



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

INSTITUTO DE HORTICULTURA

**HÍBRIDOS DE JITOMATE SOMETIDOS A PERIODOS DE ALTA
DENSIDAD DE POBLACIÓN EN CONDICIONES DE
INVERNADERO**

TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

GABRIEL ERNESTO SILVA ACOSTA

Bajo la dirección del Dr. Felipe Sánchez Del Castillo



APROBADA



Chapingo, Texcoco, Estado de México, México, diciembre de 2021

**HÍBRIDOS DE JITOMATE SOMETIDOS A PERIODOS DE ALTA
DENSIDAD DE POBLACIÓN EN CONDICIONES DE INVERNADERO**

Tesis realizada por SILVA ACOSTA GABRIEL ERNESTO bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito
parcial para obtener el grado de:

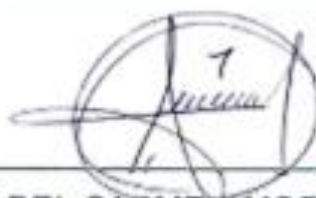
MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR:



DR. FELIPE SÁNCHEZ DEL CASTILLO

ASESOR:



DR. ESAÚ DEL CARMEN MORENO PÉREZ

ASESOR:



DR. J. JESÚS MAGDALENO VILLAR

ASESOR:



DRA. MARÍA TERESA MARTÍNEZ DAMIÁN

Chapingo, Texcoco, Estado de México, México, diciembre de 2021.

CONTENIDO

Página

LISTA DE CUADROS	iii
LISTA DE FIGURAS	v
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTOS.....	viii
DATOS BIOGRÁFICOS	x
RESUMEN GENERAL	xi
ABSTRACT	xii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	9
1.2. Hipótesis	9
2. REVISIÓN DE LITERATURA	10
2.1 Generalidades sobre invernaderos e hidroponía	10
2.2 Contexto sobre la producción de tomate en el mundo y en México.....	15
2.4 Aspectos ambientales y nutricionales en la producción de tomate.....	20
2.5 Híbridos comerciales de tomate: particularidades técnicas y de mercado, en México	21
2.6 Estimación de unidades calor (días-grado): caso tomate.....	23
2.7 Costos de producción en sistemas hortícolas: énfasis en jitomate	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	29
3.1 Ubicación y duración del experimento	29
3.2 Características de la tecnología utilizada	29
3.3 Material vegetal utilizado y tecnología de siembra	31

3.4 Manejo hidropónico del experimento.....	34
3.5. Fases del cultivo y manejo agronómico.....	35
3.6 Tratamientos, diseño experimental, variables consideradas y análisis de datos.....	40
4. RESULTADOS	42
4.1 Variables de crecimiento durante la etapa intermedia de cultivo (45 a 90 días después de la siembra)	42
4.1.1 Caracteres morfológicos	42
4.1.2 Variables de peso seco por órganos y total	49
4.2. Variables de rendimiento y sus componentes	54
4.3 Discusión general	56
5. CONCLUSIONES	63
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE CUADROS

Página

Cuadro 1. Listado mundial de países con mayor superficie dedicada a sistemas agricultura protegida.	13
Cuadro 2. Países con mayor área destinada a la agricultura protegida en el continente América, reportes entre los años 2018 a 2021.	14
Cuadro 3. Listado de países con las mayores producciones de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) en el mundo en el año 2019.	16
Cuadro 4. Resumen de precios de comercialización para el jitomate saladette y bola, en la central de abastos de Iztapalapa (México D.F, México) durante el año 2020.	27
Cuadro 5. Características de los materiales híbridos de jitomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) utilizados como tratamientos en la investigación.	32
Cuadro 6. Cuadrados medios del análisis de varianza para caracteres morfológicos en ocho híbridos de tomate a los 45 días después de la siembra.	42
Cuadro 7. Comparaciones de medias para caracteres morfológicos en diferentes híbridos de tomate a los 45 días después de la siembra.	43
Cuadro 8. Cuadrados medios del análisis de varianza para caracteres morfológicos en ocho híbridos de tomate a los 75 días después de la siembra.	43
Cuadro 9. Comparaciones de medias para caracteres morfológicos en diferentes híbridos de tomate a los 75 días después de la siembra.	45

Cuadro 10. Cuadrados medios del análisis de varianza para caracteres morfológicos en ocho híbridos de tomate a los 90 días después de la siembra.	45
Cuadro 11. Comparaciones de medias para las variables de crecimiento en diferentes híbridos de tomate a los 90 días después de la siembra.	46
Cuadro 12. Comparaciones de medias para las variables de peso seco de plantas (hojas, tallo, raíz, y total) en diferentes híbridos de tomate a los 45 días después de la siembra.	50
Cuadro 13. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de peso seco de las plantas (hojas, tallo, raíz, y total) en ocho híbridos de tomate a los 75 días después de la siembra.	50
Cuadro 14. Comparaciones de medias para las variables de peso seco de las plantas (hojas, tallo, raíz, y total) en diferentes híbridos de tomate a los 75 días después de la siembra.	51
Cuadro 15. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de peso seco de las plantas (hojas, tallo, raíz, y total) en ocho híbridos de tomate a los 90 días después de la siembra.	52
Cuadro 16. Comparaciones de medias de peso seco de las plantas (hojas, tallo, raíz, y total) en diferentes híbridos de tomate a los 90 días después de la siembra.	52
Cuadro 17. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de rendimiento y sus componentes en ocho híbridos de jitomate.	54
Cuadro 18. Comparaciones de medias para las variables de rendimiento y sus componentes en ocho híbridos de jitomate.	55

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Características del invernadero usado durante la fase de semillero del experimento	30
Figura 2. Características del invernadero utilizado durante las fases dos y tres del cultivo.	31
Figura 3. Semillero del jitomate, a) siembra de semilla (una por cavidad) y b) charolas recién sembradas	33
Figura 4. Bolsas utilizadas en el trasplante de las plántulas de jitomate.....	34
Figura 5. Manejo del experimento con ocho híbridos de jitomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) en tres fases de cultivo..	35
Figura 6. Imagen representativa del semillero de jitomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) durante el experimento.	36
Figura 7. Tutorado de plantas en jitomate en el experimento..	37
Figura 8. Planta de jitomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) con despunte del ápice después de la formación del tercer racimo de flores, dejando una hoja por encima de este	38
Figura 9. Desarrollo del cultivo de jitomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L.) durante la fase tres	39

Figura 10. Caracteres morfológicos (grosor del tallo (a), altura (b) y ancho (c) de planta, área foliar (d) e índice de área foliar (e) en ocho híbridos de jitomate, a los 45, 75 y 90 días después de la siembra).....	48
Figura 11. Comportamiento de las variables de peso seco en ocho híbridos de jitomate, a los 45, 75 y 90 días después de la siembra.	53
Figura 12. Frutos representativos de los diferentes cultivares híbridos de jitomate evaluados..	56
Figura 13. Comparación de caracteres morfológicos entre algunos de los híbridos de jitomate evaluados	60
Figura 14. Racimos representativos de los híbridos de jitomate Villa (a) y Cedral (b), frutos tipo saladette y bola, respectivamente.....	62

DEDICATORIA

A Dios por permitirme vivir y disfrutar, esta gratificante experiencia en la
Universidad Autónoma Chapingo.

A Paulina Del Mar y María De Los Ángeles, mi motivación e inspiración.

A mi familia, madre, padres, hermanos, abuelos, sobrinos y seres queridos,
¡gracias, por su inmenso apoyo y energía!

A la Señora Ana, Ana Jesús, Prisi, Jhon, Ana Elisa, Rosa, Nacira y Luis Ramón,
¡gracias por estar ahí en el momento oportuno!

A Carolina, Manuel, Christian, Tranquilino, Andy, Kevin y Jhusua, ¡gracias
socios por su inmenso apoyo y ánimo!

A todos los amigos de la maestría y el doctorado en ciencias en horticultura de
la Universidad Autónoma Chapingo, gracias por cada momento y experiencias
compartidas.

Sinceramente, con mucho cariño para todos,

Gabriel S.A.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo financiero otorgado en la beca de posgrado durante mi estancia en México y estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y a su Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia, por las facilidades locativas, calidad científica de los profesores y apoyo técnico brindado durante mis estudios y trabajo de tesis.

Al Dr. Felipe Sánchez Del Castillo, por su liderazgo, orientaciones y sabiduría transmitida. Una excelente persona y extraordinario científico.

Al Dr. Esaú Del Carmen Moreno Pérez, por su oportuno acompañamiento, destacado conocimiento y excelsas cualidades personales.

Al Dr. J. Jesús Magdaleno Villar, por transmitir su gran experiencia, recomendaciones precisas e incondicional apoyo personal.

Al Dr. Juan Martínez Solís, por la motivación e ideas transmitidas. Excelente maestro y gran amigo. Gracias profe.

A la Dra. María Teresa Martínez Damián, por su disposición y ayuda, en el momento y tiempo justo.

Al Dr. José Oscar Mascorro Gallardo, por su cálida acogida en el posgrado, consejos y orientaciones brindadas durante la maestría.

Al personal administrativo, de laboratorio y campo, de la coordinación de la maestría en ciencias en horticultura de la Universidad Autónoma Chapingo (Rogelio Deheza, Ana Robles, María De Los Ángeles Pérez, Yadira Pérez, Ana Meraz e Ignacio Salazar), por su generoso apoyo incondicional.

A Don Ángel y Doña Mary, grandes amigos en los invernaderos, gracias por su amistad y apoyo en campo durante la tesis.

A Brigitte y Vanesa, estudiantes practicantes, muchas gracias por su amena amistad y apoyo en la toma de datos.

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), por el apoyo institucional de haberme brindado la licencia de estudio.

Para todos ustedes y a los que no alcancé a nombrar, ¡muchas gracias!

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombres y apellidos:	Gabriel Ernesto Silva Acosta.
Fecha de nacimiento:	27 de marzo de 1989.
Lugar de nacimiento:	Pivijay (Magdalena) / Colombia.
CURP:	SIAG890327HNELCB00.
Profesión:	Ingeniero agrónomo y administrador de empresas.

Desarrollo académico

Bachillerato:	Colegio Liceo Pivijay (Colombia).
Licenciaturas:	Universidad Del Magdalena (Colombia).
Posgrado:	Maestría en Ciencias en Horticultura (UACH, México).

RESUMEN

Híbridos de jitomate sometidos a periodos de alta densidad de población en condiciones de invernadero

Como alternativa productiva para incrementar el rendimiento del cultivo de jitomate hidropónico en invernadero, se tuvo como objetivo evaluar el desempeño agronómico de híbridos de jitomate con características contrastantes en hábito de crecimiento y tipo de fruto, bajo un nuevo sistema de producción de tres fases de cultivo (semillero, fase intermedia a una densidad de población de 30 plantas/m² y fase final a una densidad de 8 plantas/m²) con plantas despuntadas a tres racimos. Se compararon los híbridos 'Álvaro', 'Buena Vista' y 'Bullseye F1', de hábito de crecimiento determinado con frutos tipo saladette; 'Cedral' y 'Caronte F1', de crecimiento indeterminado y frutos tipo bola; 'Paipai F1' y 'Villa' (indeterminados, saladette) y 'Jovero' (determinado, bola). Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones. Se midieron variables de tipo morfológico (altura y ancho de planta, grosor del tallo e índice de área foliar), acumulación de biomasa (peso seco de tallo, hojas, raíces), ambas a los 45, 75 y 90 días después de la siembra (dds), y el rendimiento y sus componentes (número de flores y frutos, porcentaje de aborto, peso medio de frutos y rendimiento comercial por planta). Los híbridos de tipo indeterminado presentaron los valores más altos para las características morfológicas y acumulación de biomasa, siendo 'Cedral' estadísticamente superior ($P \leq 0.05$) hasta en un 100 % respecto a 'Álvaro' y 'Buena Vista', para altura de planta y peso seco total a los 90 dds. 'Cedral' tuvo un rendimiento cercano a 2 kg/planta, destacando estadísticamente sobre los demás, por lo cual, de acuerdo con el manejo dado al cultivo, y logrando los siete ciclos de producción anual que ofrece este nuevo sistema de producción, es posible alcanzar un rendimiento potencial cercano a las 1,000 t ha⁻¹ año⁻¹.

Palabras claves: *Solanum lycopersicum* L., agricultura protegida, horticultura.

Tesis de Maestría en Ciencias en Horticultura, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Gabriel Ernesto Silva Acosta

Director de tesis: Dr. Felipe Sánchez Del Castillo

ABSTRACT

Tomato hybrids subjected to periods of high population density under greenhouse conditions

As a productive alternative to increase yield of soilless greenhouse tomato, the aim of this study was to evaluate the agronomic behavior of tomato hybrids with contrasting characteristics in growth habit and fruit type, under a new production system with three phases of cultivation (nursery, intermediate at a population density of 30 plants/m² and final at a density of 8 plants/m²) and plants trimmed to three bunches. The following hybrids were compared: 'Alvaro', 'Buena Vista' and 'Bullseye F1', with determinate growth habit and roma type fruit; 'Cedral' and 'Caronte F1' with indeterminate growth and beef type fruits; 'Paipai F1' and 'Villa' (Indeterminate, roma) and 'Jovero' (determinate, beef). An experimental design of randomized complete blocks with four replications was used. Morphological traits (plant height and width, stem thickness and leaf area index), biomass accumulation (dry weight of stem, leaves and roots), both at 45, 75 and 90 days after sowing (das), and yield and its components (number of flowers and fruits, abortion percentage, mean fruit weight and commercial yield per plant) were recorded. Indeterminate type hybrids presented the highest values for morphological characters and biomass accumulation, being 'Cedral' statistically superior ($P \leq 0.05$) up to 100 % compared to 'Alvaro' and 'Buena Vista' for plant height and total dry weight, at 90 das. 'Cedral' yielded close to 2 kg/plant standing out statistically over the others, thus according to the management given to the crop and achieving the seven annual production cycles that this new production system offers, it is possible to reach a potential yield close to 1,000 t ha⁻¹ year⁻¹.

Key words: *Solanum lycopersicum* L., protected agriculture, horticulture.

Master of Horticultural Science thesis, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Gabriel Ernesto Silva Acosta.

Thesis director: Dr. Felipe Sánchez Del Castillo

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad del ser humano por el desarrollo y adaptación de tecnologías agrícolas para mitigar los distintos factores bióticos y abióticos que limitan la producción agropecuaria, ha favorecido el crecimiento y avance de nuevas técnicas para el manejo de los sistemas productivos comerciales. En ese sentido, la producción de cultivos bajo sistemas de agricultura protegida se ha constituido como una de las opciones tecnológicas más viables y seguras para obtener mayores rendimientos, mejor calidad de los productos cosechados y mayor rentabilidad económica, en comparación con los modelos productivos tradicionales (Moreno *et al.*, 2011).

El uso conjunto de invernaderos y sistemas hidropónicos, representan la estrategia tecnológica más avanzada para la producción de distintos cultivos a escala comercial, debido a los diferentes aspectos que se logran controlar con estos métodos, especialmente variables de tipo microclimático (temperatura, humedad relativa, radiación, velocidad del viento), del ambiente de la raíz (cantidad de agua, nutrientes, oxígeno, temperatura, pH, etc.), biológicas (insectos plagas, microorganismos patógenos, arvenses) y ecofisiológicas (nutrición de las plantas, estreses, fenología), que regulan el potencial productivo de las plantas (Ponce *et al.*, 2015).

Una de las especies que más se cultiva con el uso de las tecnologías de invernadero e hidroponía, por su alta demanda y valor en los mercados, es el tomate o jitomate (*Solanum lycopersicum* L.). En México, por ejemplo, el jitomate es el cultivo hortícola número uno en producción y superficie cultivada, con cerca de 3.3 millones de t cosechadas al año y un área de alrededor de 47,000 ha de superficie cultivada, de las cuales aproximadamente el 70% de la producción, proviene de sistemas de agricultura protegida (SIAP, 2020).

Se estima que en el año 2020 la producción de tomate en invernadero en los Estados Unidos de México abarcó una superficie 16,200 ha, resultado de un crecimiento promedio de 22.7 % anual en los últimos 13 años (FIRA, 2019). Cabe señalar, sin embargo, que, en los últimos tres años, entre 2017 y 2020, este crecimiento ha sido más lento, lo que posiblemente se debe a que se han alcanzado los límites de transición de superficie entre los sistemas convencionales dispuestos a reconvertir sus tecnologías tradicionales de producción, hacia los sistemas de agricultura protegida (SIAP, 2020).

