sociales. Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*, 33(62), Artículo e231313.

- Luna, T., Landis, D. T. & Kasten, D. R. (2012). Contenedores: Aspectos técnicos, biológicos y económicos. In L. Contardi, H. Gonda, G. Tolone, & J. Salimbeni (Eds.), *Producción de plantas en viveros forestales. Consejo Federal de Inversiones* (pp. 79-85). Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco UNPSJB; Comodoro Rivadavia: Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico. <https://www.researchgate.net/publication/272790749> Contenedores aspectos tecnicos biologicos y economicos
- Ortiz, C. J., Sánchez, Del C. F., Mendoza, C. M del C. & Torres, G. A. (2009). Características deseables de plantas de pepino crecidas en invernadero e hidroponía en altas densidades de población. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 32(4), 289-294. <https://doi.org/10.35196/rfm.2009.4.289-294>
- Rebollar, R. S., Ramírez, A. O. & Hernández, M. J. (2022). Competitividad y valor agregado de pepino persa (*Cucumis sativus* L.) en agricultura por contrato: estudio de caso. *Terra Latinoamericana*, 40, Article e952. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.952>
- Sánchez, D. C. F. & Moreno, P. E. C. (2017). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Sánchez, Del C. F., Portillo, M. L., Moreno, P. Del C. E., Magdaleno, V. J. J. & Vázquez, R. J. C. (2021). Efectos del volumen de contendor y densidad de plántula sobre el trasplante tardío y número de flores en jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(2), 71-84. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.015>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2020). De la familia de las cucurbitáceas, el pepino es el consentido. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). El pepino y su vocación exportadora. <https://www.gob.mx/siap/es/articulos/el-pepino-y->

suvoacionexportadora#:~:text=Se%20estima%20que%20la%20derrama
.en%20la%20producci%C3%B3n%20de%20pepino.

- Urrestarazu, G. M. (2015). Manual práctico sin suelo e hidroponía (1.^a ed.). Mundi-Prensa. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1940.0724>
- Wien, H. C. (1999). The cucurbits: cucumber, melon, squash and pumpkin. In H. C. Wien (Ed). The physiology of vegetable crops (pp.345-386). CABI Pub.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LITERATURA

1. Importancia del cultivo

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una hortaliza que puede producirse todo el año bajo condiciones de invernadero o a campo abierto (Rebollar et al., 2022). En México, cerca del 60 % de la producción se centra en tres entidades Sinaloa, Sonora y Michoacán (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2020).

De acuerdo con el SIAP (2022), México es el mayor exportador de pepino a nivel mundial. Para el año de 2020 su producción fue de 1,159,933,69 toneladas. Cerca del 70 % de la producción se destina al mercado internacional, la mayor parte (98 %) con destino a Estados Unidos.

La demanda de esta hortaliza está en constante crecimiento, por lo que es deseable que los productores mexicanos utilicen sistemas, técnicas y el manejo cultural del cultivo que les permita incrementar la producción y así satisfacer las demandas en los mercados tanto nacional como internacional.

2. Producción convencional de pepino

El sistema de producción de pepino predominante bajo invernadero o casa sombras en México, ha sido importado del Norte de Europa y se caracteriza por el uso de bajas densidades de población (1.5 a 3 plantas·m⁻² de invernadero),

donde las plantas se dejan crecer a más de 3 m de altura y el ciclo de cultivo desde el trasplante hasta el final de la cosecha dura entre cinco y seis meses. En condiciones óptimas de manejo, se pueden obtener rendimientos de hasta 360 toneladas por hectárea por año en dos ciclos de cultivo (Ortiz et al., 2009).

La producción bajo el sistema convencional gira en torno al uso de semillas híbridas. La producción de las plántulas se realiza en semilleros usando charolas de 200 cavidades, utilizando sustrato comercial (perlita y peat moss) que permita un desarrollo óptimo y un anclaje adecuado. El tiempo de la plántula en semillero es de 15 a 20 días, y cuando han desarrollado 4 hojas verdaderas se realiza el trasplante en suelo directo o en sustrato (Zamora, 2017), y se utilizan espaciamientos de 1.5 a 2 m entre hileras y 0.2 a 0.3 m entre plantas (Ayala et al., 2019). En cuanto al manejo, se realiza un entutorado, donde la planta es sostenida verticalmente con rafia o hilo mediante anillos de plástico inmediatamente después del trasplante. Se efectúa un desbrote de ramas basales y se poda cuando alcanzan unos 3 m de altura. Se realiza monitoreo de plagas y enfermedades desde principio a fin del ciclo de producción, la fertilización junto con el riego se hace con cintilla de goteo y finalmente se lleva a cabo la cosecha de frutos con un peso de al menos 250 g (Zamora, 2017).

3. Producción intensiva de pepino

Los sistemas de producción intensivos de cultivos implican el uso de invernaderos y sistemas hidropónicos, donde las plantas son establecidas en altas densidades de población. Los invernaderos, que permiten un control preciso del clima (luz, temperatura, CO₂, humedad relativa, entre otros), y la hidroponía, que optimiza las condiciones del ambiente de la raíz (agua y nutrientes, temperatura, oxigenación, pH y CE, entre otros), representan la tecnología agrícola más avanzada e intensiva que existe a nivel comercial (Sánchez & Moreno, 2017). Además de que se logran altos rendimientos, se obtienen productos de mayor calidad, inocuidad y seguridad al minimizar el riesgo de

pérdidas por eventos climáticos, plagas o enfermedades (Sánchez et al., 2014; López et al., 2015).

Aunque los costos de producción al emplear invernadero e hidroponía son elevados, al seleccionar cultivos de alto rendimiento y valor económico, se pueden generar ganancias económicas suficientes para recuperar el capital invertido en menos tiempo y crear empleos mejor remunerados en el medio rural.

La densidad de plantación es un factor importante para maximizar la producción en los cultivos. En la actualidad, el espaciamiento comúnmente usado en pepino es de 1.5 m entre hileras y 25-30 cm entre plantas (López et al., 2015; Chacón et al., 2020).

Al respecto Ortiz et al. (2009), mencionaron que una vía potencial para incrementar el rendimiento de un cultivo en ambientes poco restrictivos es el aumento de la densidad de población para el rápido establecimiento de un índice de área foliar (IAF) óptimo para la intercepción de energía radiante, que conduce a más rendimiento. El establecimiento de un IAF óptimo se logra mediante la intercepción de energía radiante y la estructura adecuada, para esto, las características son: tallo grueso que se traduce en mayor área de floema y un transporte más eficiente; menor altura de planta, existe un menor gasto de asimilados en elongación, mayor índice de cosecha y menor competencia por radiación; hojas pequeñas, pero fotosintéticamente eficientes ya que propician una mayor tasa de producción de fotoasimilados por unidad de superficie; hábito determinado, tallo sin ramas que reduce la competencia por asimilados entre órganos reproductivos y vegetativos, favorece a los primeros y acorta el ciclo para posibilitar más ciclos de cosechas por año; y 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.

Sánchez & Moreno (2017), mencionaron que para lograr una mayor intercepción de la luz se recurren a técnicas que permitan modificar la intensidad, su difusión y la calidad; para modificar la intensidad basta con seleccionar el porcentaje de

transmisión de la cubierta, cubiertas removibles, mallas de sombreo fijas o móviles o luz suplementaria; la difusión se logra a partir del uso de cubiertas difusoras, pantallas térmicas, telas o mallas de color blanco y pisos y pasillos de color blanco; y la calidad mediante cubiertas con aditivo que absorban luz UVA y azul para control de hongos e insectos plaga, cubiertas que bloqueen la transmisión del infrarrojo y medios térmicos, cubiertas con aditivos que disminuyan la transmisión del infrarrojo al medio exterior (polietilenos térmicos), plásticos verdes que absorban verde y fluorescan en rojo para favorecer la fotosíntesis, cubiertas que filtren longitudes de ondas y luz artificial complementaria.

Por ello, un sistema alternativo de producción de pepino en hidroponía, que permite una alta intercepción de la radiación solar incidente para maximizar la fotosíntesis, es el sistema de dos fases que se ha estado desarrollando en la Universidad Autónoma Chapingo. Consiste en una fase de semillero que se busca extender a 30 días y reducir la segunda fase (trasplante a fin de cosecha) a 60 días mediante el despunte de las plantas a aproximadamente 1.2 m de altura. Esto da la posibilidad de obtener entre cinco y seis ciclos de cultivo por año, en lugar de los dos del sistema convencional, lo que se traduce en mayor productividad anual y menor costo de producción por kilogramo. Las plantas se limitan a una altura de 1 a 1.2 m mediante el despunte, lo que reduce su crecimiento y producción individual (7 a 10 frutos planta⁻¹). Sin embargo, permite aumentar la densidad de población a entre 6 y 7 plantas m⁻². De este modo, se compensa parcialmente el menor rendimiento por planta, manteniendo un rendimiento similar por unidad de superficie en un periodo final de sólo 60 días.

Potencialmente el sistema de trasplante tardío, alta densidad y despunte temprano permite aumentar considerablemente la productividad y el beneficio económico anual en comparación con el sistema convencional. Aunque los costos anuales de producción son mayores por el gasto en semilla, manejo de semilleros, mano de obra y otros, pero el alto rendimiento del sistema reduce los

costos por ciclo y/o por kilogramo producido, en consecuencia, la rentabilidad económica anual aumenta significativamente.

4. Características deseables en las plantas bajo el sistema de altas densidades

Ayala et al. (2019) y Ortiz et al. (2009), mencionaron que el incremento en las densidades de población debe de acompañarse con plantas que presenten características como: tallo grueso, que generalmente implica un transporte más eficiente, y mayor capacidad de reserva de asimilados para su uso posterior en el llenado de frutos; menor altura de planta, con menor gasto de asimilados en elongación, mayor índice de cosecha y menor competencia por radiación; hojas pequeñas, pero fotosintéticamente eficientes, alto número de estructuras reproductivas con una actividad de demanda fisiológica que se traduzca en alto peso unitario y uniformidad, para transformar los fotoasimilados disponibles en rendimiento económico.

Según Ortiz et al. (2009), mediante prácticas como la poda de brotes y hojas, el despunte y el tutoreo, permiten formar plantas con características morfológicas deseables en el sistema de producción de despunte temprano y densidad de población alta, es decir, precoces, con tallo grueso, porte bajo, entrenudos cortos, hojas pequeñas y eficientes fotosintéticamente, que produzcan un alto número de frutos de calidad y tamaño comercial.

5. Cultivo en sustrato

El término sustrato se define como cualquier material inerte, de origen natural o sintético que reemplaza al suelo y cumple con la función de sostén de la planta (Castañares, 2020). Por otro lado, la implementación de cultivo sin suelo permite obtener una óptima relación aire-agua en el sistema radicular de la planta favoreciendo por tanto el desarrollo del cultivo y su potencial productivo debido a

que la planta al tomar la solución nutritiva consume menos energía para su desarrollo que en los sistemas de cultivo en suelo y de esta forma los productos son de mejor calidad (Baixauli et al., 2002).

Es importante que el sustrato sea de fácil obtención, bajos costo, con alta retención de agua y oxigenación, libre de contaminantes y patógenos y alta vida útil (Castañares, 2020).

Urrestarazu (2015) menciona que, para conseguir la mejor producción en los cultivos sin suelo, es necesario encontrar sustratos con un equilibrio entre agua-aire adecuado a las necesidades de la raíz.

Aunado a lo anterior, la implementación de un medio y/o sistema de producción diferente del suelo como lo es un sistema hidropónico le permitirá al cultivo un mejor desarrollo y producción. En este sistema, el sustrato utilizado deberá poseer características físicas y químicas que den a la raíz, condiciones favorables para su crecimiento y función, por lo que es importante la evaluación de éstos. Las propiedades físicas que usualmente se determinan son: el espacio poroso total, capacidad de aireación, capacidad de retención de agua, densidad aparente y densidad real (Baixauli et al., 2002; Crespo et al., 2013). En lo que se refiere a las propiedades químicas, los sustratos orgánicos son los que contribuyen en mayor grado a estas propiedades como lo es la capacidad de intercambio catiónico (CIC), disponibilidad de nutrientes, salinidad, la relación C/N, pH y CE., etc. (Cruz et al., 2013).

Las propiedades físicas son un importante factor de elección de un material como sustrato, ya que el volumen de un contenedor es reducido y, por tanto, las propiedades físicas, o dentro de ellas las relaciones agua-aire cobran gran importancia; de ahí que se considere que un buen sustrato deba tener idealmente más del 85 % de porosidad total (Abad et al., 2004 y Cruz et al., 2013).

6. Propiedades físicas de los sustratos

Los sustratos usados en la producción hortícola pueden ser tanto orgánicos como inorgánicos y al mezclarse pueden mejorar las propiedades físicas y químicas, tales como la capacidad de retención de agua, porosidad, oxigenación y la capacidad de intercambio catiónico (Cabrera, 1999).

Un medio de cultivo bueno deberá de tener buenas propiedades físicas como son: aireación y drenaje, retención de agua y bajo peso húmedo por volumen. El medio de cultivo o sustrato debe de estar diseñado para aumentar el contenido de agua y aire, en general el sustrato deberá de tener por lo menos un 70 % de porosidad con base al volumen y capacidad de retención de agua en un intervalo de 55 a 70 % (Cabrera, 1999). Además, deben tener una estructura estable, durabilidad larga del material y manipulación fácil y adecuada (Baixauli et al., 2002).

La porosidad total está definida como el volumen del sustrato de cultivo no ocupado por partículas orgánicas o minerales, el óptimo va desde un 70-80 %, razón por la cual podemos cultivar en volúmenes reducidos que permiten un equilibrio entre aire y solución nutritiva (Baixauli et al., 2002).

La capacidad de aireación es el volumen del sustrato que contiene aire después que ha sido saturado y dejado drenar; el valor óptimo va de 20-30 % (Baixauli et al., 2002); la capacidad de retención de agua por el sustrato, un mínimo de 55 % es deseable para una maceta o recipiente de 10 a 15 cm. Asimismo, se desea que el volumen de agua total disponible para la planta debe de ser por lo menos 30 % del volumen total del sustrato (Cabrera, 1999).

De acuerdo con Baixauli et al. (2002) otro factor a considerar es la distribución del tamaño de las partículas, puesto que éstas determinan la capacidad de un sustrato para retener el agua y el aire, la porosidad aumenta en la medida que lo hace el tamaño medio de las partículas, las partículas pequeñas hacen disminuir la porosidad y aumentar la cantidad de agua retenida, por ende, es importante mantener una correcta distribución y/o equilibrio de estas partículas.

7. Propiedades químicas de los sustratos

Las propiedades químicas de los sustratos juegan un papel importante en la disponibilidad de nutrientes, crecimiento de las plantas, actividad biológica etc. De acuerdo con Mixquititla et al. (2022) las características químicas más importantes de los sustratos son: capacidad de intercambio catiónico (CIC), potencial hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica (CE).

La capacidad de intercambio catiónico se define como la capacidad de retener cationes nutrientes e intercambiarlos con la solución acuosa; ésta se expresa en miliequivalentes por unidad de peso o volumen, aunque suele interesar sustratos con una baja CIC, que sean químicamente inertes o de muy baja actividad. El pH es una medida de la acidez del medio, influye en la asimilación de los nutrientes por las plantas. Con un pH inferior a 5 pueden presentarse deficiencias de macronutrientes y con un pH superior a 7.0 se disminuye la asimilación de algunos micronutrientes; es decir, el rango óptimo oscila entre el 5.5-6.8, dentro de éste se encuentran de forma asimilable la mayor parte de los nutrientes, por tanto, el desarrollo de las plantas se ve reducido en condiciones de acidez o alcalinidad (Baixauli et al., 2002).

La concentración de sales solubles presentes en la solución del sustrato se mide mediante la conductividad eléctrica (CE), que es la medida de capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica; el valor será más alto cuanto más fácil se mueve la corriente a través de este, esto significa que, a mayor CE, mayor es la concentración de sales (Barbado et al., 2018). La CE se mide en unidades de conductancia por unidad de longitud, es decir, siemens por metro (S/m) en el Sistema internacional de Unidades (SI) (Visconti & de Paz, 2018). Es conveniente expresar en su submúltiplo dS m^{-1} (deci Siemens por metro), pues esta unidad minimiza errores al momento de la interpretación del valor de la CE (Beroisa et al., 2022).

La salinidad es la concentración de sales existentes en el sustrato, cuando es inerte la salinidad es nula y en sustratos orgánicos puede presentar valores altos (Baixauli et al., 2002).

Barbado et al. (2018) mencionan que en un sustrato es conveniente que la conductividad eléctrica sea baja, en lo posible menor a 1 dS m^{-1} . Una CE baja facilita el manejo de la fertilización y se evitan problemas por fitotoxicidad en el cultivo. Los valores mayores de 3.5 mS cm^{-1} se consideran excesivamente altos para la mayoría de los cultivos hortícolas (Baixauli et al., 2002).

8. Efecto del volumen de sustrato o contenedor

Urrestarazu (2015) menciona que, para conseguir la mejor producción en los cultivos sin suelo, en sustrato es necesario encontrar un equilibrio entre agua-aire. El sistema de producción con sustratos en contenedor se perfila como una opción viable dentro de la producción como unidad individualizada (bolsa, contenedores rígidos o charolas compactas) ya que permiten un mejor desarrollo de la raíz, e incluso dan la posibilidad de cambiar de lugar o reacomodar las plantas; en este sentido el tamaño del envase y las condiciones del sustrato son algunos de los factores importantes a considerar (Santiago et al., 2015).