Lo anterior explica, en parte, el por qué la superficie cultivada de jitomate a campo abierto en México ha decrecido entre los años 2007 y 2017, pasado de 64,663 a 35,175 hectáreas, empero, los rendimientos promedios de los cultivos por unidad de superficie y tiempo, han aumentado, a un promedio anual del 4% en los últimos 10 años, llegándose a reportar rendimientos extraordinarios de hasta 600 t ha⁻¹ año⁻¹ en cultivos manejados bajo invernaderos de alta tecnología con sistemas hidropónicos (Sánchez *et al.*, 2014; FIRA, 2019).

En términos de adopción tecnológica, el uso de invernaderos y de técnicas hidropónicas para la producción de tomate en México, así como en varios países de América latina (Argentina, Brasil, Colombia, Perú), ha sido relativamente reciente (menos de 30 años) y el manejo de los cultivos se ha basado en imitar el paquete tecnológico utilizado en algunos países desarrollados donde se cultiva esta hortaliza, como Países Bajos, Francia, Estados Unidos y Canadá, principalmente, siendo esta oferta tecnológica “clásica” o convencional la que predomina en la actualidad en la mayoría de los sistemas comerciales de producción de tomate en invernadero en México (Moreno *et al.*, 2011; Moreno *et al.*, 2021).

El sistema clásico de producción de tomate en invernadero consiste, esencialmente, en el cultivo de materiales de tomate de hábito de crecimiento indeterminado y frutos tipo bola o saladette, con un sólo ciclo de cultivo anual, densidades de siembra entre 2 a 3 plantas m⁻² y producciones de 18 a 22 racimos por planta (66 racimos por metro cuadrado de invernadero), cuyo rendimiento en invernaderos de mediana a alta tecnología puede oscilar entre 300 a 500 t ha⁻¹ año⁻¹ (Kubota *et al.*, 2018).

Este sistema de producción presenta algunos inconvenientes importantes (Sánchez y Moreno, 2017; Heuvelink *et al.*, 2018) como:

1. El sistema es técnicamente difícil de manejar, sobre todo para productores con poca experiencia, pues incluye muchas prácticas culturales delicadas a lo largo del ciclo de cultivo (deschupones, deshojes, desflorado, bajado de plantas, polinización, control estricto de plagas y enfermedades, gestión del clima, etc.).
2. El ciclo tan largo del cultivo, aunado al frecuente manipuleo del cultivo para “deschuponar”, deshojar y “bajar” las plantas, favorece la aparición y proliferación de plagas y enfermedades que pueden afectar seriamente los rendimientos.
3. Necesidad de invernaderos altos y robustos y, por lo tanto, costosos, (6 o más metros de altura) para permitir el crecimiento de las plantas al menos a 3 m de alto, pues se deben diseñar para resistir las cargas por el viento y el tutorado de las plantas en la estructura del mismo, y a más altura será necesario más metal (acero, aluminio galvanizado, hierro) por unidad de superficie.
4. El ciclo tan largo incrementa la probabilidad de que las plantas sean sometidas a más estreses bióticos y abiótico, por las cambiantes condiciones de clima.

Como una alternativa al sistema clásico de producción de jitomate bajo invernadero en México, investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) (Texcoco, México) han desarrollado y validado comercialmente un nuevo sistema o paquete tecnológico para la producción de tomate hidropónico en invernadero, que sin incrementar los costos de producción puede lograr un rendimiento hasta un 50% mayor, logrando resolver algunos de los inconvenientes señalados, haciéndolo una oferta tecnológica viable para pequeños y medianos productores (Sánchez *et al.*, 2010; Sánchez *et al.*, 2012).

A diferencia del sistema de producción clásico, el sistema alternativo desarrollado en la UACH se basa en obtener tres o cuatro ciclos de cultivo por año, según el material de siembra y condiciones ambientales presentes; para ello se parte de retrasar el trasplante de 30 o 35 días del sistema convencional, hasta los 45 a 60 días después de la siembra, combinado con el despunte apical de las plantas por encima de la tercera inflorescencia formada; así se puede lograr que el tiempo transcurrido entre el trasplante y el último corte de frutos se reduzca a menos de 90 días. Debido al menor follaje que se forma en cada planta se manejan densidades de población promedio 8 plantas m⁻², compensándose así el menor rendimiento de cada planta, pues esta densidad equivale a tener un potencial productivo de 96 racimos por metro cuadrado de invernadero al año, logrando rendimientos de hasta 600 t ha⁻¹ año⁻¹ en cuatro ciclos (Sánchez *et al.*, 2012; Sánchez *et al.*, 2017a; Sánchez *et al.*, 2021).

Este sistema alternativo, en comparación con el sistema clásico, demanda una mayor cantidad de semillas y sustrato para la germinación de éstas en el establecimiento de cada ciclo de cultivo; sin embargo, los costos de producción por ciclo son 50 % menores que los del sistema clásico y los costos de producción por kg de tomate producido son similares. De esta manera se logra tener una

producción con menor impacto ambiental, pero con mayor rendimiento y ganancia económica por año (Sánchez *et al.*, 2012; Sánchez *et al.*, 2017a).

En el sistema de producción de jitomate en alta densidad de población y a tres racimos por planta, se plantea el manejo de cada ciclo de cultivo en dos fases. La primera, consiste en mantener las plántulas, a partir de la siembra de las semillas hasta los 45 a 60 días después de la siembra (dds), en charolas o bandejas de germinación, para su posterior trasplante al sitio definitivo en un invernadero. La segunda fase, la cual va desde el momento del trasplante hasta el final de la cosecha del tercer racimo, entre los 140 a 145 dds, es decir, 90 o menos días después del trasplante (Sánchez *et al.*, 2017a; Sánchez *et al.*, 2021).

En este sistema, el trasplante de las plantas puede ser en camas de 1 a 1.2 m de ancho y 0.2 a 0.3 cm de profundidad, o en bolsas de polietileno con más de 6 L de capacidad rellenas con sustrato hidropónico, disponiendo las plantas en juegos de tres a cuatro hileras separadas entre sí a 33 y 25 cm entre plantas, dejando pasillos de 0.5 a 0.6 m de ancho según el espacio disponible del invernadero. Con esta distribución se logran densidades de 8 a 10 plantas m⁻² (Sánchez *et al.*, 2017b)

En la presente investigación se evaluó otro sistema de producción basado en la inclusión de ciertas innovaciones en el manejo del tiempo y del espacio para tratar de incrementar hasta en 100 % el rendimiento anual del sistema de producción de tres racimos por planta en alta densidad de población.

El sistema de producción sigue siendo a tres racimos por planta en alta densidad, pero, dentro de las innovaciones que se plantean, está el ocupar un espacio adicional de invernadero, equivalente a no más de 25 a 30 % de la superficie que se desea cultivar con jitomate, para hacer el ciclo de cultivo en tres fases en vez

de las dos mencionadas. Una que iría de la siembra a el trasplante a los 45 dds (fase uno), otra; del trasplante a los 90 dds en el espacio adicional de invernadero (fase intermedia), y una fase final; de los 90 dds hasta terminar la cosecha.

El propósito de agregar una fase intermedia, a costa de un relativamente pequeño espacio adicional de invernadero, es hacer ciclos de cultivo mucho más cortos en el invernadero definitivo, pues las plantas estarían presentes en él sólo en la tercera etapa, misma que durará unos 50 días para cada ciclo de cultivo.

En esta investigación se plantea y se prueba la hipótesis de que, con este manejo, se pueden llegar a obtener hasta siete ciclos de cultivo al año en el invernadero definitivo haciendo más eficiente su uso, y con rendimientos que pudieran alcanzar las $1,000 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con un mayor beneficio económico para el productor.

En detalle, la primera fase del cultivo es la de semillero, donde las plántulas permanecerán desde la siembra hasta el trasplante durante 45 días.

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, consiste en utilizar un espacio adicional de invernadero trasplantando en bolsas de 25 cm de diámetro y 6 L de capacidad rellenas con un sustrato hidropónico como la arena de tezontle rojo u otro similar. La condición de no ocupar un espacio adicional de invernadero mayor al 30 % del área de producción definitiva (tercera etapa) implica manejar esta fase a una densidad tan alta como 30 plantas m^{-2} de invernadero, lo cual parece posible dado que, en este periodo, las plantas aún no alcanzan sus dimensiones y área foliar, definitivas.

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 el cual se sujeta a las plantas a diferentes alturas con anillos plásticos.

La tercera fase, la cual tiene una duración aproximada de 50 días, es decir, de los 90 a los 140 dds; consiste en trasladar las plantas del invernadero de la fase dos, en su bolsa y con su tutor, hacia el invernadero de producción 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.*, 2017b). El final de la cosecha ocurre en condiciones normales de temperatura entre los 135 a 145 dds según el material de siembra y las condiciones de microclimáticas del invernadero. 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 sistema de producción se planea de tal modo que, mientras haya un cultivo en el invernadero de la fase tres, hay otro en la fase dos en el espacio adicional y uno más en el semillero en la fase uno. Así se puede lograr tener ciclos sucesivos de cultivo cada 50 días. Si bien este sistema ocupará una mayor cantidad de semillas y requerirá de un espacio adicional para la fase dos o intermedia, los costos de producción que se proyectan, estarán cubiertos por el ingreso adicional que percibirá el productor por las toneladas extras que se pretenden obtener con este modelo productivo.

Considerando que el sistema de producción de jitomate que se plantea parece ser, desde el punto de vista económico, muy atractivo para los productores, se presenta, no obstante, un inconveniente crucial que cuestiona su factibilidad técnica. Se trata del posible efecto negativo que la alta densidad de población

puede tener sobre el desarrollo y rendimiento de las plantas, y la calidad de los frutos, especialmente en las últimas semanas de fase intermedia donde habrá una densidad de 30 de plantas m⁻².

Al momento del trasplante (inicio de la fase intermedia), e incluso algunos días después, esta densidad no debe representar ningún problema; sin embargo, debido al continuo crecimiento de las plantas, en particularmente de su área foliar, puede ser estresante hacia el final de la segunda fase el incremento por el sombreado mutuo, pues el índice de área foliar resultante tendería a sobrepasar con mucho el óptimo, considerado entre 3 y 4 (Heuvelink *et al.*, 2018), lo que puede repercutir negativamente en el rendimiento final por unidad de superficie.

Las densidades de población que conducen a índices de área foliar excesivos, además de una menor producción de fotoasimilados por planta, provocan alteraciones morfogénicas mediadas por los fitocromos, tales como: un mayor crecimiento de los entrenudos con tallos elongados que resultan más débiles a la manipulación y más susceptibles a daños mecánicos o a condiciones de estrés, así como hojas más delgadas y con menos área foliar que tienden a apuntar hacia arriba; lo cual, en conjunto, repercute negativamente en el rendimiento final (Wien, 1999; Taiz y Zeiger, 2002; Higuchi y Hisamatsu, 2016; Jishi, 2018). Por ello se hace necesario encontrar algunas formas de aminorar sus efectos hacia el final de esta segunda fase.

Por otro lado, existen en el mercado una amplia gama de cultivares híbridos de jitomate para su manejo en invernadero; varían en características como: hábito de crecimiento, tipo y tamaño de fruto, cualidades organolépticas, resistencias a enfermedades, precocidad, tolerancia a factores adversos, entre otros aspectos. Por ello se considera necesario hacer una evaluación de algunos de ellos, a fin de definir cuáles se adaptan mejor a las condiciones particulares de manejo con

el sistema de cultivo de tres fases propuesto, en términos de crecimiento y rendimiento.

1.1. Objetivos

1. Evaluar el desempeño agronómico de cultivares híbridos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con características contrastantes en hábito de crecimiento y tipo de fruto, mediante un sistema de producción de tres fases de cultivo.
2. Identificar dentro de los materiales híbridos evaluados, los de mayor rendimiento final, que puedan ser utilizados en el sistema de producción de tres fases de cultivo propuesto.

1.2. Hipótesis

Por sus características genéticas, algunos cultivares híbridos de jitomate tolerarán mejor el estrés por sombreado mutuo provocado por la alta densidad de población a la que serán sometidos durante la fase intermedia del cultivo (45 a 90 días después de la siembra), lo que redundará en un mayor rendimiento por unidad de superficie al final del ciclo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades sobre invernaderos e hidroponía

Los distintos riesgos a los que ha estado expuesta la actividad agrícola, han hecho que el hombre busque nuevas alternativas para producir alimentos sin depender cada vez más de las limitaciones que impone su entorno. Bajo esta premisa el concepto de agricultura protegida ha venido ganando auge en la agricultura moderna del siglo XXI, especialmente en las regiones o países donde las condiciones climáticas, restricciones orográficas o las amenazas de tipo biótico, condicionan la actividad agrícola convencional (a campo abierto) (Shi *et al.*, 2019).

La agricultura protegida consiste en el uso de ciertas tecnologías o técnicas para producir cultivos, las cuales tienen por objetivo brindar condiciones idóneas para salvaguardar la integridad física, fisiológica y sanitaria de las plantas cultivadas, de tal manera que éstas puedan expresar su máximo potencial productivo y así obtener cosechas con mejores rendimientos, calidad, precocidad, entre otros atributos, para el beneficio humano o animal (Vargas *et al.*, 2018).

Dentro de las tecnologías más usadas por los sistemas de agricultura protegida sobresalen el uso de casas sombra, acolchamiento de surcos con fertirrigación, los micro y macrotúneles, los invernaderos y los sistemas hidropónicos. Estos dos últimos, desde el punto de vista técnico, constituyen en conjunto la estrategia tecnológica más avanzada en la agricultura comercial moderna, reportándose con ellas los mejores resultados en productividad y rentabilidad económica (Suazo *et al.*, 2014; Souza *et al.*, 2019).

Conceptualmente, Sánchez y Moreno (2017) definen un invernadero como una construcción o estructura agrícola, constituida, principalmente, por un armazón o esqueleto, una cubierta o techo y una cobertura para las paredes. Además, puede contar o no con equipamiento interno, que, integralmente, se utilizan para tratar

de proporcionar un entorno microclimático óptimo a los cultivos que se desarrollen dentro de éste, con cierta independencia del ambiente externo. Sumado a lo anterior, el invernadero actúa como una barrera física que impide el ingreso de plagas o animales que pueden ser nocivos para las plantas que crecen en su interior.

De acuerdo con los requerimientos técnicos que se quieran cumplir, la disponibilidad de recursos económicos que se tenga y los materiales con los que se cuente, un invernadero puede ser de diferentes formas, tener cierta durabilidad y contar con el control total o parcial de algunas variables ambientales en su interior (Sánchez y Moreno, 2017).

Por ejemplo, según la forma de los techos se pueden encontrar invernaderos con diseño tipo gótico, con ventanas cenitales o sin ellas, de una o dos aguas, asimétricos, media elipse o con forma de arco, entre otros. Según su estructura pueden ser metálicos (hierro, acero, aluminio galvanizado, etc.) o de madera, principalmente. La cubierta puede ser de polietileno, policarbonato, acrílico, vidrio o cualquier otro material traslucido. Las paredes laterales o ventanas de preferencia con malla antiplagas. Además, pueden contar con equipos de calefacción y enfriamiento, entre otros dispositivos o mecanismos automatizados para regular temperaturas, humedad relativa, radiación, contenido de CO₂ y velocidad del viento (Sánchez y Moreno, 2017).

Singh *et al.* (2008) agrupan a los invernaderos según una de las clasificaciones más utilizadas en la actualidad, y que tiene que ver con el nivel de tecnología que estos utilicen y con su capacidad de controlar el microclima interno. Así, se encuentran invernaderos de alta, mediana y baja tecnología.

En cuanto a la hidroponía, ésta se define como una rama de la agronomía enfocada en el cultivo de plantas con la ausencia de suelo, es decir mediante el uso de otros medios o sustratos en los que se proporciona una solución nutritiva

a las plantas para que esta se desarrollen, sin detrimento de su calidad o potencial productivo (Sánchez y Escalante, 1988; Jensen, 1997). Etimológicamente la palabra hidroponía se deriva de los vocablos griegos “*hydro*” (relacionado con el agua o algo alusivo a ésta) y “*ponos*” (referente al trabajo o a una labor). Lo cual deriva en que el término hidroponía signifique “trabajo en agua” o “trabajo del agua” (Durán, 2010).