Sánchez et al. (2021), mencionaron que, un mayor volumen de contenedor, combinado con un mayor espacio, favorece tanto el ambiente de la raíz como de la parte aérea, factores que pueden incrementar el rendimiento final.

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, B. M., Noguera, M. P. & Carrión, B. C. (2004). Los sustratos en los cultivos sin suelo. In Urrestarazu, G. M. (Ed). *Tratado de cultivo sin suelo* (pp 113-158). Mundi-Prensa.
- Ayala, T. F., López, O. C. A., Yáñez, J. M. G., Díaz, V. T., Velázquez, A. T de J. & Parra, D. J M. (2019). Densidad de plantas y poda de tallos en la producción de pepino en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(1), 79-90. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1211>
- Baixauli, S. C. & Aguilar, O. J. M. (2002). *Cultivo sin suelo de hortalizas*. Generalitat Valenciana.
- Barbaro, L., Karlanian, M. & Mata, D. (2018). *Importancia del pH y la conductividad eléctrica (CE) en los sustratos para plantas* (1.^a edición digital). Ediciones INTA.
- Beroisa, C., Díaz, Z. M., Iturri, A., Kloster, N., Álvarez, C. & Isasti, J. (2022). ¿Qué medimos cuando analizamos la conductividad eléctrica de aguas y suelos? *Notas Agrícolas PAMPEANAS*, (6),17-19. https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/13256/INTA_CR_LaPampaSanLuis_EEAAnquil_Kloster_N.Qué%20medimos%20cuando%20analizamos%20la%20conductividad%20eléctrica%20de%20aguas.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cabrera, R. (1999). Propiedades, uso y manejo de sustratos de cultivo para la producción de plantas en maceta. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5(1), 5-11. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.1998.03.025>
- Castañares, J. L. (2020). El ABC de hidroponía. INTA Digital. https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/8023/INTA_Di15eccionNacional_EEAAMBA_Casta%c3%b1ares_JL_ABC_de_la_hidroponia.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Chacón, P. K. & Monge, P. J. E. (2020). Producción de pepino (*Cucumis sativus* L.) bajo invernadero: comparación entre tipos de pepino. *Tecnología en Marcha*, 33(1),17-35. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v33i1.5018>

- Cruz, C. E., Can, C. A., Sandoval, V. M., Bugarín, M. R., Robles, B. A. & Juárez, L. P. (2013). Sustratos en la horticultura. *Bio Ciencias*, 2(2),17-26. <https://doi.org/10.15741/revbio.02.02.03>
- López, E. J., Garza, O. S., Huez, L. M. A., Jiménez, L. J., Rueda, O., Omar, R. E. & Murillo, A. B. (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.
- Mixquititla, C. G, Villegas, T. O., Adrade, R. M. & Sotelo, N. H. (2022). Propiedades físicas y químicas de sustratos en función de su granulometría y componente orgánico-mineral. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 8(1), Article e0081007. <https://doi.org/10.30973/aap/2022.8.0081007>
- Ortiz, C. J., Sánchez, Del C. F., Mendoza, C. M del C. & 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. <https://doi.org/10.35196/rfm.2009.4.289-294>
- Rebollar, R. S., Ramírez, A. O. & Hernández, M. J. (2022). Competitividad y valor agregado de pepino persa (*Cucumis sativus* L.) en agricultura por contrato: estudio de caso. *Terra Latinoamericana*, (40), Article e952. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.952>
- Sánchez, D. C. F. & Moreno, P. E. C. (2017). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Sánchez, Del C. F., González, M. L., Moreno, P. E. Del C., Pineda, P. J. & Reyes, G. C. E. (2014). 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. Del C. E., Magdaleno, V. J. J. & Vázquez, R. J. C. (2021). Efectos del volumen de contendor y densidad de plántula sobre el trasplante tardío y número de flores en jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(2), 71-84. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.015>

Santiago, T. O., Vargas, H. J. De J., Aldrete, A., López, U. J. & Fierros, G. A. M. (2015). Sustratos y tamaños de contenedor en el desarrollo de *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. en vivero. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 6(31),94-113.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2020). De la familia de las cucurbitáceas, el pepino es el consentido. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2022). El pepino y su vocación exportadora. SAGARPA, México. <https://www.gob.mx/siap/es/articulos/el-pepino-y-suvocacionexportadora#:~:text=Se%20estima%20que%20la%20derram,en%20la%20producci%C3%B3n%20de%20pepino>

Urrestarazu, G. M. (2015). *Manual práctico sin suelo e hidroponía* (1.^a ed.). Mundi-Prensa. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1940.0724>

Visconti, F. & De Paz, J. M. (2018). Como conocer la salinidad del suelo mediante medidas de conductividad eléctrica. *Levante Agrícola: Revista Internacional de Cítricos*, (441),98-104.

Zamora, E. (2017). El cultivo de pepino tipo slicer-americano (*Cucumis sativus* L.) bajo cubiertas plásticas [Folleto]. [https://dagus.unison.mx/zamora/8.%20el%20cultivo%20de%20pepino%20slicer%20\(cucumis%20sativus%20l.\)%20bajo%20cubiertas%20plasticas.pdf](https://dagus.unison.mx/zamora/8.%20el%20cultivo%20de%20pepino%20slicer%20(cucumis%20sativus%20l.)%20bajo%20cubiertas%20plasticas.pdf)

CAPÍTULO 3: INTRODUCCIÓN

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una hortaliza de importancia a nivel nacional y mundial, debido a la versatilidad que presenta en cuanto a manejo agronómico, producción y comercialización; al ser una hortaliza de alto consumo permite la generación de empleos ya que es una fuente de ocupación de una gran cantidad de mano de obra (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP], 2020). En México, aproximadamente el 60 % de la producción de esta hortaliza se centra en tres entidades: Sinaloa, Sonora y Michoacán, y a nivel mundial México se encuentra posicionado como productor en el sexto lugar (SIAP, 2020).

La producción promedio de esta hortaliza en los últimos años se mantuvo en crecimiento, y para 2022 se logró producir 1 millón 29 mil toneladas (SIAP, 2024).

El sistema de producción de pepino que predomina en los invernaderos de México, consiste en el establecimiento de las plantas a densidades de población de 1.5 a 3 plantas·m⁻² en las que se dejan crecer a más de 3 m de altura en un ciclo de cultivo de 5 a 6 meses. Con este manejo, la fructificación se da en “sets”, es decir, primero se forman y amarran unos 8 a 12 frutos, los frutos subsecuentes (unos 4 ó 5) abortan por falta de azúcares y agua que los primeros están consumiendo. Una vez que estos primeros alcanzan su tamaño comercial y son cosechados, entonces nuevamente hay amarre y crecimiento de otros 6 a 8 frutos, y así sucesivamente, donde regularmente se conducen unos tres flujos de cosecha al año (Wien, 1999; NSW government, 2019) y se logra un rendimiento promedio que fluctúa de 150 a 300 t ha⁻¹ año⁻¹ (Ortiz et al., 2009).

Alternativamente, en la Universidad Autónoma Chapingo, se ha desarrollado un sistema de manejo del pepino que consiste en establecer las plantas a densidades de población de 6 plantas m⁻² de invernadero, a las que se les elimina el ápice de crecimiento cuando alcanzan una altura de 1.0 a 1.5 m (Ortiz et al., 2009). El trasplante se hace con plántulas de 30 días de edad, crecidas en

charolas de 60 cavidades, y un ciclo de trasplante a fin de cosecha que dura solamente 60-70 días, por lo que es posible obtener hasta 5 ciclos de cultivo al año, con rendimientos promedios por ciclo de 12 kg m^{-2} , que equivale a $600 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ si se establecen los 5 ciclos de cultivo anuales (Sánchez et al., 2021), en invernaderos sencillos, pero agrónomicamente bien diseñados (Sánchez & Moreno, 2017).

Aunque los rendimientos que se logran con este manejo de las plantas son altos, el sistema se puede optimizar para lograr rendimientos aún mayores, por lo que recientemente se está desarrollando investigación y probando una forma de manejo más intensivo, pero que puede ser más productivo, que consta de tres etapas o fases: una primera fase de plántula en semillero (fase inicial); una segunda fase (fase intermedia de alta densidad) en la que las plántulas son trasplantadas a bolsas o macetas, a una densidad de $18 \text{ plantas m}^{-2}$, y una tercera fase (fase final de producción), en la que las plantas son reubicadas en el invernadero de producción a una densidad de $6 \text{ plantas} \cdot \text{m}^{-2}$ de invernadero. Cada fase dura 30 días, de tal forma que las plantas permanecen en el invernadero de producción final solamente 30 días. En este caso, la fase intermedia de alta densidad de población ocupa un espacio adicional de invernadero, de aproximadamente una cuarta parte más del invernadero de producción, pero con la planificación adecuada se pueden lograr hasta doce ciclos de cultivo al año en el invernadero de producción final.

En este sistema, el sustrato utilizado deberá poseer características físicas y químicas que den a la raíz, condiciones favorables para su crecimiento y función, por lo que es importante su evaluación, sobre todo porque para que sea posible el manejo de una alta densidad de población en la fase intermedia, se requiere de contenedores con poco volumen de sustrato (máximo 8 litros).

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue comparar el efecto de utilizar diferentes sustratos en un contenedor limitado a un volumen de 8 L, sobre el crecimiento y rendimiento de plantas de pepino manejadas en un sistema de tres fases de cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en un invernadero ubicado en el campo experimental de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), a 2,268 msnm en las coordenadas de 19°29'36" N, 98°52'19" W en el periodo de julio a octubre del 2023. El invernadero es de tipo capilla, con cubierta de polietileno térmico y alta dispersión de luz y de malla antiáfidos, con una superficie de 1000 m², acondicionado con pared húmeda y extractores de aire que permiten regular la temperatura y humedad relativa interior.

El material vegetal empleado fue el híbrido Centauro F1, de fruto de tipo americano, ginoico y partenocárpico de crecimiento indeterminado, con resistencia a virus de las venas amarillas del pepino (CVYV) y a *Podosphaera xanthii* (Px).

Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones, y 15 plantas como unidad experimental. Los tratamientos (T) fueron ocho sustratos solos o en mezcla (T1= tezontle rojo, T2= tepojal, T3= perlita, T4= vermiculita, T5= fibra de coco, T6= aserrín de pino compostado, T7= mezcla de Peat moss + perlita + vermiculita y T8= mezcla de tepojal + perlita). Los sustratos seleccionados constaron de material natural (tezontle rojo, tepojal, fibra de coco y aserrín de pino compostado), sintético (perlita y vermiculita) y mezclas (perlita + tepojal y de peat moss + vermiculita + perlita). La granulometría (diámetro) usada para los sustratos del tipo natural fue de un intervalo de 2.5-3 mm a excepción de la fibra de coco (fibra + polvo fino) y del aserrín de pino compostado (viruta + polvo fino), y para los sustratos sintéticos, la granulometría fue de 0.5-2 mm.

El cultivo se manejó bajo un sistema de producción de tres fases como se describe a continuación:

Primera fase: fase inicial en semillero

La siembra se hizo en charolas de poliestireno de 60 cavidades (200 ml de volumen por cavidad) rellenas de una mezcla de peat-moss y perlita en proporción 1:1 (v/v). Cada charola fue desinfectada previamente con sales cuaternarias de amonio a una concentración de 5 ml por cada litro de agua, posterior a ello se colocó una semilla por cavidad a 2 cm de profundidad, finalmente se cubrió la semilla con vermiculita y se dio un riego con agua corriente. Durante todo el periodo de crecimiento de las plántulas en semillero, los riegos fueron aplicados de forma manual, donde los primeros quince días se realizó el riego sólo con agua, posterior a los quince días se incorporó riego con solución nutritiva al 50 % de concentración hasta completar los treinta días. La solución nutritiva completa (100 %) contenía los siguientes elementos nutritivos y concentraciones (mg L^{-1}): N = 200, P = 60, K = 250, Ca = 250, Mg = 60, S = 150, Fe = 2, Mn = 1, B = 0.5, Cu = 0.1 y Zn = 0.1, como fuentes de fertilizantes se usó: nitrato de calcio 15.5-00-00-26, ácido fosfórico al 53 %, sulfato de potasio 00-00-50, sulfato de magnesio, sulfato ferroso 11 % S y 21 % Fe, sulfato de manganeso 19 % S y 32 % Mn, ácido bórico 99.9 %, sulfato de cobre 25 % Cu pentahidratado y sulfato de zinc monohidratado.

Una vez realizada la siembra, las charolas fueron colocadas sobre bases metálicas ubicadas dentro del invernadero.

Segunda fase: fase intermedia

El establecimiento de la fase intermedia consistió en la colocación de las plantas en bolsas de polietileno negro de 8 L de sustrato simulando camas de cultivo conformadas por cinco hileras de plantas colocadas a una distancia de 20 cm entre plantas y 20 cm entre hileras, con pasillos de 50 cm entre cada cinco hileras, lo que dio una densidad de población de 25 plantas/ m^2 útil (Figura 1). Las bolsas estaban rellenas con el sustrato según el tratamiento correspondiente.

En cada hilera de plantas se colocó una cintilla de goteo negra cal. 6000, marca Toro, con goteros integrados a cada 20 cm.



Figura 1. Acomodo a cinco hileras a 20 cm entre hilera y entre plantas (fase intermedia).

Los sustratos empleados, previamente fueron sometidos a pruebas físicas en las que se les evaluó la porosidad total (%), volumen ocupado por aire (%) y capacidad de retención de humedad (%), utilizándose para dicha prueba, un volumen total de 8 L (Cuadro 1). La metodología utilizada fue bajo un método volumétrico, donde se coloca el sustrato en un contenedor (con sistema de drenaje) con un volumen de 8 L, se agrega agua hasta saturar la mezcla, se mide el volumen de agua empleada, después se deja drenar libremente durante 30 minutos y se cuantifica el agua drenada, con lo anterior, se calcula la porosidad total del sustrato (con el volumen de agua usada para saturar la mezcla), la capacidad de retención de humedad (mediante el volumen de agua no drenada), y la capacidad de oxigenación (mediante la cantidad de agua drenada).

El aserrín de pino (mezcla de 56.3 kg de viruta y 144.2 kg de aserrín fino) fue compostado previo a su utilización, dicha composta consistió en añadir 3.56 kg de nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), 1.0 kg de fosfato diamónico (DAP 18-46-00) y 1.6 kg sulfato de magnesio ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), posteriormente se cubrió con plástico negro y se aplicaron riegos cada tercer día durante 40 días.

Cuadro 1. Propiedades físicas de los sustratos previas al inicio del ciclo de producción.

Tratamiento	Porosidad total (%)	Volumen de aire (%)	Retención de agua (%)
Tezontle	49	16	33
Tepojal	47	23	24
Perlita	60	31	29
Vermiculita	72	30	42
Fibra de coco	81	51	30
Aserrín compostado	68	43	25
Mezcla Peat moss + Perlita + Vermiculita	71	29	46
Mezcla Perlita + tepojal	60	29	31

El trasplante de las plántulas, del semillero a la fase intermedia, fue realizado a los 30 días después de la siembra (dds) acomodando cada plántula, al centro de la bolsa, e inmediatamente después se procedió a colocar un anillo de plástico en la base del tallo, se fue envolviendo un hilo de rafia en el sentido de las manecillas del reloj evitando quebrar las hojas o causar daños a los tallos. Los tallos secundarios emergentes en cada yema axilar se eliminaron con ayuda de tijeras o navaja, de esta forma las plantas fueron conducidas a un solo tallo.

Desde el trasplante y toda la segunda fase de crecimiento de las plantas, la solución nutritiva aplicada fue a la concentración del 100 %, con una frecuencia de ocho riegos por día y duración aproximada de 5 a 7 minutos cada uno, para dar entre 1.0 y 1.5 L por planta al día, según la etapa fenológica y condiciones climáticas, garantizando al menos un 10 % de sobreriego.

Poco antes de finalizar la fase intermedia, se realizó el despunte del ápice principal cuando las plantas alcanzaron una altura de 1.2 m.

Durante esta fase intermedia se hizo aplicación de insecticida (i.a. flonicamid) que actúa de forma sistémica acropétala y translaminar vía follaje para el control de mosquita blanca (*Bemisia tabaci*) 1.0 g L⁻¹ de agua con dos aplicaciones a intervalos de siete días; también se usó el ingrediente activo buprofezin +

fenpyroximate 1.0 ml L⁻¹ para control de ninfas y adultos de (*Bemisia tabaci*). Para prevenir enfermedades se realizó una aplicación de fungicida a partir de propamocarb + fosetil que actúa de forma sistémica para prevenir marchitez (*Phytophthora capsici*) y mildiu de las cucurbitáceas (*Pseudoperonospora cubensis*) con 1.0 ml L⁻¹ aplicada en drench un día después del trasplante.

Tercera fase: fase final de producción

Al término de la fase intermedia, y para dar inicio la fase final de producción, las plantas con todo y bolsa fueron separadas para formar camas de tres hileras contiguas. La separación entre hilera y entre plantas fue de 30 cm y entre cada conjunto de tres hileras se tuvieron pasillos de 50 cm, de tal forma que la densidad de población en su fase final fue de 11.11 plantas·m⁻² útil (7.4 plantas m⁻² de invernadero). En esta fase, la solución nutritiva fue aplicada de la misma forma que en la fase intermedia.