Diversos autores del siglo XX, como Gericke (1937), Huterwall (1977), Resh (1989) y Douglas (1997), consideran a la hidroponía pura como el cultivo de plantas en el que sus raíces crecen y funcionan, inmersas en la solución nutritiva, la cual es el medio acuoso en el que se encuentran disueltos los nutrientes esenciales para el desarrollo de las plantas. Sin embargo, en un concepto más amplio, autores del nuevo siglo como Roberto (2003), Sardare y Admane (2013), Naik *et al.* (2013) y Sharma *et al.* (2018), consideran a la hidroponía como un sistema de producción de plantas en el que las raíces pueden crecer dentro de la solución nutritiva o en algún sustrato inerte donde se aplica periódicamente la solución de nutrientes. El uso de sustratos tiene que ver, principiante, en la necesidad de proporcionar un medio sólido para que las raíces faciliten cierto grado de anclaje y soporte a la planta, especialmente cuando se cultivan plantas de porte alto, tipo arbustivas o cuyo producto principal sean los frutos (Vinci y Rapa, 2019).

Para cultivos hortícolas de hojas o de ciclo corto, como por ejemplo, lechuga (*Lactuca sativa*), acelga (*Beta vulgaris*), espinaca (*Spinacia oleracea*) albahaca (*Ocimum basilicum*), cilantro (*Coriandrum sativum*), arúgula (*Eruca sativa*) o menta (*Mentha arvensis*), el uso de sistemas hidropónicos con el desarrollo de las raíces de las plantas en la propia solución nutritiva, resulta técnicamente una opción viable, mientras que, para cultivos de frutos o de ciclo más largo como tomate (*Solanum lycopersicum* L.), chiles (*Capsicum* spp.), berenjena (*Solanum melongena*), pepino (*Cucumis sativus*) o melón (*Cucumis melo*), la hidroponía

con el uso de sustratos, se convierte en la mejor opción. No obstante, cualquier cultivo se puede adaptar a la técnica hidropónica que se quiera utilizar (Urrestarazu, 2015).

Globalmente se estima que el área destinada a la producción agrícola con el uso sistemas de agricultura protegida (invernaderos, casas sombra y macrotúneles), abarca un área de cercana a 4 millones ha, siendo China, España y Corea del Sur los países con mayores superficies dedicadas a los cultivos bajo invernaderos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Listado mundial de países con mayor superficie dedicada a sistemas agricultura protegida.

País	Superficie total en agricultura protegida (ha)	Superficie dedicada a invernaderos (ha)
China	3,300,000	2,700,000
Turquía	77,200	41,384
España	71,700	55,000
Corea del Sur	56,464	52,100
Japón	53,516	43,200
México	52,000	20,000
Egipto	42,000	6,300
Marruecos	20,000	11,245
Israel	15,000	10,000
Francia	11,500	9,500
Países Bajos	10,000	4,970
Polonia	6,750	5,615
Grecia	5,050	3,800
Total	3,721,180	2,851,880

Fuente: Adaptado de RaboBank (2018), Sánchez y Moreno (2017) y Heuvelink *et al.*, (2019).

En el continente americano, las estadísticas sobre el área dedicada a sistemas de agricultura protegida no son precisas y a veces resultan ambiguas, ya que, en muchos países del continente no se distinguen las cifras entre los diferentes tipos de tecnologías que integran la producción bajo sistemas agricultura protegida (invernaderos, casas sombra, macrotúneles, mallas flotantes. Tal vez, porque la adopción estas tecnologías sea relativamente reciente. Esta situación conlleva a

encontrar algunas contradicciones cuando se consultan diferentes fuentes de información oficiales o científicas. Sin embargo, de manera general, México y Brasil, sobresalen como los países con mayor superficie dedicada a sistemas de agricultura protegida en América, con un área conjunta de 80,000 hectáreas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Países con mayor área destinada a la agricultura protegida en el continente América, reportes entre los años 2018 a 2021.

País	Área total en sistemas de agricultura protegida (ha)	Área en invernaderos (ha)	Área en otros sistemas de agricultura protegida (ha)	Principales Cultivos que se producen	Fuente
México	52.000	20,000	32,000	Tomate rojo	RaboBank, 2018; Gómez, 2021.
Brasil	30.000	Sin datos precisos	Sin datos precisos	Tomate, Fresa	Cabrera, Perdomo y Mujica, 2019.
Colombia	7,700	Sin datos precisos	Sin datos precisos	Flores de corte	Gómez, 2020.
Argentina	7,651	6,517	1,134	Tomate, pimientos.	Cabrera, Perdomo y Mujica, 2019; Clarin.com, 2019.
Canadá	2,000	1,568	432	Tomate, pimientos y pepinos	RaboBank, 2018; Dorais et al., 2015.
Chile	Sin datos precisos	1,544	Sin datos precisos	Tomate y pimientos	Domínguez et al., 2019.
Estados Unidos	1,100	911	189	Berries, Tomate	RaboBank 2018; Hortidaily, 2019.

Fuente: Elaboración propia con datos de diferentes fuentes.

Del Cuadro 2 sobresale que, países desarrollados como Estados Unidos y Canadá, tienen poca superficie dedicada a la agricultura protegida, comparado con países como México o Brasil (países en vía de desarrollo). Esta situación posiblemente se deba a que, por cuestiones climáticas y económicas, les resulte más factible y rentable a los estadounidenses y canadienses, importar algunos productos agrícolas producidos en otros países, donde los costos de producción

y la mano de obra, resultan menos elevados en comparación con su producción agrícola local, además de concentrar sus esfuerzos y tecnologías en otros cultivos de interés (Molina y Victorero, 2015).

2.2 Contexto sobre la producción de tomate en el mundo y en México

El tomate, por su versatilidad y atributos culinarios, se considera la hortaliza número uno por excelencia, siendo uno de los productos hortícolas más extendidos y cultivados alrededor del mundo (Heuvelink *et al.*, 2018).

De acuerdo con FAOSTAT (2019) el área sembrada con tomate en el mundo, en el año 2019, ascendió a 5,030,545 ha con una producción de 180,766,329 t y con rendimiento promedio cercano a 36 t ha⁻¹. China, India y Turquía, sobresalen mundialmente como los países con mayor producción anual de tomate, con 62.8, 19.0 y 12.8 millones de toneladas, respectivamente. Asimismo, estos tres países son los que tienen las mayores superficies dedicadas al cultivo de tomate, con una superficie conjunta que llega a representar el 41% del área mundial cosechada anualmente con esta hortaliza. No obstante, Países Bajos, Alemania, Francia y Estados Unidos, destacan por ser los países con mejores rendimientos por hectárea, con cifras que, como se puede apreciar en el Cuadro 3, pueden superar las 500 t ha⁻¹ en el caso de Países Bajos (FAOSTAT, 2019).

Cuadro 3. Listado de países con las mayores producciones de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en el mundo en el año 2019.

País	Producción (t)	Área cosechada (ha)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
China	62,869,502	1,086,771	58
India	19,007,000	781,000	24
Turquía	12,841,990	181,488	71
Estados Unidos	10,858,990	110,760	98
Egipto	6,751,856	173,276	39
Italia	5,252,690	91,410	57
Irán	5,248,904	121,203	43
España	5,000,560	56,940	88
México	4,271,914	87,917	49
Brasil	3,917,967	54,537	72
Rusia	3,015,010	81,270	37
Marruecos	1,347,085	14,861	91
Chile	1,050,626	15,202	69
Polonia	917,800	13,500	68
Países Bajos	910,000	1,800	506
Japón	714,600	11,600	62
Francia	709,280	5,660	125
Argentina	658,106	16,828	39
Colombia	556,692	8,478	66
Canadá	490,286	5,906	83
Corea del Sur	420,573	6,460	65
Israel	297,910	4,689	64
Alemania	106,690	390	274
Resto de países	33,550,298	2,098,599	50

Fuente: Elaboración propia con datos de FAOSTAT (2019).

En México el cultivo de tomate representa una de las hortalizas que genera mayor ingreso de divisas al país. De las cerca de 4.3 millones de t que se produjeron en el año 2019, el 42% fue destinada a fines de exportación, convirtiendo a México como el principal proveedor mundial de tomates, con un aporte que llega representar el 25% sobre el comercio global de esta hortaliza (FAOSTAT, 2019).

Estados Unidos y Canadá, constituyen los principales países importadores del tomate producido en México, por ejemplo, en el año 2016 el tomate mexicano cubrió el 91% y 65%, respectivamente, de la demanda de tomate importado por estos países, generando ingreso por 2,100 millones de dólares americanos, cuya cifra al año 2030 se estima que puede ascender a 6,600 millones (SAGARPA, 2017; FAOSTAT, 2019).

A nivel interno, los estados de Sinaloa, San Luis Potosí, Michoacán, Jalisco y Zacatecas, conforman el mayor núcleo productivo de tomate en México, con alrededor de 25,000 ha cultivadas en conjunto y una producción cercana a 2 millones de t anuales, que representa el 48% de producción nacional. Se estima que la actividad agrícola del tomate en México genera alrededor 400,000 empleos directos y cerca de un millón más de manera indirecta, constituyéndola en uno de los subsectores socioeconómicos más relevantes la para agricultura mexicana (CEDRSSA, 2018; Celis, 2019).

2.3 Características generales del tomate: de la planta al cultivo

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una planta dicotiledónea, presenta doble juego de cromosomas ($2n$: 24 cromosomas) y se encuentra agrupado en la familia taxonómica de las solanáceas, donde también pertenecen otras hortalizas de interés agronómico para el hombre como la papa (*Solanum tuberosum*) chile (*Capsicum* spp.) o la berenjena (*Solanum melongena*) (López, 2016).

Su centro de origen se sitúa en Sudamérica, especialmente en la región de la cordillera de los Andes comprendida entre los países Chile, Colombia, Perú, Ecuador, y Bolivia, donde existe la mayor diversidad genética y materiales silvestres. Sin embargo, a partir del proceso de colonización de América entre los siglos XV y XVI, su lugar de domesticación se le atribuye a México, donde fue introducido por parte de los españoles. Por otra parte, se reportan registros arqueológicos de que el tomate ya era cultivado por tribus Aztecas de la época

antes del periodo prehispánico, los cuales denominaban con el vocablo “*tomatl*” a un fruto redondeado de piel color amarillento a rojizo, con una pulpa jugosa de muchas semillas (Peralta *et al.*, 2006; Bai y Lindhout, 2007).

En cuanto a su morfología, el tomate es una planta de porte arbustivo y de ciclo de vida anual, aunque hay variedades de que pueden tener un ciclo de vida mayor o menor a un año, según su manejo, condiciones de clima, nutrición, etc. Su crecimiento puede ser de tipo determinado, cuando la planta presenta un desarrollo limitado en su punto de crecimiento apical y yemas laterales, logrando una altura definitiva que, por lo general, no supera los tres metros de altura. El crecimiento también puede ser, en otras variedades, de tipo indeterminado, en el cual se va dando un crecimiento escalonado sobre el tallo principal, donde la penúltima yema va desplazando la inflorescencia terminal, resultando en un crecimiento continuo del tallo, y cuya altura puede crecer indefinidamente según el manejo que se le dé a la planta (Pérez *et al.*, 2002).

El tallo del tomatero es semileñoso, pubescente, tiende a ser de forma cilíndrica o levemente angulado, su grosor en plantas adultas puede ser de 2 hasta unos 5 cm de diámetro, tendiendo a ser grueso el parte basal y más delgado en la parte superior. Del tallo principal pueden surgir tallos secundarios, que le van confiriendo el porte arbustivo a la planta en algunos genotipos (López, 2017). Las hojas son pinnadas y compuestas, formadas de 5 hasta 11 folíolos peciolados, lobulados y con márgenes dentados. Presentan pubescencia por el haz, y se distribuyen con filotaxia de 2/5 de vuelta de 360° alrededor del tallo. En condiciones normales se forman entre 10 a 11 hojas antes de la primera floración (López, 2017; Heuvelink *et al.*, 2018).

Las flores del tomate presentan polinización autógama; el cáliz está formado, por lo general, con cinco sépalos al igual que la corola, la cual presenta una

coloración amarilla. Se agrupan en inflorescencias de tipo racimo que pueden ir desde una hasta más de 50 flores por racimo. Las inflorescencias crecen sobre el tallo principal o ramas secundarias y ocurren cada dos o tres hojas (López, 2017).

El sistema radical tiende a ser superficial, no superando los 100 cm profundidad. Lo conforma una raíz principal, raíces secundarias y adventicias, cuya mayor actividad se sitúa en los primeros 20 cm de profundidad (López, 2017).

Las semillas de tomate son planas con forma lenticelar y por lo general no supera los de 4 mm de largo, 1 mm de espesor y 3 mm de ancho. Es de color claro a amarillo opaco y se pueden encontrar hasta 200 semillas por fruto (López, 2017).

El fruto es una baya subesférica, globosa, semiovalada o alargada, con dos o más lóculos, y cuyo peso puede ir desde unos pocos gramos hasta unos 600 g. cuando está madura, puede ser de color rojo, amarillo, púrpura o negro (López, 2017).

En sistemas productivos comerciales, la siembra del tomate se realiza, generalmente, en charolas o bandejas de germinación, con algún sustrato especial (turba, espuma agrícola, perlita, lana de roca) que garantice la adecuada germinación e inocuidad de las plántulas. En condiciones normales la semilla germina entre los 10 primeros días después de la siembra (dds), y el trasplante hacia el sitio definitivo se da entre los 30 a 50 días después de emergida las plántulas. La floración puede ocurrir de manera precoz o tardía, en algunos materiales, entre los 35 a 50 dds y el primer racimo de frutos apto para cosecha puede estar entre los 90 a 110 dds. Según al manejo del cultivo, su ciclo fenológico puede ir desde unos pocos meses (3 a 4) hasta un año, llegando a producirse no más de 30 racimos por planta, con cosechas semanales (Heuvelink *et al.*, 2018).

2.4 Aspectos ambientales y nutricionales en la producción de tomate

Para un óptimo desarrollo y rendimiento del cultivo, la planta de tomate requiere de ciertas condiciones ambientales y nutricionales, precisas. Estos requerimientos, con el uso de invernadero y de sistemas hidropónicos, pueden ser cubiertos de tal forma que el genotipo pueda expresar su máximo potencial productivo (Sánchez *et al.*, 2010).

En condiciones de invernadero, para el cultivo de tomate, se recomienda manejar temperaturas diurnas entre 22 a 25°C con un máximo de 30° y temperaturas nocturnas entre 15 y 20°C, pero que no bajen de 10°C, de tal forma que se genere un diferencial de temperatura con un promedio de 8°C entre el día y la noche, para favorecer el óptimo crecimiento de cultivo y la formación de flores. La humedad relativa idónea durante el día se ubica entre 50 y 70 %, la cual, en combinación con la temperatura, genera un déficit de presión de vapor entre 1.2 y 1.5 Pa, para una adecuada transpiración de las plantas. Altos valores de humedad relativa, además de propiciar la aparición de enfermedades fungosas en el cultivo, pueden generar dificultad en la liberación del polen y, por lo tanto, reducir la polinización (Heuvelink *et al.*, 2018).

De acuerdo con el tipo de invernadero que se disponga para el cultivo de tomate, la radiación interna que atraviesa la cubierta, en términos de radiación fotosintéticamente activa (densidad de flujo de fotones fotosintéticos), debe oscilar en el día entre los 1,100 y 1,700 μmol de fotones $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para una adecuada actividad fotosintética de las plantas (Heuvelink *et al.*, 2018).

El viento en el interior de los invernaderos por lo general fluye a bajas velocidades; no obstante, se recomienda que al menos haya entre 45 a 60 renovaciones del volumen del aire contenido, por hora. Es decir, para un invernadero de comercial de unos 60 metros de largo, el viento en su interior debe circular por lo menos entre 2.7 y 3 k h^{-1} . Para favorecer la ventilación del

invernadero y que el movimiento de aire sea continuo, se debe contar con un área de ventanas adecuadas, o bien, la opción de contar con equipo que favorezca la formación de corrientes de aire. El movimiento del aire en el invernadero favorece la liberación del polen en las flores de tomate (Sánchez y Moreno, 2017; Heuvelink *et al.*, 2018).

El contenido de CO₂ en el aire del invernadero, con una adecuada ventilación, por lo general tiende a estar a la misma concentración que en ambiente exterior, o sea, alrededor de unas 350 ppm (0.5 a 0.6 g m⁻³ de aire según altura sobre el nivel del mar), lo cual es adecuado para el cultivo de jitomate. En algunos invernaderos se puede fertilizar el aire inyectando CO₂ hasta aumentar su concentración entre dos a tres veces por encima del nivel normal, y si bien el cultivo responde con una mayor tasa fotosintética, esta actividad desde el punto de vista económico resulta, la mayoría de las veces, no redituable por los altos costos que implica (Sánchez y Moreno, 2017).