Durante la fase final se efectuó una aplicación de Cymoxanil + hidróxido de cobre + Mancozeb de acción sistémica y de contacto para combatir y/o prevenir mildiu (*Pseudoperonospora cubensis*) (1.0 g L⁻¹) con aplicación foliar, y cinco días después una aplicación de boscalid + pyraclostrobin para prevención y/o curativo de cenicilla (*Erysiphe cichoracearum*), mildiu (*Pseudoperonospora cubensis*) y mancha foliar (*Corynespora cassicola*) (1.0 g L⁻¹).

La frecuencia de riego fue de 10 riegos (2 L planta⁻¹) durante el día, aplicados de 10:00 a 17:00 h.

Los frutos fueron cosechados cuando alcanzaron una longitud mayor a 20 cm y un diámetro mayor a 45 mm.

Variables evaluadas

Se efectuaron mediciones cada 15 días a partir del trasplante (de semillero a la fase intermedia de alta densidad) hasta el final de la producción. Cabe mencionar que al momento en el que se hizo el trasplante se tomaron 10 plántulas aleatoriamente como punto de partida, de estas se registró su altura, diámetro, peso seco total y área foliar. En la fase intermedia y fase final (al finalizar cada

fase) se tomaron dos plantas por tratamiento (sustrato) y por cada repetición para las siguientes mediciones:

- a) Altura de planta (cm): se midió con ayuda de una cinta métrica desde la base del cuello de la raíz hasta el ápice de la planta. Cabe aclarar que una vez que las plantas en el invernadero alcanzaron la altura de 1.2 m se despuntaron, por lo que ya no crecieron más.
- b) Diámetro de tallo (mm): se midió con un vernier electrónico entre el segundo y tercer entrenudo.
- c) Número de hojas por planta: se contabilizaron una a una desde la parte basal hasta la altura del despunte (1.20 m).
- d) Área foliar (cm²): se midió con un integrador de área foliar LI-3100C (LI-COR, Lincoln, Nebraska USA); para esto, se realizó muestreo destructivo de dos plantas por tratamiento por repetición.
- e) Índice de área foliar (m² de hoja m⁻² de suelo): se calculó multiplicando el área foliar promedio de cada planta por la densidad de población a la que se encontraban las plantas al momento de la medición.
- f) Peso seco total (g): se seccionaron cada uno de los órganos, se introdujeron en bolsas de papel Kraft y se colocaron dentro del horno de secado a 70 °C durante cuatro días; para determinar el peso se hizo utilizó una balanza granataria. Se efectuó mediante un muestreo destructivo de dos plantas por tratamiento por repetición al final de la fase final; las bolsas Kraft se identificaron por tratamiento, repetición y número de planta. En el caso del secado de frutos, estos permanecían hasta una semana dentro del horno de secado a la misma temperatura.
- g) Número de flores por planta: contabilizadas una a una desde la primera axila de la hoja principal hasta la última antes del despunte.
- h) Número de frutos por planta: se contabilizó el número de frutos de plantas seleccionadas aleatoriamente.
- i) Peso medio de fruto (g): se obtuvo, dividiendo el rendimiento total de frutos cosechados entre el número de frutos para cada variedad.

j) Rendimiento (kg planta^{-1}): fue la suma total de peso de los frutos cosechados en todos los cortes, el cual se midió con una báscula industrial digital Braunker Yp 200, México, con mástil e indicador LED de 6 dígitos.

Se colocó un data logger marca Extech Rht10, Waltham, Massachusetts, Estados Unidos, con el que se registró el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa durante el ciclo de producción (Figura 2), donde en la fase de semillero la temperatura promedio del día fue de $19.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa promedio de 76.5% ; en la fase intermedia de alta densidad que duró de los 30 a los 60 días después de la siembra (dds), se registró una temperatura promedio de $21.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa promedio de 73.1% . Por último, en la fase final (fase de producción), que duró de los 60 a los 90 dds, se presentó una temperatura promedio de $19.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa promedio de 77.5% . En la Figura 2 se presentan las temperaturas y la humedad relativa mínimas y máximas que se alcanzaron durante este ciclo de producción.

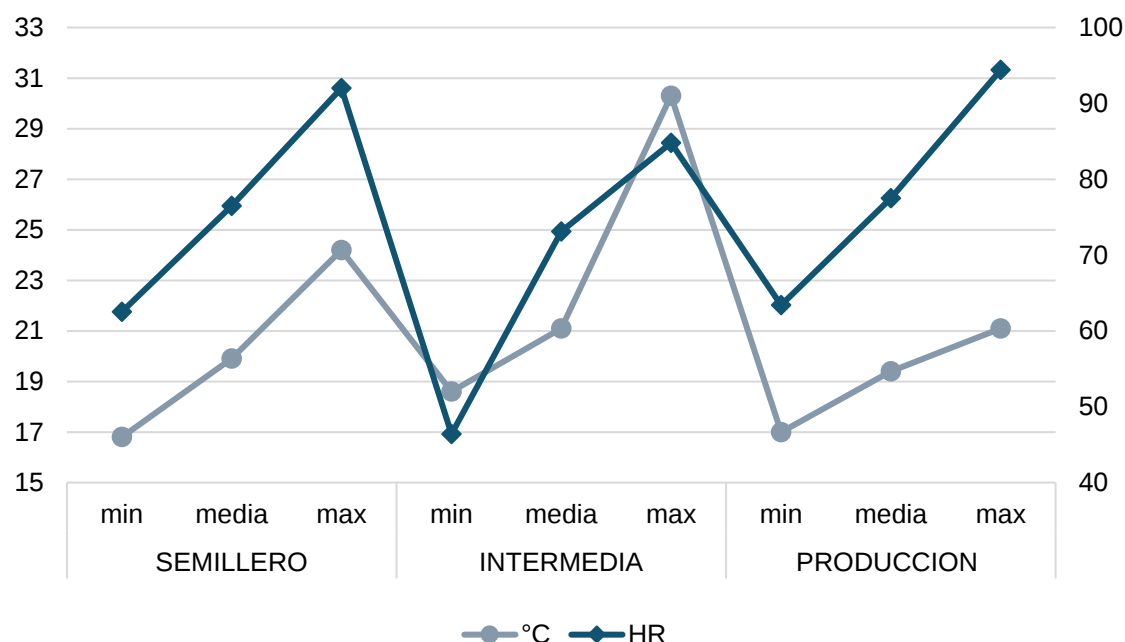


Figura 2. Comportamiento de la Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y Humedad Relativa (%) en las distintas fases de desarrollo del cultivo.

Por otra parte, se realizaron mediciones de temperatura del sustrato, medida en grados Celsius (°C) con ayuda de un termómetro digital de suelo. Se hicieron tres mediciones por tratamiento en cada repetición, en tres momentos diferentes del día (mañana, medio día y tarde), esto en cada fase de producción.

Al finalizar el ciclo de producción, se hicieron pruebas de propiedades químicas de los sustratos en el laboratorio de ecología con muestras totalmente secas. El potencial hidrógeno (pH) del suelo se determinó siguiendo la metodología de Willard et al. (1958); la Conductividad Eléctrica (CE) con la metodología de Aguilera y Domínguez (1980); y para determinar la Capacidad de Intercambio Catiónico Total (CICT) se usó el Método Volumétrico del Versenato desarrollado por Schollenberger y Simon (1945). La CICT se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$CICT (cmol (+)kg^{-1}) = \frac{mL \text{ de EDTA} * N * FC}{g \text{ suelo}} * 100$$

Donde:

N = normalidad del EDTA.

EDTA = ácido etilendiaminotetraacético.

FC = factor de corrección del EDTA.

Para obtener el factor de corrección se titulan con EDTA, un blanco de una solución de cloruro de calcio 0.02 N, se aplica la siguiente relación:

$$FC = \frac{5 (ml \text{ de cloruro de calcio})}{gasto \text{ promedio de EDTA en los blancos}}$$

Los datos obtenidos fueron sometidos a prueba de análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$), utilizando el programa Statistical Analysis System for Windows 9.4 (SAS, 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variables evaluadas en la fase de semillero

A los 30 días después de la siembra (dds), previo a la aplicación de los tratamientos, se hizo una medición inicial en las plántulas bajo estudio. A esa edad, las plántulas tenían en promedio, una altura de 31.7 cm, diámetro de 6.4 mm, 3 hojas mayores a 5 cm de longitud con un área foliar de 301.9 cm² y un peso seco total de 2.2 g (Cuadro 2).

Cuadro 2. Variables registradas en plántulas de pepino variedad Centauro al finalizar la Fase I (producción de plántula en semillero).

Altura (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Hojas	Área foliar (cm ²)	Peso seco total (g)
31.7	6.4	3	301.9	2.2

Casilimas et al. (2012), mencionaron que además del material vegetal usado, el uso de contenedores con cavidades de igual capacidad, permiten que las plántulas dispongan de las mismas oportunidades de obtener nutrientes del sustrato y evitar la competencia por luz y así conseguir un crecimiento homogéneo, plántulas vigorosas y uniformes debido a las condiciones controladas de temperatura y humedad que se logran, además, el volumen adecuado del contenedor de germinación permitirá el desarrollo óptimo de la raíz para llevar a cabo sus funciones a fin de obtener plántulas con calidad al trasplante.

Variables evaluadas en la etapa intermedia

En el Cuadro 3, se observan los resultados del análisis de varianza de las variables medidas a los 15 días después del trasplante o sea 45 dds, es decir, a mitad de la fase intermedia de alta densidad de población. Se observa que no se tuvieron efectos significativos de los sustratos utilizados sobre dichas variables.

Cuadro 3. Cuadrados medios del análisis de varianza de variables evaluadas a los 15 días después del trasplante (mitad de la fase intermedia) en plantas de pepino, variedad Centauro.

FV	GL	Altura (cm)	Diámetro tallo (mm)	Número de hojas
Bloque	3	116.5	2.55	6.5
Tratamiento	7	61.2	0.51	4.1
Error	21	58.7	0.27	3.5
CV %		10.6	8.38	18.8
Media		71.8	6.25	10.0

FV: Fuente de variación, GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación

Las comparaciones de medias (Cuadro 4) corroboran los resultados del ANOVA donde las variables evaluadas no indicaron diferencias significativas. Solamente en valores absolutos, el mayor valor en la altura de planta (77.6 cm) fue cuando las plantas crecieron usando como sustrato Fibra de coco; en diámetro de tallo (6.6 mm) con Tezontle y en número de hojas (11.0) con la mezcla de Peat moos 50% + Vermiculita 25% + Perlita 25%.

Cuadro 4. Comparación de medias de las variables evaluadas a los 15 días después del trasplante (mitad de la fase intermedia) en plantas de pepino, variedad Centauro.

Tratamiento (Sustrato)	Altura (cm)	Diámetro de tallo (mm)	Hojas
Tezontle	73.7 a	6.6 a	10.1 a
Tepojal	73.0 a	5.7 a	9.6 a
Perlita	64.3 a	5.7 a	8.1 a
Vermiculita	71.0 a	6.0 a	9.8 a
Fibra de coco	77.6 a	6.4 a	11.0 a

Aserrín compostado		68.7 a	6.3 a	9.5 a
Mezcla moos	Peat +	73.2 a	6.5 a	11.3 a
Vermiculita	+			
Perlita				
Mezcla Tepojal	Perlita +	72.7 a	6.4 a	10.6 a
DMSH		18.1	1.2	4.4

Valores con letras iguales en la misma columna no indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$), DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Las variables medidas al término de la fase intermedia (30 ddt) tampoco mostraron significancia estadística por efecto de los tratamientos, lo cual se puede apreciar en el Cuadro 5 (ANOVA) y Cuadro 6 (prueba de medias).

Cuadro 5. Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables evaluadas a los 60 días después de la siembra (30 días después del trasplante y fin de la fase intermedia) en plantas de pepino, variedad Centauro.

FV	GL	Diámetro tallo (mm)	Hojas	Índice de área foliar (m ² /m ²)	Peso seco total (g)
Bloque	3	0.46	0.73	0.32	0.21
Tratamiento	7	0.65 ns	1.8 ns	0.66 ns	13.3 ns
Error	21	0.25	1.3	1.23	18.1
CV %		7.0	12.3	26.9	24.5
Media		7.1	9.5	4.1	17.3

FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación, ns: no significativo.

Cabe resaltar que, a pesar de la alta densidad establecida en la fase intermedia, aún al final de esta fase, el índice de área foliar no resultó elevado, y más bien se mantuvo en un intervalo de 3.4-4.6, que es aceptable para este tipo de plantas, pues entre valores de 3 y 4 de IAF, se logra la mayor captación de radiación solar para una máxima fotosíntesis (Heuvelink et al., 2005; Heuvelink et al., 2018; Sánchez & Moreno, 2017).

Cuadro 6. Comparación de medias de las variables evaluadas a los 60 días después de la siembra (30 días después del trasplante y final de la fase intermedia) en plantas de pepino, variedad Centauro.

Tratamiento	Diámetro tallo (mm)	Hojas	Índice de área foliar (m ² /m ²)	Peso seco total (g)
Tezontle	6.9 ^a	9.0 a	4.1 a	17.5 a
Tepojal	7.4 a	9.5 a	4.1 a	17.1 a
Perlita	6.3 a	9.3 a	3.4 a	13.5 a
Vermiculita	7.4 a	9.2 a	4.5 a	18.3 a
Fibra de coco	7.5 a	11.1 a	4.3 a	17.2 a
Aserrín compostado	6.8 a	9.2 a	3.7 a	17.4 a
Mezcla Peat moos + Vermiculita + Perlita	7.3 a	9.1 a	4.0 a	20.1 a
Mezcla Perlita + Tepojal	7.2 a	9.7 a	4.6 a	17.3 a
DMSH	1.1	2.7	2.6	10.1

Valores con letras iguales en la misma columna no indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$), DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

En el Cuadro 7 se muestran los análisis de varianza para las variables evaluadas a los 60 ddt (mitad de la fase final); se observó que en ninguna variable hubo efecto del sustrato lo que se corrobora en el Cuadro 8 (prueba de medias).

Cuadro 7. Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables evaluadas a los 90 días después de la siembra (60 días después del trasplante y término de la fase final de producción) en plantas de pepino, variedad Centauro.

FV	GL	Diámetro tallo (mm)	Peso seco total (g)	Índice de área foliar (m ² /m ²)
Bloque	3	0.74	9.0	0.27
Tratamiento	7	0.25 ns	7.4 ns	0.09 ns
Error	21	0.25	7.5	0.10
CV %		6.7	13.7	24.0
Media		7.4	19.8	1.3

FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación, ns: no significativo, ** diferencias estadísticas altamente significativa.

Dado que las plantas fueron separadas unas de otras, para dejarlas a una menor densidad de población para la fase final de producción (7.4 plantas·m²), el índice de área foliar se redujo y estuvo entre 1.0 (Fibra de Coco) y 1.5 (Mezcla de Perlita + Tepojal).

De acuerdo con algunos autores (Ortiz et al., 2009; Heuvelink et al., 2005; Ayala et al., 2019), este valor de IAF es muy bajo, pues implica un desaprovechamiento de la radiación solar incidente, que puede afectar negativamente el rendimiento por unidad de superficie. Esta observación sugiere que se podría incrementar el rendimiento por unidad de superficie mediante el establecimiento de una mayor densidad de población en esta fase final de producción, por lo que se plantea, para la optimización de este sistema de producción, el experimentar con mayores densidades de población en la fase final del cultivo.

Las plantas alcanzaron una altura máxima de 120 cm, un diámetro de tallo de 8.0 mm y un peso seco total de 22 gramos. Este mayor peso (22 g) dado por el mayor diámetro de tallo (8.0 mm) se observó en el tratamiento conformado por la mezcla

Peat moos + Vermiculita + Perlita, aunque estadísticamente no hubo diferencia respecto a los demás tratamientos.

Cuadro 8. Comparación de medias de las variables evaluadas a los 90 días después de la siembra (60 días después del trasplante y término de la fase de producción) en plantas de pepino, variedad Centauro.

Tratamiento	Diámetro tallo (mm)	Índice de área foliar (m ² /m ²)	Peso seco total (g)
Tezontle	7.3 a	1.3 a	20.3 a
Tepojal	7.4 a	1.2 a	19.8 a
Perlita	7.3 a	1.3 a	20.1 a
Vermiculita	7.2 a	1.2 a	20.0 a
Fibra de coco	7.6 a	1.0 a	17.1 a
Aserrín compostado	7.2 a	1.2 a	19.6 a
Mezcla Peat moos + Vermiculita + Perlita	8.0 a	1.4 a	22.0 a
Mezcla Perlita + Tepojal	7.2 a	1.5 a	19.8 a
DMSH	1.1	0.75	6.5

Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa, letras iguales en la misma columna indican que no hay diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$), DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Los análisis de varianza de las variables del rendimiento y sus componentes (Cuadro 9) evaluadas a los 90 dds (60 Días después del trasplante), que corresponden a la fase final de producción, indican que hubo diferencias estadísticas significativas en todas las variables, excepto número de flores y peso medio de fruto.

En las comparaciones de medias que se presentan en el Cuadro 10, se observa que, aunque las plantas formaron entre 6.3 y 8.5 flores, solamente cuajaron entre 4 y 6 frutos por planta, es decir, que en general, hubo aborción de frutos en el

orden del 30 %. Al respecto, Della & Portela (2021), mencionaron que las diferentes especies de la familia cucurbitácea exhiben este tipo de eventos, ocasionados principalmente por estrés hídrico, luz, defoliaciones y temperaturas bajas. Por su parte, Deaquiz (2014) menciona que el crecimiento y desarrollo de los frutos están condicionados por factores ambientales, tales como: radiación solar, temperatura y humedad relativa que afectan su fenología y procesos metabólicos, que se reflejan en su calidad y tamaño.