Por otra parte, en cuanto a los requerimientos nutricionales del cultivo de tomate se ha encontrado que, para producir una tonelada de frutos, se requiere cerca de 11 kg de los macrolementos: nitrógeno (4 kg) fósforo (0.8 kg), y potasio (6 kg), mientras que, para los elementos calcio, magnesio y azufre, se extraen 3, 1.2 y 0.8 kg t⁻¹, respectivamente. Finalmente, respecto a los microlementos (boro, cobre, hierro, manganeso, zinc y molibdeno) se extraen entre todos no más de 0.08 kg, siendo el hierro y manganeso, los elementos más requeridos (Quesada y Bertsch, 2012).

2.5 Híbridos comerciales de tomate: particularidades técnicas y de mercado en México

Comercialmente en el mundo existe una amplia gama de semillas de cultivares de tomate para su uso agronómico. Hay desde materiales de hábito de crecimiento determinado e indeterminado, hasta gran variedad de formas y

colores de frutos, tanto para la agroindustria, como para el consumo en fresco (FDA, 2016).

En México, de manera general los materiales de hábito de crecimiento determinado son los más usados en los sistemas de producción a campo a abierto, donde las plantas se conducen a ciclos de cultivo de 4 a 8 meses, y pueden o no llevar tutorado. Para este sistema convencional de producción se cultivan tomates con fruto tipo saladette, principalmente, y la producción se destina mayoritariamente al mercado interno local (Cih *et al.*, 2011).

En la producción bajo invernadero, los materiales de tomate de hábito indeterminado son los que predominan en México. En estos se hace indispensable utilizar sistemas de tutorado y controlar las labores de poda con el fin de dejar en producción uno o dos tallos por planta. En esta condición se cultivan tanto tomates tipo saladette como bola. La producción con materiales tipo bola se destina, en su mayoría, para fines de exportación, mientras que, en la demanda interna predomina el gusto de los consumidores por los frutos tipo saladette (Cih *et al.*, 2011).

Las principales casas productoras o comercializadoras de semillas de tomate en México son “*Harris Moran*”, “*Sakata*”, “*Ahern Seeds*” “*Hazera*”, “*Enza Zaden México*”, “*Seminis*”, “*Numhems*” “*Zeraim Gedera*”, entre otras. Las cuales son empresas dependientes de alguna de las principales multinacionales dedicadas a la producción de semillas de hortalizas en el mundo, “*Bayer Crop Science*”, “*Syngenta*”, “*Limagrain*”, “*Sakata Seed Corp*” “*BASF*” “*Enza Zaden*”. (Domínguez *et al.*, 2019; Washington, 2021). Estas casas productoras de semillas manejan materiales recomendados para diferentes condiciones agroclimatológicas, con resistencia a algunos patógenos y con atributos diferenciales en cuanto a precocidad, vida de anaquel, contenido de sólidos totales en pulpa, color, peso y forma del fruto, principalmente.

Según las bases de datos del Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas (SNICS) de México, entre los años 2005 y 2020, aparecen registradas cerca de 100 cultivares de jitomate en el “Catálogo Nacional de Variedades Vegetales”, y si bien, no existen datos precisos sobre los materiales más sembrados en la actualidad en México, se ha identificado que al menos el 96% del área cultivada con jitomate en el país es sembrada con materiales genéticamente mejorados, ya sean producidos nacionalmente o importados (El Economista, 2015; SNICS, 2021).

Algunos cultivares de jitomate que se pueden conseguir en la actualidad (año 2021) en el mercado mexicano y que cuentan con cierto nivel de aceptación por parte de los agricultores son: Álvaro (determinado – saladette), Avalantino (indeterminado - bola), Bullseye F1 (indeterminado - saladette), Mesías (Indeterminado - saladette), Paipai F1 (indeterminando – saladette), Villa (indeterminado – saladette), El Cid F1 (indeterminando - saladette), Ramsés (indeterminado - saladette), Caronte F1 (indeterminando – bola), Moctezuma F1 (Indeterminado - saladette), Red Paradise (indeterminando – cherry) y Vengador (indeterminando - saladette) (SNICS, 2021).

2.6 Estimación de unidades calor (días-grado): caso tomate

La duración del ciclo de cultivo del tomate está fuertemente correlacionada con la temperatura y la variedad; por ejemplo, tanto Higashide (2016) como Heuvelink y Okello (2018), destacan que la duración de la antesis de una flor y la cosecha de su fruto maduro es de aproximadamente 70 días a una temperatura diaria promedio de 17 °C y de unos 42 días a 26° C.

De manera general para el caso de la planta de tomate, se ha establecido que la temperatura base (cero fisiológico) ocurre a los 10°C, lo que significa que, cuando la temperatura ambiental está en este punto, los procesos fisiológicos de la planta

se ralentizan de tal forma que no hay crecimiento o desarrollo (Heuvelink *et al.*, 2018).

Por otra parte, cuando la temperatura del entorno llega a superar los 35°C, la planta entra en procesos de estrés fisiológico en donde muchas enzimas y pigmentos fotosintéticos dejan de funcionar de manera adecuada, generando el cese progresivo de los procesos de crecimiento y desarrollo vegetal. Asimismo, las altas temperaturas pueden ocasionar la deshidratación de los granos de polen en las plantas en floración, conllevando esto a que haya problemas con la polinización, especialmente cuando se presenta una humedad relativa menor al 40 % (Heuvelink *et al.*, 2018).

Una herramienta que puede ayudar en esta planeación es la definición de los días-grado o unidades calor (constante térmica) que requiere cada variedad para completar su ciclo y cada una de sus fases de cultivo.

De acuerdo con Ortiz (1987), las plantas necesitan acumular una misma cantidad de calor para su pleno desarrollo o maduración cuando los demás factores climáticos y edáficos se presentan en condiciones óptimas. A esta cantidad de calor se le denomina constante térmica y es específica para cada cultivo y variedad. El mismo autor cita varios métodos que se pueden usar para estimarla (directo, residual, 10-30, exponencial, índice de Geslin).

El método directo consiste en hacer la sumatoria de las temperaturas medias de cada día durante todo el ciclo del cultivo. El resultado serán las unidades calor que tomó el cultivo para desarrollarse. Este método es ideal utilizarlo cuando las temperaturas mínimas y máximas, se mantiene dentro del rango de las temperaturas cardinales del cultivo, es decir, por encima del cero biológico y por debajo de la temperatura de inhibición, lo cual se da con frecuencia en condiciones de invernaderos de mediana y alta tecnología. (Perry *et al.*, 1997).

En el método residual se considera, sustraer de la temperatura media del día, la constante para el cero biológico del cultivo, y hacer la suma total del acumulado para cada día durante todo el ciclo del cultivo, lo que conlleva a tener una medida más precisa de los días-grado en aquellos ambientes donde las temperaturas medias diarias tienden a estar por debajo del cero fisiológico. Este método junto con el de la estimación directa de las unidades calor son, por lo general, los más recomendados a usar en cultivos de tomate desarrollados en regiones subtropicales y templadas (Perry *et al.*, 1997).

Finalmente, las metodologías para calcular las unidades calor mediante el método, exponencial, el 10 - 30, el índice de Gelsin y otros, se basan en fórmulas elaboradas que involucran algunas constantes adimensionales para ajustar el cálculo de las unidades calor cuando se presentan condiciones ambientales particulares para el cultivo; por ejemplo, cuando las temperaturas diarias son muy elevadas durante un tiempo (días o semanas) y luego bajan y se mantienen así por otro periodo tiempo y luego vuelven a subir, o cuando hay variaciones en la duración del día durante el ciclo del cultivo, afectándose con más o menos datos los promedios de temperaturas máximas y mínimas, diurnas y nocturnas (Perry *et al.*, 1997).

2.7 Costos de producción en sistemas hortícolas: énfasis en jitomate

La estructura de costos de producción en todos los sistemas de producción agrícola, parte de los componentes de la fórmula de la ganancia mostrada a continuación (Morales *et al.*, 2017; Sánchez y Moreno, 2017):

$$G = PvR - Ci.$$

Donde:

G: ganancia monetaria o ingresos netos.

Pv: precio de venta del producto agrícola.

R: rendimiento del cultivo (generalmente en $t\ ha^{-1}$).

Ci: costos de inversión en el cultivo.

Es decir, para estimar que tan redituable es un sistema productivo, hay que tener como mínimo los datos de producción (en calidades o presentaciones del producto), el precio de venta promedio o detallado sobre el cual se vendieron las diferentes categorías de la producción (en caso de que las haya), y los costos de instalación y mantenimiento del cultivo (costos fijos y variables). A partir de estos datos se pueden obtener algunos indicadores (costos unitarios de producción, punto de equilibrio, rentabilidad, margen bruto de mercadeo, valor actual neto, tasa interna de retorno, etc.) para validar la eficiencia económica y técnica del sistema productivo en cuestión (Hernández *et al.*, 2017).

Para el caso del jitomate en el mercado mexicano nacional, se ha encontrado, por ejemplo que el precio de venta se encuentra fuertemente influenciado por la estacionalidad de la producción en los diferentes periodos del año, es decir, los meses en que los precios por kilogramo son mayores (por encima del promedio anual) coinciden con el periodo de otoño – invierno (octubre, noviembre, diciembre, enero) donde se genera una baja oferta de la producción debido a que se reducen las áreas de cultivo a campo abierto por las bajas temperaturas que se presentan en el país, especialmente, en algunos de los Estados con mayor producción; por ejemplo, Sinaloa. Lo contrario ocurre en el periodo de primavera-verano (meses de mayo, junio, julio), donde una sobreoferta de la producción se acumula generando un decrecimiento en el precio de comercialización de jitomate, el cual puede bajar, en algunos mercados hasta un 200% respecto al precio máximo en los periodos de baja oferta (Benítez, 2019).

Para el año 2020 en la central de abastos de Iztapalapa, principal centro de mercado de frutas y hortalizas frescas en el distrito federal de ciudad de México y uno de los más importantes del país, para el jitomate tipo saladette, categoría

primera, se presentó un precio promedio anual de venta al mayoreo por los bodegueros de dicha central de \$ 17.7 pesos mexicanos por kilogramo (0.85 USD kg⁻¹), mientras que, para el jitomate bola (categoría primera) fue de \$ 23 pesos kg⁻¹ (1.1 USD kg⁻¹), según datos mostrados en el Cuadro 4 (SNIIM, 2021).

Cuadro 4. Resumen de precios de comercialización para el jitomate saladette y bola, en la central de abastos de Iztapalapa (México D.F, México) durante el año 2020.

Tipo de jitomate	Precio anual (\$ kg ⁻¹)		
	Promedio	Máximo	Mínimo
Saladette de primera (rojo, entre 130 a 160 g)	17.7	51.6	14.5
Bola de primera (rojo, entre 180 a 220 g)	23	26	19

Fuente: Elaboración propia con datos de SNIIM (2021).

El rendimiento, de acuerdo a la producción total y el área sembrada con jitomate en México, para el año 2019, fue de aproximadamente 50 t ha⁻¹; sin embargo, para las condiciones del cultivo en invernadero e hidroponía, los rendimientos promedio son mayores, oscilando entre 80 a 150 t ha⁻¹ para sistemas de baja tecnología, y entre 150 t ha⁻¹ a 600 t ha⁻¹ para ambientes protegidos de mediana y alta tecnología, según el material de siembra y el manejo que se le dé (Sánchez y Moreno 2017; FAOSTAT, 2019).

En cuanto a los costos de instalación u operación, para el caso de la producción de jitomate en invernadero con hidroponía, Terrones *et al.* (2020), reportan que, bajo un sistema clásico de producción (ciclo largo del cultivo con 3 plantas m⁻²) en invernaderos de mediana a alta tecnología ubicados en Valle de Tulancingo (Hidalgo, México) entre los años 2018 y 2019, se ocuparon costos de producción de \$ 2.3 millones de pesos (110,000 USD) por hectárea durante un ciclo anual del cultivo; lo cual, con un rendimiento logrado de 425 t ha⁻¹ y un precio de venta

de 11 pesos kg^{-1} para el 90% de la producción, generó una ganancia neta de 2.2 millones de pesos; es decir, por cada peso invertido, ganaron otro.

Por otra parte, Moreno *et al.*, (2021) mencionan que, para un sistema de producción de jitomate bajo el paquete tecnológico de alta densidad propuesto por la UACH (tres a cuatro ciclos de cultivo por año, 8 plantas m^{-2} y despuntadas a tres racimos), con invernaderos de mediana tecnología en el Estado de Puebla (México) se ocupan costos de inversión similares por hectárea que el sistema clásico, sin embargo, con un rendimiento que puede llegar a 600 t ha^{-1} y con un precio de venta base de 10 pesos kg^{-1} para el 90% de la producción, se puede generar una ganancia neta de 3 millones de pesos, o sea, obtener 1.5 pesos por cada un peso invertido.

Respecto a los insumos, los costos asociados a semillas, fertilizantes y sustratos, representan cerca del 85% del costo total en agroinsumos utilizado en la producción convencional en invernaderos en México. De igual forma, los valores pagados por concepto de mano de obra, y el valor depreciado por el uso del invernadero, constituyen cerca del 65% del total los costos de producción (De Santiago, 2008).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación y duración del experimento

El desarrollo del presente proyecto de investigación se llevó a cabo en el campo agrícola experimental del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo (Texcoco, México), ubicado en las Coordenadas 19°29'34.54"N y 98°52'20.73"O a 2,270 m sobre el nivel del mar, con tipo de clima templado subhúmedo (Cw) según Köppen (Briggs *et al.*, 2003), temperatura media anual 15.9°C y una precipitación de 686.0 mm promedio por año (Reina, 2020).

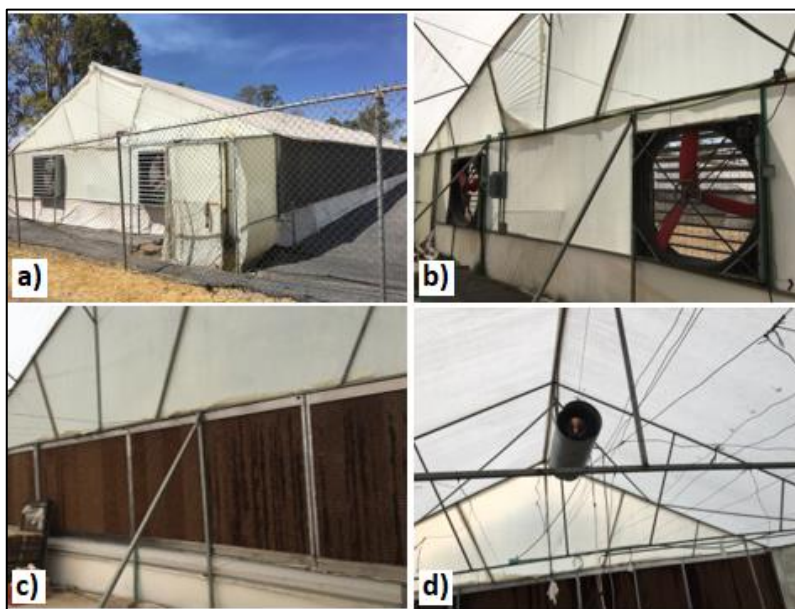
La investigación se realizó entre el primer y tercer trimestre del año 2021 (meses de marzo a septiembre), realizándose un ciclo de siembra de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en condiciones de invernadero con hidroponía. La siembra se realizó el 04 de marzo de 2021, con una duración aproximada del ciclo del cultivo de cinco meses.

3.2 Características de la tecnología utilizada

El desarrollo del cultivo se llevó a cabo en dos invernaderos. El primero, para la fase de germinación de las plántulas (de los 0 a los 45 días después de la siembra), consistió en un invernadero de una sola nave, tipo capilla de dos aguas, de 30 m de largo por 11 m de ancho, una altura máxima de 5.5 m y en orientación norte-sur (Figura 1). El invernadero, estaba construido con un armazón metálico (acero galvanizado), contaba con una cubierta de polietileno térmico color blanco lechoso y alta transmisión de luz. El área de ventilación total fue de un 32 % (108 m²), respecto al área cubierta por el invernadero, con ventanas protegidas con malla antiafidos de 40 x 25 mesh (40 x 25 hilos por pulgada cuadrada). El suelo del invernadero estuvo cubierto con un *Ground Cover* blanco.