Cuadro 9. Cuadrados medios del análisis de varianza de las variables de rendimiento evaluadas a los 90 días después de la siembra (término de la fase final de producción) en plantas de pepino, variedad Centauro.

FV	GL	Flores	Frutos	Peso medio de fruto (kg)	Rendimiento (kg/planta)
Bloque	3	1.0	0.099	0.00086	0.01
Tratamiento	7	1.5 ns	1.12**	0.00005 ns	0.06**
Error	21	0.96	0.26	0.00023	0.01
CV %		12.9	10.2	6.4	10.9
Media		7.5	4.9	0.23	1.1

FV: fuente de variación, GL: grados de libertad, CV: coeficiente de variación, ns: no significativo, ** diferencias estadísticas altamente significativa.

Cuadro 10. Comparación de medias de las variables de rendimiento evaluadas a los 90 días después de la siembra trasplante (término de la fase final de producción) en plantas de pepino, variedad Centauro.

Tratamiento	Flores	Frutos	Peso medio de fruto (kg)	Rendimiento (kg/planta)
Tezontle	8.0 a	4.9 ab	0.234 a	1.1 ab
Tepojal	7.3 a	4.5 b	0.237a	1.0 b
Perlita	6.3 a	4.6 b	0.244 a	1.1 ab
Vermiculita	7.6 a	5.0 ab	0.233 a	1.1 ab
Fibra de coco	7.8 a	5.3 ab	0.239 a	1.2 ab
Aserrín compostado	7.3 a	4.4 b	0.233 a	1.0 b
Mezcla Peat moss + Vermiculita + Perlita	8.5 a	6.0 a	0.236 a	1.4 a
Mezcla Perlita + Tepojal	7.5 a	4.9 ab	0.236 a	1.1 ab
DMSH	2.3	1.2	0.036	0.3

Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa, letras iguales en la misma columna no indican diferencia significativa (Tukey, $P \leq 0.05$). DMSH: diferencia mínima significativa honesta.

Marcano et al. (2012), mencionaron que la calidad del sustrato es fundamental para el cuajado de los frutos, ya que esta calidad está directamente relacionada con la longitud y el peso de éstos.

Aunque en número de flores no hubo diferencias estadísticas entre tratamientos, en las plantas que crecieron en la mezcla de Peat moss + Perlita + Vermiculita como sustrato, se formaron más flores (8.5 flores planta⁻¹), mientras que, con Perlita, el número de flores fue menor (6.3 flores planta⁻¹). El mayor número de frutos por planta también se presentó en las plantas que crecieron en la mezcla

de Peat moss + Perlita + Vermiculita (6 frutos planta⁻¹), con diferencias estadísticas respecto a los tratamientos de Perlita y Tepojal, que solamente formaron 4.6 y 4.5 frutos por planta, respectivamente.

Acosta et al. (2004) y Sánchez et al. (2014), mencionaron que, aunque existe un ambiente estable en la rizósfera en el uso de bolsas con sustrato, tienden a tener más fluctuaciones en temperatura, CE, contenido de humedad y la concentración de nutrimentos, parámetros que pueden llevar a las plantas a un estado de estrés lo cual podría influir sobre sus funciones fisiológicas y afectar su rendimiento.

Dado que en peso promedio de fruto no hubo diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, el mayor rendimiento logrado estuvo determinado por el número de frutos desarrollados por planta, de tal forma que el mayor rendimiento (1.4 kg planta⁻¹, equivalente a 10.3 kg m⁻²) se tuvo al utilizarse como sustrato la Mezcla de Peat moss + Perlita + Vermiculita, que superó estadísticamente el rendimiento de los tratamientos con Tepojal y Aserrín Compostado que solamente rindieron 1.0 kg planta⁻¹. Sánchez et al. (2006), mencionan que al despuntar las plantas de pepino a 1 m de altura y crecidas en alta densidad permite obtener rendimientos de 10 kg m⁻² en solo 60 a 70 días, lo que permite programar alrededor de cinco ciclos de cultivo al año. Aunque las plantas se despuntaron a 1.2 m de altura, el rendimiento por ciclo se encuentra cerca de lo que Sánchez et al. (2006) reportaron, pero el potencial anual de rendimiento con este sistema que permite más de 10 ciclos de cultivo al año es prácticamente el doble.

Los resultados del presente trabajo, también concuerdan con Ortiz et al. (2009), quienes señalaron que, el cultivo de pepino sometido a despuntes tempranos y a alta densidad de población en un ambiente poco restrictivo como el de un invernadero, el número de frutos por planta es el principal factor que determina el rendimiento, aunque Ayala et al. (2019) y Bravo et al. (2011), mencionan que la productividad en el cultivo de pepino está influenciada por la densidad de población, ya que al disminuir la densidad el rendimiento se ve afectado.

Propiedades físicas y químicas de los sustratos

En el Cuadro 11 se muestran las propiedades físicas (porosidad total, capacidad de retención de humedad y porcentaje de aire para la raíz) al inicio y al final del ciclo del cultivo para cada uno de los sustratos probados.

Con excepción del tezontle que estuvo ligeramente limitado en porcentaje de aireación, los demás parámetros estuvieron a niveles adecuados en todos los sustratos (Baixauli et al., 2002). Estas propiedades al final del ciclo no se vieron afectadas, pues solamente sufrieron alguna ligera compactación, pero las propiedades físicas se mantuvieron a lo largo del ciclo de cultivo dentro de valores considerados como apropiados en sustratos hidropónicos (Urrestarazu, 2015). A pesar de la limitación señalada, la arena de tezontle rindió igual que los demás tratamientos, por lo que se considera que, de mejorarse esta condición mediante la selección del tamaño de las partículas, se tuviera una mejor respuesta en crecimiento y rendimiento, y pudiera ser una de las mejores opciones como sustrato ya que en diversas partes del país se encuentra disponible y a relativamente bajo costo.

Las propiedades químicas medidas al finalizar el ciclo de producción mostraron fluctuaciones leves; sin embargo, en todos los tratamientos se tuvo un intervalo de pH de 6 a 7.5. Zamora, (2017) menciona que el cultivo de pepino se adapta mejor a un pH de 5.5 a 6.8, aunque puede soportar hasta 7.5.

Cuadro 11. Comparación de las propiedades físicas al inicio y al final ciclo de cultivo.

Tratamiento	Porosidad total (%)		Porcentaje de aireación (%)		Retención de agua (%)	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
Tezontle	49	43	16	16	33	27
Tepojal	47	47	23	23	24	24
Perlita	60	58	31	36	29	22
Vermiculita	71	70	30	25	45	41
Fibra de coco	81	71	51	32	30	40
Aserrín compostado	68	65	43	30	25	35
Mezcla Peat moss + Vermiculita + Perlita	71	63	29	18	46	31
Mezcla Tepojal + Perlita	60	56	29	29	31	31

La conductividad eléctrica (CE) (Cuadro 12) estuvo entre 0.52 y 1.8 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ para todos los sustratos a excepción del Aserrín compostado que tuvo una CE mucho más elevada (5.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$). De acuerdo con Sánchez et al. (2014), los valores óptimos de CE para el cultivo de jitomate son, para etapa de plántula entre 1.5 y 2, y en etapa de mayor desarrollo entre 3 y 4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. La capacidad de intercambio catiónico total (Cuadro 12) mostró que los sustratos como el Tezontle, Tepojal, Perlita, Fibra de coco, Mezcla de Peat moss + Vermiculita + Perlita y la Mezcla de Tepojal + Perlita se encuentran en valores entre 4.4 y 13.4 $\text{cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$; la Vermiculita sobre 21.7 $\text{cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$ y Aserrín compostado $>60 \text{ cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$.

Cuadro 12. Propiedades químicas de los sustratos al finalizar el ciclo de producción.

Tratamiento	CE ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	CICT($\text{cmol}(+) \text{Kg}^{-1}$)
Tezontle	0.5	8.8
Tepojal	1.5	13.3
Perlita	1.1	11.1

Vermiculita	1.8	21.7
Fibra de coco	1.0	9.4
Aserrín compostado	5.5	69.4
Mezcla Peat moss + Vermiculita + Perlita	0.8	6.4
Mezcla Tepojal + Perlita	0.5	4.4

CE: conductividad eléctrica. CICT: capacidad de intercambio catiónico total.