Se tuvo como equipamiento para regular la temperatura interna de este primer invernadero, un sistema de enfriamiento evaporativo mediante el uso de un muro

húmedo hecho de paneles de fibra de celulosa (9.8 m de largo por 2 m de alto) y dos extractores de aire, ubicados en lado apuesto del muro húmedo y accionados con motores de 1.5 HP de potencia y un caudal de $44,000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, los cuales se ponían a funcionar para mantener temperaturas diurnas entre 20 a 25 °C. Durante las noches, si las temperaturas bajaban por debajo de los 11°C, se activaba el sistema de calefacción del invernadero, compuesto por un calentador de alimentación directa (*Dragonfire*) de 250,000 BTU de capacidad y con funcionamiento a partir de gas LP (licuado de petróleo).



Fotografías: Gabriel Silva Acosta, 2021.

Figura 1. Características del invernadero usado durante la fase de semillero del experimento, vista frontal (a), extractores (b) muro húmedo (c) y calentador (d).

El segundo invernadero, donde se cumplió la fase dos y tres del cultivo, de los 45 a los 90 días y de 90 a los 145 días después de la siembra, respectivamente, consistió en un invernadero de tres naves, orientación norte-sur, de 24 m de ancho por 45 m de largo ($1,080 \text{ m}^2$) y 6 m de altura máxima, con diseño de techo tipo gótico de una ventana cenital por nave, orientadas hacia el oeste, y camas

de siembras hechas en concreto y rellenas con arena de tezontle rojo como sustrato hidropónico (Figura 2).

Este segundo invernadero, construido en un armazón de acero galvanizado contó con cubierta de polietileno térmico de color blanco de alta difusión de luz, área de ventanas de cerca del 28 % (laterales más cenitales) respecto al área del invernadero y protegidas con malla antiafidos de 40 x 25 mesh. Al igual que el primer invernadero, este también contó un sistema de regulación de las temperaturas internas a partir de un muro húmedo con paneles de celulosa (28 m de largo por 2,6 de alto) y con tres extractores (uno por cada nave) accionados con motores de 1.5 HP y capacidad de desplazamiento del aire 40,900 m³ h⁻¹. Asimismo, el invernadero contaba con tres calentadores de gas LP (*Dragonfire*); sin embargo, estos no se utilizaron debido a que las temperaturas internas se mantuvieron dentro del límite mínimo requerido por el cultivo (>10°C).

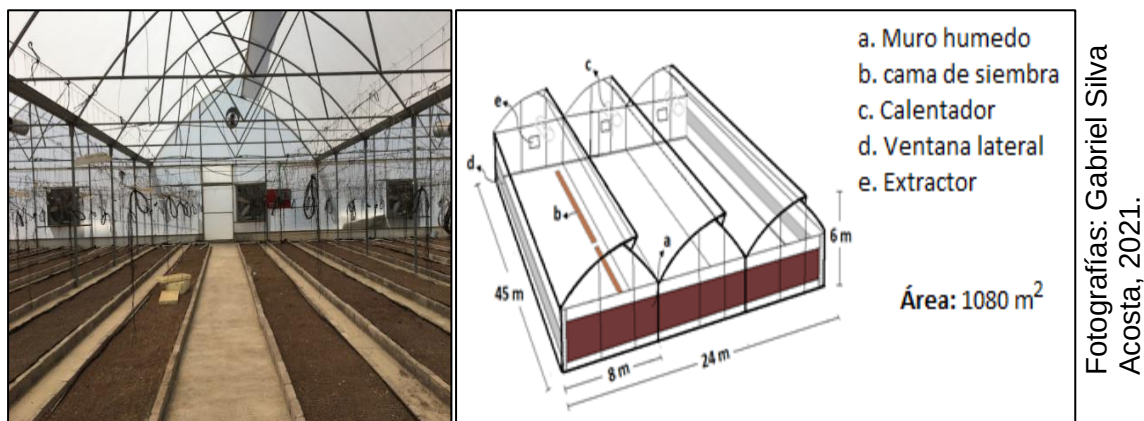


Figura 2. Características del invernadero utilizado durante las fases dos y tres del cultivo, vista interna (izquierda) y representación esquemática (derecha).

3.3 Material vegetal utilizado y tecnología de siembra

Se utilizaron semillas de ocho materiales híbridos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), comúnmente comercializados en México, con características contrastantes en cuanto a hábito de crecimiento y forma de fruto, entre otras, los cuales fueron considerados cada uno como un tratamiento (Cuadro 5).

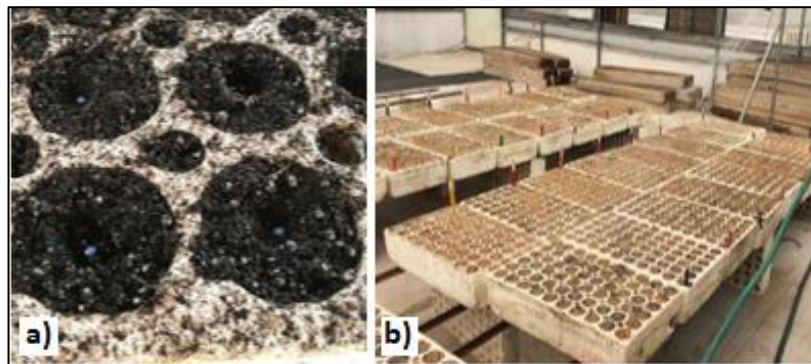
Cuadro 5. Características de los materiales híbridos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) utilizados como tratamientos en la investigación.

Nombre del Híbrido	Hábito de crecimiento	Tipo de fruto	Peso promedio de frutos (g)	Maduración de frutos	Resistencias o tolerancias	Casa comercial
‘Álvaro’	D	S	160 a 180	Intermedia	Vd, Fol (razas 1 y 2), Mi, Mj, ToMV, ToTV, TSWV, TYLCV.	“Hazera”
‘Buena Vista’	D	S	150 a 170	Intermedia	Aal, Fol (razas 1, 2 y 3), Vd, Mi, TSWV, TYLCV.	“Sakata”
‘Bullseye F1’	D	B	160 a 180	Precoz	Fol (razas 1 y 2) Va, Vd, TYLCV, ToTV.	“Seminis”
‘Cedral’	I	B	250 a 300	Tardía	Vd, Fol (razas 1 y 2), For, ToMV, TSWV, Pf, Mi.	“Zeraim Gedera”
‘Caronte F1’	I	B	300	Tardía	Vd, Fol (razas 1,2 y 3), Mi, ToMV, TYLCV, SWV.	“Nirit Seeds”
‘Jovero’	D	B	200 a 300	Intermedia	Vd, Fol (razas 1,2 y 3), ToMV, Mj.	“Hazera”
‘Paipai F1’	I	S	160 a 170	Precoz	For, Fol (razas 1 y 2) Va, Vd, Ma, Mi, Mj, TSWV, ToMV.	“Enza Zaden”
‘Villa’	I	S	160 a 180	Precoz	Aal, Fol (razas 1,2 y 3) Vd, TSWV.	“Sakata”

D: Determinado. I: Indeterminado. S: Saladette. B: Bola. Fol: *Fusarium oxysporum* f. sp. *lagenariae*. For: *Fusarium oxysporum* f. sp. *radicis-cucumerinum*. Aal: *Alternaria alternata*. Va: *Verticillium albo-atrum* Vd: *Verticillium dahliae*. Mi: *Meloidogyne incognita*. Mj: *Meloidogyne javanica*. Ma. *Meloidogyne arenaria*. ToMV: Tomato mosaic virus. ToTV: *Tomato torrado virus*. TSWV: *Tomato spotted wilt virus* TYLCV: *Tomato yellow leaf curl virus*. Pf: *Passalora fulva* f. sp. *lycopersici*. Fuente: Elaboración propia con información de catálogos comerciales.

Respecto a la tecnología de siembra, en la fase de semillero se utilizaron, charolas de poliestireno expandido de 60 cavidades (seis hileras a lo largo de 10 cavidades cada una, con una separación de 5.8 por 5.8 cm entre cavidades) con capacidad volumétrica de 200 cm³ por cada cavidad. Las charolas fueron previamente lavadas con agua común y desinfectada con sales cuaternarias de amonio (Anibac® Plus al 45%), antes de su uso.

Las charolas se rellenaron con una mezcla de sustrato a base de turba canadiense (*Peat moss*) más perlita, en una relación igual en cuanto a volumen (1:1). Las semillas se sembraron a 0.5 cm de profundidad en promedio en cada cavidad, colocando una semilla por alveolo. Posterior a la siembra, se extendió en cada charola una capa delgada (2 a 3 mm) de vermiculita y se aplicó un riego con agua corriente (Figura 3).



Fotografías: Gabriel Silva Acosta, 2021.

Figura 3. Semillero del jitomate, **a)** siembra de semilla (una por cavidad) y **b)** charolas recién sembradas, con capa de vermiculita aplicada en la parte superior.

En el trasplante las plántulas se colocaron en bolsas de polietileno de color negro de 120 micras de grosor y con 6 L de capacidad (35 cm de alto y 15 cm de diámetro), rellenas con arena de tezontle rojo, con la mayoría de sus partículas entre 1 y 5 mm de diámetro. Previo al trasplante, el sustrato se humedeció con agua corriente para facilitar hacer los huecos donde se colocaron las plantas (Figura 4).



Figura 4. Bolsas utilizadas en el trasplante de las plántulas de jitomate. **a)** bolsa individual. **b)** bolsas rellenas con arena de tezontle rojo, ubicadas en la cama de siembra.

3.4 Manejo hidropónico del experimento

Las plántulas fueron irrigadas desde la siembra con una solución nutritiva con las siguientes concentraciones de nutrimentos en mg/L: Nitrógeno (en forma de nitrato), 200; Fósforo, 50; Potasio, 200; Calcio, 250; Magnesio, 50; Azufre, 150; Hierro, 2; Manganeso 1; Boro, 0.5; Cobre, 0.1 y Zinc, 0.1. Durante los primeros 15 días después de la siembra (dds) la solución se aplicó a la mitad de su concentración; de ahí hasta el final de la cosecha se usó la solución a 100% de concentración (Moreno *et al.*, 2021).

En la fase de semillero durante los primeros 15 días se realizó un riego diario (500 cm³ de solución nutritiva por charola, aproximadamente), posteriormente después de los 15 hasta los 45 dds, se aplicaron dos riegos por día (1 L de solución nutritiva por charola al día, aproximadamente). Después de los 45 dds hasta el final del cultivo, la aplicación del riego con la solución nutritiva se realizó con cintillas de goteo (goteros integrados) y mediante la programación de un temporizador electrónico. Se programaron nueve riegos diurnos entre las 9 a.m. y las 5:00 p.m., o sea, un riego por cada hora. La duración de cada riego fue de 15 minutos con una descarga aproximada de 10 cm³ minuto⁻¹ por cada gotero, es decir, al final del día cada planta recibía, aproximadamente, 1.35 L de solución

nutritiva. Ocasionalmente se realizaba un riego extra de 15 minutos a las 6:00 p.m. para todo el experimento; esto con el fin de favorecer el lavado de sales en el sustrato.

3.5. Fases del cultivo y manejo agronómico

El manejo del cultivo se realizó en tres fases; fase uno (semillero), de los 0 a 45 dds, en la cual las plántulas de cada material híbrido se mantuvieron en las charolas de siembra en el invernadero uno. Fase dos (intermedia), de los 45 a los 90 dds, donde las plántulas se trasplantaron en las bolsas de 6 L dispuestas en el invernadero dos, a una densidad de 30 plantas m^{-2} . Fase tres (final), de los 90 a 150 dds, aproximadamente, la cual consistió en reacomodar las plantas de la fase dos a una menor densidad poblacional (8 plantas m^{-2}), en el mismo invernadero, para completar el llenado y maduración de frutos (Figura 5).



Figura 5. Manejo del experimento con ocho híbridos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en tres fases de cultivo. **a)** Fase de semillero, charolas de 60 plántulas. **b)** Fase intermedia, alta densidad poblacional, 30 plantas m^{-2} . **c)** Fase final, densidad poblacional de 8 plantas m^{-2} . Fotografías: Gabriel Silva Acosta, 2021.

- **Fase uno:** En el ciclo uno de siembras, a los 30 y 45 dds, se realizó una aplicación foliar de paclobutrazol (PBZ) (Cultar® 25 SC) a 50 ppm de ingrediente activo a todos los materiales híbridos. El PBZ es un triazol que

al ser aplicado sobre plántulas de jitomate actúa como un regulador de crecimiento, inhibiendo la síntesis de giberelinas, sin afectar negativamente el desarrollo fenológico y productivo de las plantas (Berova y Zlatev, 2000; Miguel *et al.*, 2021).

Las aplicaciones de PBZ se hicieron con el fin de que las plántulas de cada material híbrido no crecieran tanto (en altura, ancho y área foliar) y poder así coadyuvarlas a soportar mejor la presión de densidad a la estarían sometidas durante la fase intermedia (fase 2), especialmente durante los últimos 10 a 15 días de esta fase, donde habría 30 plantas m⁻² generándose competencia por radiación solar incidente, entre otros inconvenientes.

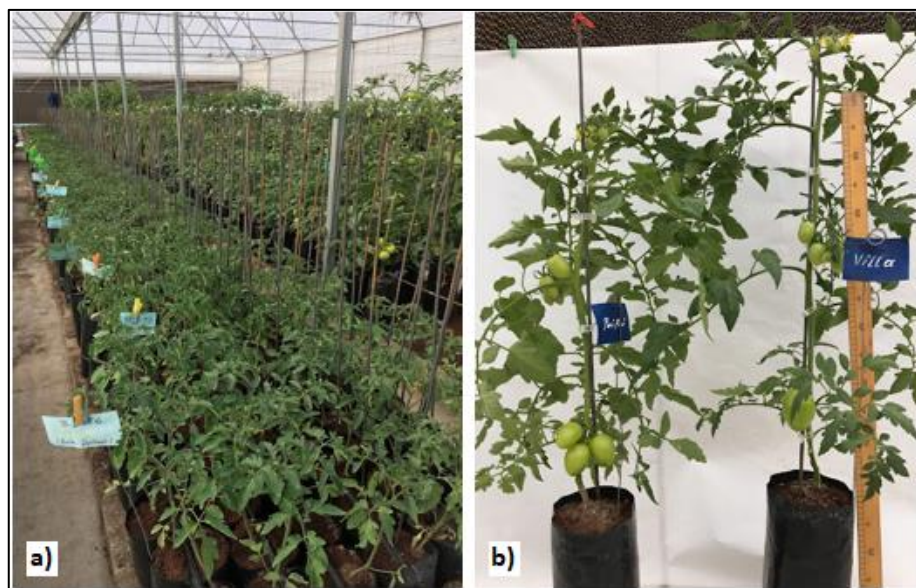
Durante esta fase de semillero (Figura 6), se realizaron aplicaciones preventivas de insecticidas orgánicos a base de ajo (Garlix® ORG) y de un fungicida preventivo de amplio espectro y baja residualidad (oxicloruro de cobre), ambos en sus dosis más bajas.



Fotografía: Gabriel Silva Acosta, 2021.

Figura 6. Imagen representativa del semillero de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) durante el experimento.

- **Fase dos:** Durante la fase intermedia, de los 45 a los 90 dds, las plantas, crecieron bajo las condiciones del invernadero dos (descrito anteriormente) a una densidad de 30 plantas m^{-2} (15 cm entre hileras y 15 cm entre plantas, dejando un espacio entre pasillos de 0.5 m entre cada seis hileras de plantas). En este periodo el manejo del cultivo se realizó de manera convencional, es decir, llevando a cabo la eliminación semanal de ramas laterales o tallos secundarios (“chupones”) sobre el tallo principal, de tal manera que sólo se desarrollara un tallo por planta. En cada planta trasplantada se insertó en su respectiva bolsa un alambión metálico de 1.2 m de largo para facilitar el tutorado de las plantas con anillos plásticos (Figura 7).



Fotografías: Gabriel Silva Acosta, 2021.

Figura 7. Tutorado de plantas en jitomate en el experimento. **a)** actividad de colocación de tutores (alambrón metálico de 1.2 m) en las plantas de jitomate durante a la etapa dos. **b)** Muestra de plantas de jitomate en producción con su respectivo tutor.

Entre los 70 a 75 dds se realizó una poda de hojas, eliminando las primeras hojas formadas (hojas más viejas) en todas las plantas del experimento,

dejando una sola hoja debajo del primer racimo de flores formado en cada planta. Esta acción se realizó con el objetivo de favorecer la aireación del cultivo y reducir el sombreamiento entre plantas.

Posterior a la poda de hojas, entre los 80 y 85 dds, se realizó el despunte del ápice en cada planta, después de la formación del tercer racimo de flores dejando una hoja por encima de éste (Figura 8). Asimismo, se hizo la eliminación de brotes laterales en todos los materiales híbridos. El despunte se realizó con tijeras previamente desinfectadas con sales cuaternarias de amonio (Anibac® Plus al 45%).



Fotografía: Gabriel Silva Acosta, 2021.

Figura 8. Planta de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con despunte del ápice después de la formación del tercer racimo de flores, dejando una hoja por encima de este. Se aprecia el tutor (alambrón metálico) y los anillos plásticos de sujeción.

Durante la fase dos, se realizaron aplicaciones preventivas de insecticidas (Garlix® ORG, Deltametrina o Abamectina) y fungicidas (Sulfato de cobre pentahidratado o azoxistrobin).

- **Fase tres:** En esta fase, que ocurrió de los 90 a los 145 dds, las plantas crecieron a una densidad poblacional de 8 planta m⁻²; hileras separadas entre sí a 33 cm y 25 cm entre plantas, dejando pasillos de 0.5 m (Figura 9).

Las actividades de manejo agronómico en esta fase consistieron, principalmente, en continuar con la eliminación semanal de brotes laterales sobre el tallo principal, que crecían en las plantas de todos los tratamientos. También, en realizar aplicaciones preventivas de insecticidas y fungicidas.

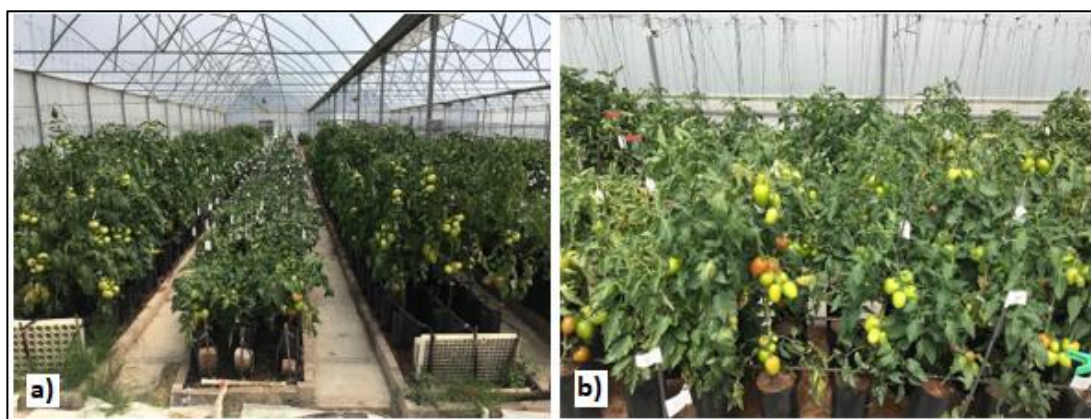


Figura 9. Desarrollo del cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) durante la fase tres. **a)** Imagen panorámica del experimento. **b)** Plantas en producción con frutos aptos para la primera cosecha (híbrido Paipai F1.). Fotografías: Gabriel Silva Acosta, 2021.

Para favorecer la polinización de las flores en las plantas, además del uso de los extractores de aire del invernadero, se utilizó una sopladora de motor de dos tiempos (STIHL 2-MIX), con la cual se transmitían corrientes de viento para hacer vibrar ligeramente a las flores y beneficiar la liberación del polen. Esta actividad se realizó durante el periodo de floración, es decir, durante la fase dos y al inicio de la fase tres.

En la fase tres se realizaron seis cortes o “pases” de cosecha durante el ciclo del cultivo. El primer corte se dio a los 110 dds y los posteriores cada semana; a medida que iban madurando los frutos en las plantas de los ocho híbridos de jitomate evaluados.

3.6 Tratamientos, diseño experimental, variables consideradas y análisis de datos

Cada uno de los ocho cultivares de jitomate utilizados en el experimento constituyó un tratamiento (Cuadro 5), utilizándose un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones.

Durante la primera fase de cultivo la unidad experimental correspondió a una charola de germinación, teniendo en cuenta solamente las plántulas centrales, es decir aquéllas que se encontraran en competencia completa (36 plántulas charola⁻¹). Esto para cada repetición en los distintos tratamientos. En la segunda fase se consideraron 24 plantas como unidad experimental por cada uno de ocho tratamientos en los cuatro bloques, y en la fase tres; 12 plantas en cada repetición de los ocho tratamientos.

Las variables que se consideraron durante la investigación fueron las siguientes:

1. Altura de planta (cm), desde la base del tallo, hasta el ápice de la planta, a los 45, 75 y 90 días después de la siembra (dds).
2. Ancho de planta (cm) a los 45, 75 y 90 dds. Medida en la parte más ancha de la planta sin extender las hojas.
3. Grosor de tallo (mm) a los 45, 75 y 90 dds. Medida con un vernier electrónico (modelo 14388, Truper®, China) en la parte media entre el cuarto y quinto nudo formado.

4. Área foliar por planta a los 45, 75 y 90 dds. Para ello se hizo un muestreo de dos plantas por tratamiento en cada repetición y se midió directamente en un integrador de área foliar (LI 3100C, Li-Cor®, EUA).
5. Índice de área foliar (IAF) (variable adimensional) por tratamiento, a los, 45, 75 y 90 dds. Para esta variable se multiplico el área foliar obtenida en cada tratamiento a los, 45, 75 y 90 dds, por la densidad poblacional manejada en la fase dos del experimento (30 planta m⁻²).
6. Peso seco por órganos (hojas, tallo, raíz) y total a los 45, 75 y 90 dds mediante secado en estufa de aire forzado (FE-291, Felisa®, México) a 65 °C durante 72 h, de las mismas dos plantas por tratamiento en cada repetición que se muestrearon para obtener área foliar. Para el pesaje se utilizó una balanza electrónica marca Ohaus®, EUA.
7. Número de flores por racimo.
8. Número de frutos cosechados por planta.
9. Peso medio de frutos (g).
10. Rendimiento por planta (g).
11. Porcentaje de aborto de frutos (%), obtenido de la diferencia entre el número total de flores por planta y el número de frutos comerciales (>50 g) por planta. Para esta variable los porcentajes obtenidos se transformaron con la función arcoseno ($Y = \arcsin \sqrt{x}$); donde “x” es el porcentaje a transformar y “Y” es el valor transformado (Zar, 1996).

A los datos obtenidos, previa verificación de los criterios de normalidad, se les aplicó análisis de varianza y se hicieron comparaciones de medias mediante la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). En algunos casos se aplicaron técnicas de comparación con contrastes ortogonales. Para estos análisis se utilizó el software estadístico SAS (*Statistical Analysis System*, NC, USA) versión 9.0 (2002).

4. RESULTADOS

4.1 Variables de crecimiento durante la etapa intermedia de cultivo (45 a 90 días después de la siembra)

4.1.1 Caracteres morfológicos

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza (Cuadro 6), a los 45 días después de la siembra (dds) se encontraron diferencias estadísticas altamente significativas entre tratamientos para las variables altura y ancho de planta, no así para las variables grosor del tallo, área foliar e índice de área foliar.

Cuadro 6. Cuadrados medios del análisis de varianza para caracteres morfológicos en ocho híbridos de tomate a los 45 días después de la siembra.

FV	GL	Grosor del tallo	Altura de planta	Ancho de planta	Área Foliar	Índice de área foliar
Tratamientos	7	0.08 NS	4.9**	5.1**	108 NS	0.06 NS
Bloques	3	0.36	0.2	4.4	29	0.02
Error	20	0.07	1.0	0.7	68	0.03
Total	30					
CV (%)		10	8	6	17	17
Media		2.6 mm	12 cm	13 cm	48 cm ²	1.1

FV: Fuente de variación. GL: grados de libertad. NS: No significativo a 0.05 de probabilidad. **: Diferencias altamente significativas entre tratamientos ($P \leq 0.01$). CV: Coeficiente de variación

En la prueba de comparaciones de medias (Cuadro 7), se observa que el híbrido Caronte F1, ya a los 45 dds, presentó mayor altura de planta, alcanzando a diferir estadísticamente de los cuatro cultivares de tipo determinado (Álvaro, Buena Vista, Bullseye F1 y Jovero) e incluso de Paipai F1 que es indeterminado; mientras que, los demás materiales (Cedral y Villa) tuvieron alturas de planta estadísticamente iguales a Caronte F1.

Por otro lado, Villa fue el híbrido que presentó el mayor ancho de planta a los 45 dds, difiriendo significativamente de los demás híbridos, excepto de Buena Vista.

Cuadro 7. Comparaciones de medias para caracteres morfológicos en diferentes híbridos de tomate a los 45 días después de la siembra.

Tratamiento	Híbrido	Grosor del tallo (mm)	Altura de planta (cm)	Ancho de planta (cm)	Área Foliar (cm ²)	Índice de área foliar
1	Álvaro	2.8 a ^z	11 b	13 bc	55 a	1.3 a
2	Buena Vista	2.6 a	11 b	14 abc	52 a	1.2 a
3	Bullseye F1	2.6 a	11 b	13 bc	48 a	1.1 a
4	Caronte F1	2.6 a	14 a	13 bc	49 a	1.1 a
5	Cedral	2.8 a	12 ab	14 abc	54 a	1.1 a
6	Jovero	2.7 a	11 b	12 c	41 a	0.9 a
7	Paipai F1	2.7 a	11 b	12 bc	42 a	1.0 a
8	Villa	2.4 a	13 ab	16 a	44 a	1.0 a
DMSH		0.6	2	2	20	0.4

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

El análisis de varianza (Cuadro 8) evidenció presencia de diferencias significativas entre variedades para los diferentes caracteres morfológicos estudiados a la mitad de la fase intermedia (75 dds) (grosor del tallo, altura de planta, ancho de planta y área foliar).

Cuadro 8. Cuadrados medios del análisis de varianza para caracteres morfológicos en ocho híbridos de tomate a los 75 días después de la siembra.

FV	GL	Grosor del tallo	Altura de planta	Ancho de planta	Área foliar	Índice de área foliar
Tratamientos	7	4.5**	838**	172**	68529**	0.60**
Bloques	3	0.6	45	12	2786	0.03
Error	20	0.4	19	19	5522	0.05
Total	30					
CV (%)		9	10	10	15	16
Media		7.4 mm	43 cm	44 cm	482 cm ²	1.4

FV: Fuente de variación. GL: grados de libertad. NS: No significativo a 0.05 de probabilidad. **: Diferencias altamente significativas entre tratamientos ($P \leq 0.01$). CV: Coeficiente de variación.

En la prueba de comparaciones de medias mediante Tukey ($P \leq 0.05$) (Cuadro 9), a los 75 días después de la siembra, sobresalen los siguientes resultados:

- a)** En cuanto al grosor del tallo, los híbridos Caronte F1, Cedral y Paipai F1 fueron los de mayor valor entre los ocho materiales, siendo estadísticamente iguales entre sí y superiores a los demás, con excepción de Villa, con grosores de tallo entre 7.4 y 8.7 mm.
- b)** Los híbridos Caronte F1, Cedral y Paipai F1, fueron los que tuvieron las plantas de mayor altura, con valores estadísticamente iguales entre sí (altura entre 55.5 y 66.3 cm), mientras que, los materiales Álvaro, Buena Vista, Bullseye F1, y Jovero (todos ellos de hábito determinado), presentaron menor altura de planta, con valores menores a 34 cm, siendo también estadísticamente iguales entre sí.
- c)** En cuanto al ancho de planta, se encontró que los híbridos Paipai F1, Caronte F1 y Villa, fueron los de mayor anchura, difiriendo significativamente de Álvaro, Buena Vista y Jovero.
- d)** Paipai F1 y Caronte F1, fueron los tratamientos que presentaron significativamente mayor área foliar por planta y, por lo tanto, mayor IAF difiriendo estadísticamente de casi todos los demás híbridos.

Cuadro 9. Comparaciones de medias para caracteres morfológicos en diferentes híbridos de tomate a los 75 días después de la siembra.

Tratamiento	Híbrido	Grosor del tallo (mm)	Altura de planta (cm)	Ancho De planta (cm)	Área Foliar (cm ²)	Índice de área foliar
1	Álvaro	6.4 b ^z	30 c	38 bc	328 c	1.0 c
2	Buena Vista	6.7 b	28 c	36 c	407 c	1.2 c
3	Bullseye F1	6.1 b	32 c	41 abc	417 c	1.2 c
4	Caronte F1	8.7 a	66 a	51 a	651 ab	1.9 ab
5	Cedral	8.5 a	56 ab	48 ab	476 bc	1.4 bc
6	Jovero	6.2 b	33 c	36 c	353 c	1.0 c
7	Paipai F1	8.5 a	52 b	52 a	695 a	2.0 a
8	Villa	7.4 ab	48 b	50 a	494 bc	1.4 bc
DMSH		1.6	11	11	181	0.5

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta. ^z: Valores con letra diferente dentro de columnas, son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

El resultado del análisis de varianza para caracteres morfológicos medidos al final de la etapa intermedia (90 dds) destaca diferencias altamente significativas entre híbridos para grosor del tallo, altura de planta, ancho de planta y área foliar (Cuadro 10).

Cuadro 10. Cuadrados medios del análisis de varianza para caracteres morfológicos en ocho híbridos de tomate a los 90 días después de la siembra.

FV	GL	Grosor del tallo	Altura de planta	Ancho de planta	Área Foliar	Índice de área foliar
Tratamientos	7	8.0**	4220**	206**	1021909**	9.1**
Bloques	3	1.8	106	33	86789	1.4
Error	20	0.5	81	32	63798	0.6
Total	30					
CV (%)		7	13	10	18	18
Media		9.0 mm	66 cm	53 cm	1402 cm ²	4.2

FV: Fuente de variación. GL: Grados de libertad. **: Diferencias altamente significativas entre tratamientos ($P \leq 0.01$). CV: Coeficiente de variación.

Por otra parte, en la prueba de comparación de medias para esa misma edad (Cuadro 11) se destaca lo siguiente:

- a) Para las variables grosor del tallo y altura de planta, los cultivares Caronte F1 y Cedral, fueron los que presentaron mayor grosor y altura promedio, teniendo efectos estadísticamente iguales entre sí, mientras que, los materiales de tomate de hábito determinado (Álvaro, Buena Vista, Bullseye F1 y Jovero), fueron los de menor grosor de tallo y menor altura de planta. Es de destacar la enorme diferencia en altura de los cultivares indeterminados Cedral y Caronte, que a los 90 dds ya habían alcanzado más de 1 m de altura, respecto a los cultivares determinados Álvaro y Villa que apenas tenían 33 a 35 cm a esa misma edad.
- b) Cedral, Villa y Caronte (indeterminados) fueron los que presentaron un mayor ancho de planta y área foliar por planta, mientras que Buena Vista, Jovero y Álvaro (determinados) presentaron los menores valores. Llama la atención que el área foliar por planta sea tan reducida en esos cultivares determinados (incluso más del 50 % respecto a los híbridos indeterminados).

Cuadro 11. Comparaciones de medias para las variables de crecimiento en diferentes híbridos de tomate a los 90 días después de la siembra.

Tratamiento	Híbrido	Grosor del tallo (mm)	Altura de planta (cm)	Ancho de planta (cm)	Área Foliar (cm ²)	Índice de área foliar
1	Álvaro	6.9 d ^z	36 c	46 bc	753 d	2.2 d
2	Buena Vista	8.5 cd	32 c	44 c	978 cd	2.9 cd
3	Bullseye F1	8.1 cd	43 c	51 abc	1001 cd	3.0 cd
4	Caronte F1	10.5 ab	118 a	58 ab	2118 a	6.3 a
5	Cedral	11.5 a	104 a	62 a	1855 ab	5.5 ab
6	Jovero	8.5 cd	41 c	44 c	1073 cd	3.2 cd
7	Paipai F1	9.4 bc	71 b	56 abc	1470 bc	4.4 bc
8	Villa	8.8 bc	77 b	59 ab	1885 ab	5.6 ab
DMSH		1.6	22	13	615	1.8

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta. ^z: Valores con letra diferente dentro de columnas, son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

En las siguientes gráficas (Figura 10) se muestran las tendencias de crecimiento en grosor de tallo, altura de planta, ancho de planta y área foliar por planta de cada variedad a lo largo de toda la etapa intermedia (de los 45 a los 90 dds), así como el índice de área foliar a los 75 y 90 dds en cada cultivar.