Durante el ciclo de producción se registró el comportamiento de la temperatura del sustrato, tomados en tres momentos del día; durante la fase intermedia (de alta densidad) (Figura 3) y la fase final (producción) (Figura 4). Fischer et al. (1997) mencionaron que la temperatura de los sustratos varía con respecto a la temperatura de la parte aérea de la planta, y que la temperatura de la zona de la raíz es un factor determinante para el crecimiento de las raíces, y para la absorción de nutrientes y agua.

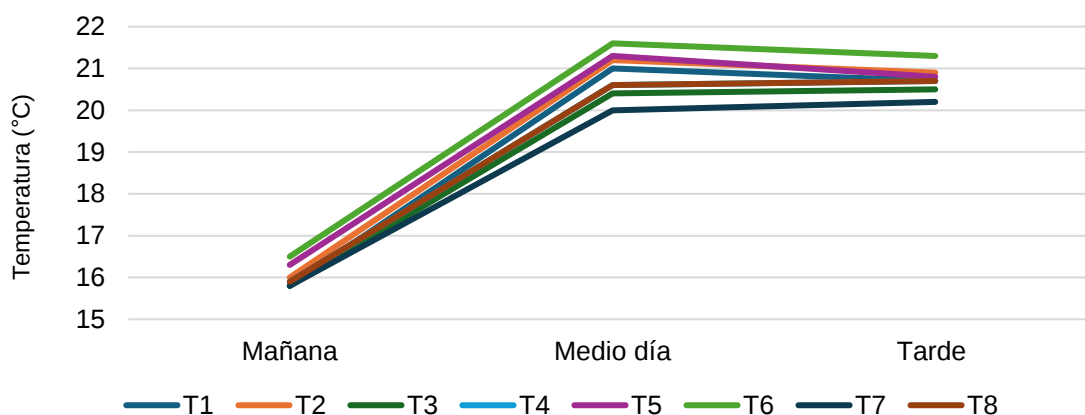


Figura 3. Comportamiento de la temperatura (°C) de los sustratos en diferentes horas del día durante la fase intermedia (de alta densidad).

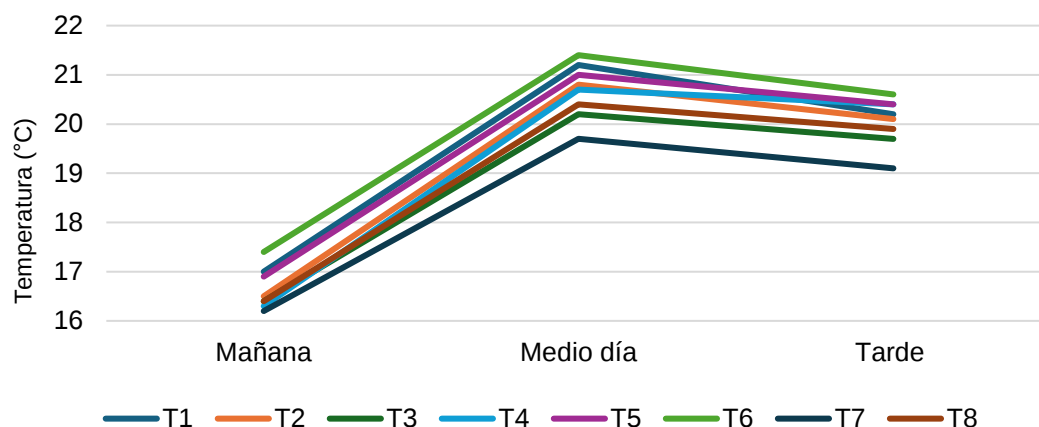


Figura 4. Comportamiento de la temperatura (°C) de los sustratos en diferentes horas del día durante la fase intermedia (de alta densidad).

CONCLUSIONES

Las plantas que crecieron usando como sustrato la mezcla de Peat moss + Vermiculita + Perlita fueron las más altas en rendimiento, pero solo que crecieron en Tepojal y Aserrín de pino compostado.

Con la variedad Centauro, despuntada a 1.2 m de altura, utilizando como sustrato una mezcla de Peat moss + Vermiculita + Perlita, se tuvo un rendimiento de 1.4 kg planta (10.3 kg m^{-2}), lo que potencialmente equivale a aproximadamente $123 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ($1200 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) considerando que el sistema de tres fases hace posible obtener hasta 12 ciclos de cultivo al año en invernaderos equipados al menos con calefacción o ubicados en localidades con climas benignos durante todo el año.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, D. C. M., Acosta, P. D., Cazáres, P. M. & Martínez, V. Y. M. (2004). Preparación de sustratos en la producción de plantas en contenedor. *Revista de Investigación Agropecuaria*, 1(1),18-22.
- Ayala, T. F., López, O. C. A., Yáñez, J. M. G., Díaz, V. T., Velázquez, A. T de J. & Parra, D. J M. (2019). Densidad de plantas y poda de tallos en la producción de pepino en invernadero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(1), 79-90. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i1.1211>
- Baixauli, S. C. y Aguilar, O. J. M. (2002). *Cultivo sin suelo de hortalizas*. Generalitat Valenciana.
- Bravo, P., Zambrano, B. J., Párraga, M. L. & Rivera, F. R. (2011). Influencia de la densidad de siembra y la poda en el cultivo del pepino (*Cucumis sativus*). *Revista ESPAMCIENCIA*, 2(2),51-54.
- Casilimas, H., Bojacá, C. R. & Monsalve, O. (2012). *Manual de producción de pepino bajo invernadero*. Universidad Jorge Tadeo Lozano.
- Deaquiz, O. Y. (2014). Los frutos y su fotosíntesis. *Conexión Agropecuaria JDC*, 4(1),39-47.
[https://www.researchgate.net/publication/305000679 Los frutos y su fotosíntesis](https://www.researchgate.net/publication/305000679_Los_frutos_y_su_fotosintesis)
- Della, G. P. G., & Portela, J. A. (2021). Principales factores que influyen en la diferenciación floral y el cuaje de frutos en zapallo (*Cucurbita* spp.). *Horticultura Argentina*, 40(102).
<http://id.caicyt.gov.ar/ark:/s18519342/u6utsyho8>
- Fischer, G., Torres, C. F. & Torres, B. J. (1997). Efecto de la temperatura del suelo sobre la planta. Crecimiento y desarrollo. *Revista Comalfi*, 24(3),78-92.
- Heuvelink, E., Bakker, M. J., Elings, A., Kaarsemaker, R. C., & Marcelis, L. F. M. (2005). Effect of leaf área on tomato yield. *Acta Horticulturae*, (691),43-50.
<https://doi.org/10.17660/actahortic.2005.691.2>

- Heuvelink, E.; Li, T. and Dorais, M. 2018. Crop growth and yield. In E. Heuvelink, (Ed.) Tomatoes pp.89-136). CABI.
<https://doi.org/10.1079/9781780641935.0089>
- Marcano, C., Acevedo, I., Contreras J., Jiménez, O., Escalona, A., & Pérez, Pablo. (2012). Crecimiento y desarrollo del cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.) en la zona hortícola de Humocaro bajo, estado Lara, Venezuela. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 3(8),629-1636.
- Ortiz, C. J., Sánchez, Del C. F., Mendoza, C. M del C. & 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. <https://doi.org/10.35196/rfm.2009.4.289-294>
- Sánchez, D. C. F. & Moreno, P. E. C. (2017). *Diseño agronómico y manejo de invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Sánchez, Del C. F., González, M. L., Moreno, P. E. Del C., Pineda, P. J. & Reyes, G. C. E. (2014). 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. Del C. E., Magdaleno, V. J. J. & Vázquez, R. J. C. (2021). Efectos del volumen de contendor y densidad de plántula sobre el trasplante tardío y número de flores en jitomate. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27(2), 71-84. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2020.06.015>
- 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*, 29,87-9.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2020). De la familia de las cucurbitáceas, el pepino es el consentido <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>

- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). El pepino y su vocación exportadora. <https://www.gob.mx/siap/es/articulos/el-pepino-y-suvocacionexportadora#:~:text=Se%20estima%20que%20la%20derrama,en%20la%20producci%C3%B3n%20de%20pepino>
- Wien, H. C. (1999). The cucurbits: cucumber, melon, squash and pumpkin. In H. C. Wien (Ed). *The physiology of vegetable crops* (pp. 345-386). CABI Pub.
- Urrestarazu, G. M. (2015). *Manual práctico sin suelo e hidroponía* (1.^a ed.). Mundi-Prensa. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1940.0724>
- Zamora, E. (2017). El cultivo de pepino tipo slicer-americano (*Cucumis sativus* L.) bajo cubiertas plásticas [Folleto]. [https://dagus.unison.mx/zamora/8.%20el%20cultivo%20de%20pepino%20slicer%20\(cucumis%20sativus%20l.\)%20bajo%20cubiertas%20plasticas.pdf](https://dagus.unison.mx/zamora/8.%20el%20cultivo%20de%20pepino%20slicer%20(cucumis%20sativus%20l.)%20bajo%20cubiertas%20plasticas.pdf)