Se observa que a partir de los 75 a los 90 días después de la siembra, las diferencia en el crecimiento entre los ocho híbridos se hacen más marcadas, siendo los materiales de crecimiento indeterminado y de fruto tipo bola (Caronte F1 y Cedral), los que mayor desarrollo presentaron para las cinco variables registradas (Figura 10).

Por otra parte, los híbridos de hábito de crecimiento determinado (Álvaro, Buena Vista, Bullseye F1 y Jovero) presentaron crecimientos similares, siendo los materiales de menor altura de planta, grosor del tallo, ancho de planta, área foliar e índice de área foliar, de los 75 a 90 días después de la siembra. Paipai F1 y Villa, de manera general, presentaron un ritmo de crecimiento intermedio (Figura 10).

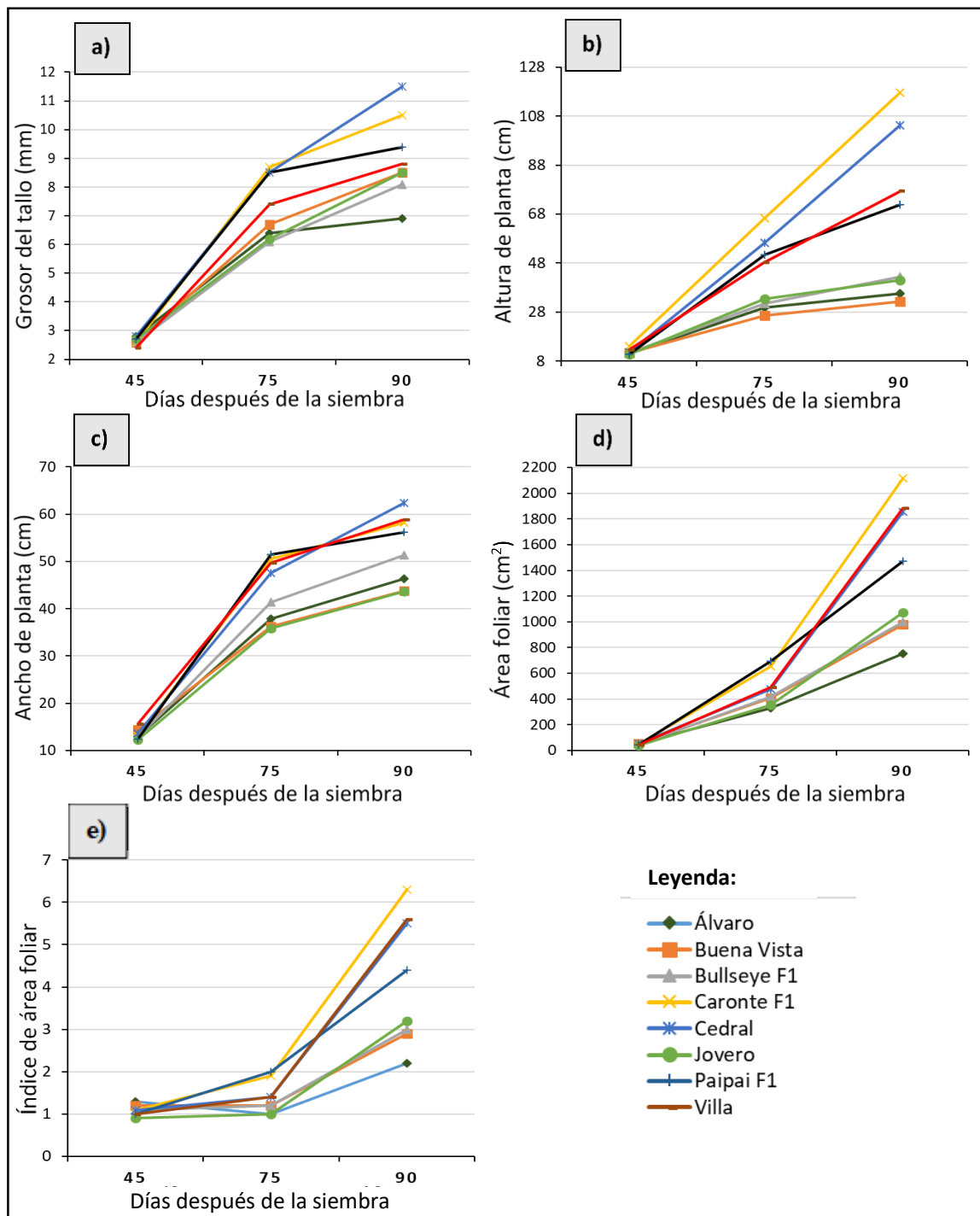


Figura 10. Caracteres morfológicos (grosor del tallo (a), altura (b) y ancho (c) de planta, área foliar (d) e índice de área foliar de planta en ocho híbridos de jitomate, a los 45, 75 y 90 días después de la siembra).

4.1.2 Variables de peso seco por órganos y total

Al analizar los datos de las variables de peso seco de las plantas (hojas, tallo, raíz y total) al inicio de la fase intermedia (45 dds) sólo se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en el análisis de varianza para el peso seco de hojas, (Cuadro 11).

Cuadro 11. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de peso seco de las plantas (hojas, tallo, raíz, y total) en ocho híbridos de tomate a los 45 días después de la siembra.

FV	GL	Hojas	Tallo	Raíz	Total
Tratamientos	7	0.0181*	0.0014 NS	0.00090 NS	0.0367 NS
Bloques	3	0.0003	0.0002	0.00003	0.0008
Error	20	0.0039	0.0005	0.00024	0.0096
Total	30				
CV (%)		14	17	15	14
Media (g)		0.43	0.12	0.10	0.67

FV: Fuente de variación. GL: grados de libertad. NS: No significativo a 0.05 de probabilidad
 *Diferencias significativas entre tratamientos ($P \leq 0.05$). CV: Coeficiente de variación.

En la prueba de comparación de medias mediante Tukey ($P \leq 0,05$) se evidenciaron diferencias estadísticas entre los híbridos Álvaro, Caronte F1 y Jovero, para la variable peso seco de hojas, siendo Álvaro el material que más acumuló biomasa entre estos tres materiales. (Cuadro 12).

Cuadro 12. Comparaciones de medias para las variables de peso seco de plantas (hojas, tallo, raíz, y total) en diferentes híbridos de tomate a los 45 días después de la siembra.

Tratamiento	Híbrido	Hojas (g)	Tallo (g)	Raíz (g)	Total (g)
1	Álvaro	0.54 a ^z	0.14 a	0.13 a	0.82 a
2	Buena Vista	0.47 ab	0.14 a	0.11 a	0.72 a
3	Bullseye F1	0.45 ab	0.13 a	0.10 a	0.69 a
4	Caronte F1	0.35 b	0.13 a	0.09 a	0.59 a
5	Cedral	0.49 ab	0.14 a	0.12 a	0.76 a
6	Jovero	0.35 b	0.10 a	0.08 a	0.54 a
7	Paipai F1	0.39 ab	0.09 a	0.09 a	0.58 a
8	Villa	0.40 ab	0.12 a	0.10 a	0.63 a
DMSH		0.18	0.06	0.04	0.29

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

A los 75 días después de la siembra el análisis de varianza (Cuadro 13) destacó diferencias altamente significativas entre el efecto de tratamientos sobre el peso seco de tallo, mientras que, para las variables peso seco de raíz y peso seco total, las diferencias encontradas fueron significativas. En el peso seco de hojas no hubo diferencias estadísticas entre los ocho híbridos evaluados.

Cuadro 13. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de peso seco de las plantas (hojas, tallo, raíz, y total) en ocho híbridos de tomate a los 75 días después de la siembra.

FV	GL	Hojas	Tallo	Raíz	Total
Tratamientos	7	1.01 NS	2.12**	0.18*	7.06*
Bloques	3	0.34	0.13	0.03	1.36
Error	20	0.50	0.14	0.04	1.71
Total	30				
CV (%)		19	20	19	19
Media (g)		3.7	1.8	1.1	6.9

FV: Fuente de variación. GL: grados de libertad. NS: No significativo a 5 % de probabilidad. **: Diferencias altamente significativas entre tratamientos ($P \leq 0.01$). *: Diferencias significativas entre tratamientos ($P \leq 0.05$). CV: Coeficiente de variación.

En la prueba de comparación de medias (Tukey, $P \leq 0.05$) se encontró que Caronte F1, fue el híbrido con mayor peso seco del tallo difiriendo de los demás cultivares excepto de Cedral. Para el peso seco de raíz, hubo similitudes estadísticas entre los híbridos Buena Vista, Bullseye F1, Caronte F1, Cedral, Paipai F1 y Villa. Los cultivares indeterminados de tipo bola Caronte y Cedral fueron los que acumularon más peso seco total por planta hasta esa edad alcanzando a diferir de Jovero y Álvaro. Para peso seco de hojas, no hubo diferencias entre los ocho híbridos de jitomate (Cuadro 14).

Cuadro 14. Comparaciones de medias para las variables de peso seco de las plantas (hojas, tallo, raíz, y total) en diferentes híbridos de tomate a los 75 días después de la siembra.

Tratamiento	Híbrido	Hojas (g)	Tallo (g)	Raíz (g)	Total (g)
1	Álvaro	2.9 a ^z	1.1 c	0.8 b	5.2 b
2	Buena Vista	3.6 a	1.1 c	0.9 ab	5.7 ab
3	Bullseye F1	4.0 a	1.3 c	1.1 ab	6.9 ab
4	Caronte F1	4.1 a	3.1 a	1.4 a	8.8 a
5	Cedral	3.4 a	2.5 ab	1.1 ab	7.3 ab
6	Jovero	3.0 a	1.4 c	0.8 b	5.3 b
7	Paipai F1	4.4 a	1.9 bc	1.3 a	8.6 a
8	Villa	3.6 a	2.0 bc	1.1 ab	7.0 ab
DMSH		1.7	0.9	0.5	3.1

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

Al final de la etapa de cultivo intermedia (90 dds), los resultados del análisis de varianza (Cuadro 15) muestran diferencias estadísticas altamente significativas entre tratamientos para todas las variables de peso seco consideradas.

Cuadro 15. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de peso seco de las plantas (hojas, tallo, raíz, y total) en ocho híbridos de tomate a los 90 días después de la siembra.

FV	GL	Hojas	Tallo	Raíz	Total
Tratamientos	7	48.5**	35.5**	6.7**	261.8**
Bloques	3	23.3	4.6	3.7	145.3
Error	20	4.0	1.1	0.4	15.6
Total	30				
CV (%)		20	21	18	18
Media (g)		9.6	4.7	3.4	21.2

FV: Fuente de variación. GL: grados de libertad. **: Diferencias altamente significativas tratamientos ($P \leq 0.01$). CV: Coeficiente de variación.

La prueba de comparación medias mediante Tukey ($P \leq 0.05$) a los 90 dds (Cuadro 16), destaca que Caronte F1, Villa y Cedral fueron los híbridos que estadísticamente presentaron mayor peso seco de hojas, de raíz y peso seco total por planta. También Caronte F1 y Cedral tuvieron el mayor peso seco de tallo.

Cuadro 16. Comparaciones de medias de peso seco de las plantas (hojas, tallo, raíz, y total) en diferentes híbridos de tomate a los 90 días después de la siembra.

Tratamiento	Híbrido	Hojas (g)	Tallo (g)	Raíz (g)	Total (g)
1	Álvaro	5.4 c ^z	1.8 c	1.8 b	11.7 b
2	Buena Vista	8.2 bc	2.6 c	2.2 b	14.1 b
3	Bullseye F1	6.9 c	2.3 c	2.8 b	17.6 b
4	Caronte F1	14.1 a	9.9 a	4.8 a	30.2 a
5	Cedral	13.1 ab	8.3 a	5.0 a	31.2 a
6	Jovero	6.7 c	3.0 cb	2.1 b	13.1 b
7	Paipai F1	8.1 c	3.8 cb	3.1 b	19.8 b
8	Villa	13.8 a	5.5 b	4.8 a	30.0 a
DMSH		4.8	2.5	1.5	9.6

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

Las gráficas para las variables de peso seco de los diferentes órganos de la planta, (hojas, tallo y raíz), así como el peso seco total (Figura 11) en los ocho

híbridos de jitomate evaluados, muestran, de manera general, que para la primera parte de la etapa intermedia del cultivo, es decir, entre los 45 y 75 dds, no se detectaron diferencias agronómicas destacables para estas variables; es decir, los ocho híbridos presentaron una tasa de acumulación de materia seca similar. Sin embargo, entre los 75 y los 90 dds los materiales de hábito indeterminado (Caronte F1, Cedral, Paipai F1 y Villa) fueron los que más materia seca total acumularon, o sea, presentan mayor peso seco en sus hojas, tallos y raíces. Asimismo, entre los híbridos de hábito determinado, se destacan Álvaro y Jovero como los de menor acumulación de materia seca total, siendo, por lo tanto, los tratamientos con menor producción de biomasa a los 90 días después de la siembra.

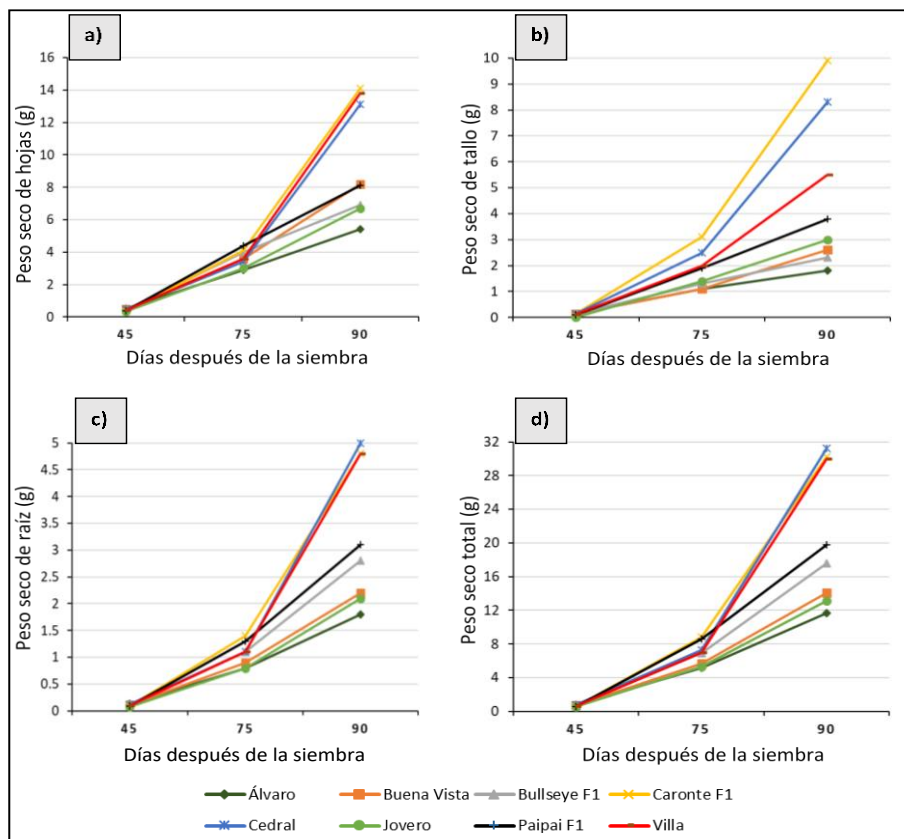


Figura 11. Comportamiento de las variables de peso seco en ocho híbridos de jitomate, a los 45, 75 y 90 días después de la siembra. a) peso seco de hojas. b) peso seco del tallo. c) peso seco de raíz. d) peso seco total.

4.2. Variables de rendimiento y sus componentes

Al analizar las variables asociadas con el rendimiento y sus componentes primarios, los resultados del ANOVA evidenciaron diferencias altamente significativas entre tratamientos para todas ellas (Cuadro 17).

Cuadro 17. Cuadrados medios del análisis de varianza para las variables de rendimiento y sus componentes en ocho híbridos de jitomate.

FV	GL	Número de Flores	Porcentaje de aborto	Número de frutos comerciales	Peso medio de frutos	Rendimiento Comercial
Tratamientos	7	38.2**	0.149**	38.8**	2560**	1.327**
Bloques	3	0.9	0.002	0.4	90	0.001
Error	20	1.1	0.003	0.5	30	0.011
Total	30					
CV (%)		6	9	7	4	7
Media		18	37 %	11	129 (g)	1.4 (kg)

FV: Fuente de variación. GL: grados de libertad. **: Diferencias altamente significativas entre tratamientos ($P \leq 0.001$). CV: Coeficiente de variación.

Al efectuar la prueba de separación de medias (Tukey; $P \leq 0.05$) se destaca lo siguiente (Cuadro 18):

- a) Los híbridos Buena Vista y Cedral fueron los que presentaron mayor cantidad de flores por planta (>20 unidades) siendo estadísticamente iguales entre sí y diferente a los demás; sin embargo, el cultivar Buena Vista (con hábito de crecimiento determinado y frutos tipo saladette) presentó el mayor aborto de frutos y tuvo la menor cantidad de frutos comerciales por planta, lo que conllevó a que tuviera el rendimiento comercial más bajo (<0.6 kg) entre los ocho cultivares evaluados; mientras el cultivar Cedral (hábito de crecimiento indeterminado y frutos tipo bola) tuvo un bajo porcentaje de aborto de frutos, siendo el tratamiento con mayor cantidad de frutos comerciales por planta, el de mayor peso medio

de frutos y por ende el que obtuvo el mayor rendimiento comercial por planta.

- b) En general los cuatro cultivares de hábito determinado fueron los que presentaron estadísticamente el menor número de frutos por planta, como resultado de muy altos porcentajes de aborto en comparación con los cultivares indeterminados.
- c) Los cultivares Paipai F1 y Villa (ambos con hábito de crecimiento indeterminado y frutos tipo saladette), tuvieron un comportamiento similar al de Cedral y Caronte F1 (los dos con hábito de crecimiento indeterminado y frutos tipo bola) sobre la variable número de frutos comerciales; no obstante, al tener un peso medio de frutos menor (frutos entre 112 y 115 g) su rendimiento comercial por planta fue hasta un 35% menor respecto a esos dos materiales. Sin embargo, dentro de los cultivares con frutos tipo saladette evaluados fueron los de mayor rendimiento, con medias entre 1.5 y 1.6 kg de frutos por planta (Figura 12).

Cuadro 18. Comparaciones de medias para las variables de rendimiento y sus componentes en ocho híbridos de jitomate.

Híbrido	Número de flores (unidad)	Porcentaje de aborto (%)	Número de frutos comerciales (unidad)	Peso medio de frutos (g)	Rendimiento comercial por planta (kg)
Álvaro	16 bc ^z	49 b	8 bc	115 cd	0.9 d
Buena Vista	23 a	74 a	6 c	94 e	0.6 e
Bullseye F1	15 c	37 bcd	9 b	127 bc	1.2 d
Caronte F1	17 cb	28 def	12 a	161 a	2.0 b
Cedral	21 a	33 cde	14 a	168 a	2.3 a
Jovero	15 c	45 bc	8 bc	140 b	1.1 d
Paipai F1	16 bc	16 f	14 a	112 d	1.5 c
Villa	18 b	23 ef	14 a	115 cd	1.6 c
DMSH	2	13	2	13	0.2

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta. ^z: Valores con letra diferente dentro de columnas, son estadísticamente diferentes de acuerdo con la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

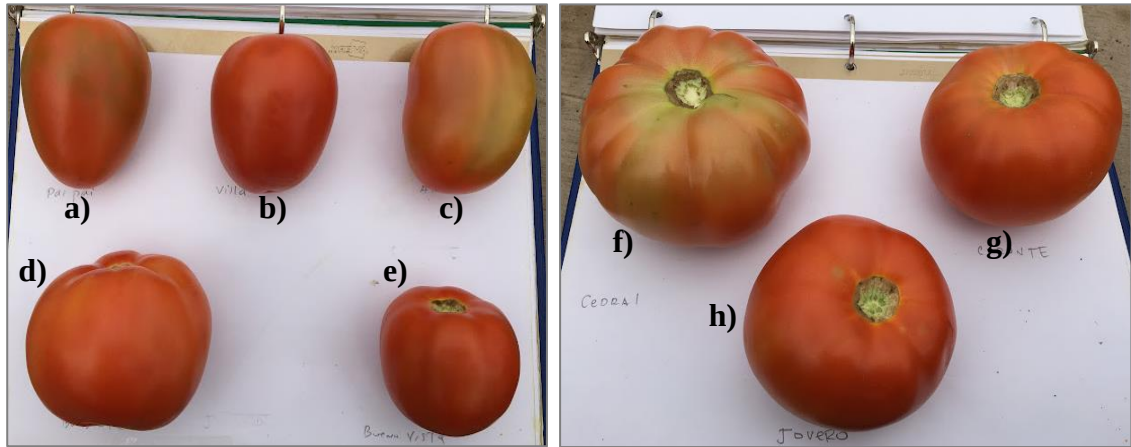


Figura 12. Frutos representativos de los diferentes cultivares híbridos de jitomate evaluados. Frutos tipo saladette; a) Paipai F1, b) Villa, c) Álvaro, d) Bullseye F1 y e) Buena Vista. Frutos tipo bola; f) Cedral, g) Caronte y h) Jovero. Fotografías: Gabriel Silva Acosta, 2021.

4.3 Discusión general

En la implementación del sistema de producción de jitomate a tres racimos por planta en alta densidad, se ha trabajado en acortar el tiempo de trasplante a fin de cosecha a menos de 120 días para lograr tres ciclos de cultivo por año y con ello una alta productividad anual (400 a 500 t ha⁻¹ año⁻¹) usando invernaderos de tecnología intermedia (Sánchez *et al.*, 2012). Para lograrlo se ha retrasado el trasplante hasta al menos 45 días después de la siembra y se han despuntado las plantas por encima de la tercera inflorescencia formada. Recientemente (Sánchez *et al.*: 2021; Moreno *et al.*, 2021) se ha demostrado que, despuntando igual, por arriba de la tercera inflorescencia, es posible obtener hasta cuatro ciclos de cultivo por año usando tecnologías que permitan retrasar el trasplante hasta los 55 a 60 dds, tales como disminuir la densidad de plántulas en el semillero y usar charolas con cavidades que cuenten con un mayor volumen de sustrato por plántula (Leskovar *et al.*, 1991; Contreras, 2007, Moreno *et al.*, 2021).

El sistema de cultivo sobre el cual se está trabajando ahora con proyectos de investigación como el que aquí se presenta, busca incrementar el rendimiento anual mediante el acortamiento de la fase final a 50 días para lograr siete ciclos de producción por año manejando las plantas a tres racimos. Esto se logra introduciendo una etapa o fase de cultivo intermedia que inicia con el trasplante de las plántulas de 45 días de edad a contenedores (bolsas o macetas) de 6 a 8 litros de capacidad rellenos con sustrato hidropónico y ubicados en un espacio adicional de invernadero a una densidad de 30 plantas m^{-2} por un tiempo de 45 días ocupando la cuarta parte de la superficie de la que dispondrán en el invernadero definitivo. Finalmente serán reubicadas en ese invernadero definitivo a una densidad de 8 plantas m^{-2} por 50 días más (etapa final). Así, con un manejo sincronizado de las tres etapas de cultivo (semillero, intermedia y final) se busca lograr los siete ciclos por año en el invernadero definitivo.

El problema técnico más importante que se presenta para el éxito de este sistema es la necesidad de imponer una alta densidad de población durante los 45 días que dura la fase intermedia ya que esto puede conllevar, sobre todo los últimos días de esta fase a índices de área foliar altos, propiciando una menor y más desuniforme intercepción de radiación fotosintéticamente activa por el follaje de cada planta (Gardner *et al.*, 1990; Momokawa *et al.*, 2011; Tewolde *et al.*, 2018) así como la expresión de síntomas del llamado “Síndrome de adaptación a la sombra” (*Shade avoidance syndrome*) que se manifiesta como plantas con entrenudos elongados, exacerbación de la dominancia apical, tallos más delgados y menos producción de materia seca por día, lo que al final del ciclo se traduce en menor rendimiento por planta y por unidad de superficie (Wien, 1999; Taiz y Zeiger 2002; Hopkins y Hüner, 2009; Higuchi *et al.*, 2012; Kosai, 2016).

La implementación y optimización de este sistema de producción se contempla como un proyecto a largo plazo que implica una serie de investigaciones

secuenciadas que ayuden a resolver problemas técnicos como el señalado. La investigación llevada a cabo y presentada en el presente documento es una de las primeras emprendidas sobre este sistema de producción y tiene por objetivo el encontrar los cultivares que por sus características de expresión genética y morfológica soporten mejor las condiciones microambientales propiciadas por una alta densidad de población en la etapa intermedia de cultivo, de tal manera que este estrés no repercuta negativamente en el rendimiento de cada ciclo de producción.

Para mitigar los efectos de la alta densidad se incluyó como parte del protocolo de producción, la aplicación en el semillero de un retardador del crecimiento (Paclobutrazol), buscando reducir la altura de las plantas y el área foliar formada (para disminuir el IAF resultante) durante la etapa intermedia tal y como lo realizaron Moreno *et al.*, (2021) con el Híbrido El Cid F1 y Pérez (2021) con el híbrido Paipai F1, para reducir el crecimiento de las plantas. También se incluyó la práctica la poda de tres a cuatro de las hojas inferiores que son las que menos contribuyen a la fotosíntesis.

Bajo esas condiciones de manejo, aun con las diferencias atribuibles a los genotipos probados, las plántulas al momento del trasplante (45 dds) apenas habían alcanzado entre 10 y 14 cm de altura y un área foliar entre 40 y 55 cm². En un experimento simultáneo al presente y realizado en el mismo invernadero, se manejó el cultivar Buena Vista en semillero sin aplicación de paclobutrazol y a los 45 dds ya habían alcanzado una altura de 27 cm y un área foliar de 122 cm², mientras en el presente experimento los valores de Buena Vista, a la misma edad, apenas eran de 11 cm en altura y 52 cm² en área foliar (Cuadro 7), diferencias que pueden ser atribuibles a las aplicaciones de Paclobutrazol. A los 75 dds, en plena etapa intermedia, las diferencias se mantenían, pues en el experimento simultáneo Buena Vista sin paclobutrazol tenía ya 48 cm en altura y

791 cm² en área foliar por planta, contra sólo 27 cm en altura y 407 cm² en área foliar por planta en el presente experimento donde si se aplicó el paclobutrazol (Cuadro 9). Al final de la etapa intermedia (90 dds), las diferencias se mantenían, ya que el experimento simultáneo reportaba para Buena Vista una altura de 72 cm y un área foliar por planta de 1678 cm², en tanto en el presente experimento los valores eran de sólo 32 cm y 977 cm², respectivamente.

Estos datos indican una persistencia de los efectos del retardador de crecimiento a lo largo del ciclo de cultivo, lo que, junto con la poda de hojas inferiores se reflejó en índices de área foliar relativamente bajos (Cuadro 11) a pesar de la alta densidad de población a la que se vieron sometidas las plantas en la etapa intermedia.

El peso seco a los 90 dds también se observa restringido o limitado (Cuadro 16). Parece ser que además del Paclobutrazol influyó la presencia de temperaturas relativamente bajas en la raíz durante la etapa de semillero.

Las diferencias en crecimiento entre cultivares determinados e indeterminados fueron notables, por ejemplo, de los 45 a los 75 dds, los cultivares indeterminados crecieron en altura a un ritmo de 1.6 cm por día, en grosor del tallo 0.2 mm día⁻¹, en ancho de planta 1.25 cm por día; mientras en los determinados los valores eran aproximadamente 50 % menores. En área foliar Caronte y Paipai F1 (cultivares indeterminados) destacan por crecer a un ritmo de 60 cm² por día durante el periodo mencionado mientras que los determinados lo hacían a un ritmo de aproximadamente 30 cm² por día. También en peso seco son los cultivares indeterminados los que muestran las mayores tasas de incremento diario (Figura 10 y Figura 11).

Las diferencias en crecimiento entre los diferentes tratamientos evaluados están posiblemente relacionadas con las características genéticas propias de cada cultivar, donde los híbridos de hábito de crecimiento determinado tienden a crecer más lentamente, con entrenudos más cortos, un mayor sombreamiento entre láminas foliares y por ende una menor densidad e índice estomático por hojas, tendiendo a generar, finalmente, una menor producción de fotoasimilados en comparación con los materiales de hábito de crecimiento indeterminado (Zárate *et al.*, 2021) (Figura 13).

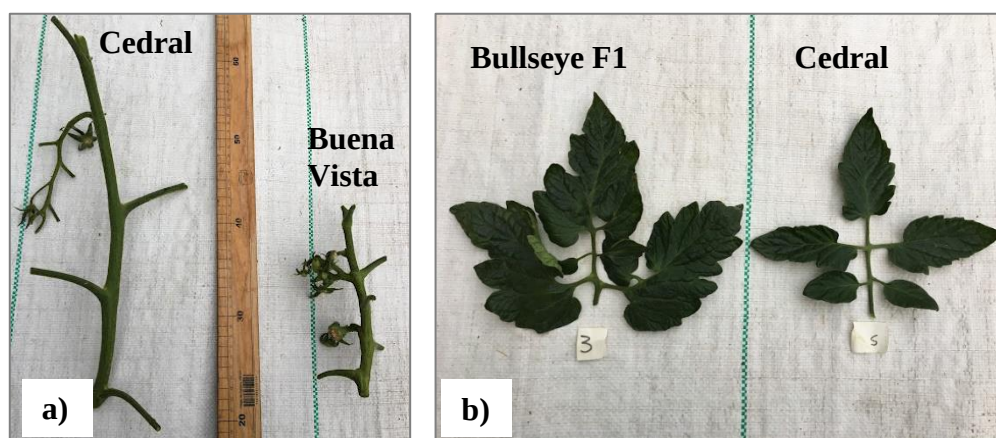


Figura 13. Comparación de caracteres morfológicos entre algunos de los híbridos de jitomate evaluados. **a)** Longitud y espaciamiento de entrenudos, en el tallo de un cultivar hábito de crecimiento indeterminado (Cedral) y otro de crecimiento determinado (Buena Vista). **b)** Muestra de folíolos del ápice de hojas adultas de los híbridos Bullseye F1 (hábito de crecimiento determinado y fruto tipo saladette) y Cedral (hábito de crecimiento indeterminado y fruto tipo bola). Fotografías: Gabriel Silva Acosta, 2021.

En cuanto a la cosecha de frutos, los cultivares indeterminados de tipo bola fueron los que alcanzaron un mayor rendimiento por planta lo que puede ser explicado principalmente porque tuvieron mayor peso medio de fruto, aunque también influyó su alto número de frutos por planta (Cuadro 18).

Dentro de los cultivares de tipo saladette, los cultivares indeterminados (Villa y Paipai F1) rindieron más que los determinados (Álvaro y Buena Vista) debido a que amarraron casi el doble de frutos por planta (Cuadro 18).

Para mostrar que es factible que se puedan obtener siete ciclos de cultivo por año se realizó un segundo ciclo de cultivo en tres fases acoplado con el primero (datos no mostrados) obteniéndose producción en el mismo lugar del invernadero donde se obtuvo el primer ciclo en un periodo de 50 días más; es decir en 100 días en el mismo espacio de invernadero se habían logrado culminar dos ciclos de producción por año, indicando que es posible obtener siete ciclos en un año de producción acoplando sistemáticamente las tres fases de cada ciclo.

En el caso de Caronte F1 y Cedral el rendimiento por ciclo promedio fue de 2 kg por planta (Cuadro 18) y como se manejó a una densidad final de 8 plantas m^{-2} de invernadero, el rendimiento por unidad de superficie fue de 16 kg m^{-2} equivalente a 160 $\text{t ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$, lo que en siete ciclos da un potencial de rendimiento de 1,120 $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ bajo las condiciones ambientales en las que se dio el experimento, que es el doble de lo reportado para producciones en invernaderos holandeses de alta tecnología (Heuvelink *et al.*, 2018).

En el caso de manejar cultivares de tipo saladette la recomendación que surge del experimento es utilizar cultivares indeterminados como Villa que rindieron 1.6 kg por planta, equivalente a 12.8 kg m^{-2} o 128 $\text{t ha}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$, lo que da un potencial, con siete ciclos por año, de 896 $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo cual, también es un rendimiento récord (Figura 14).

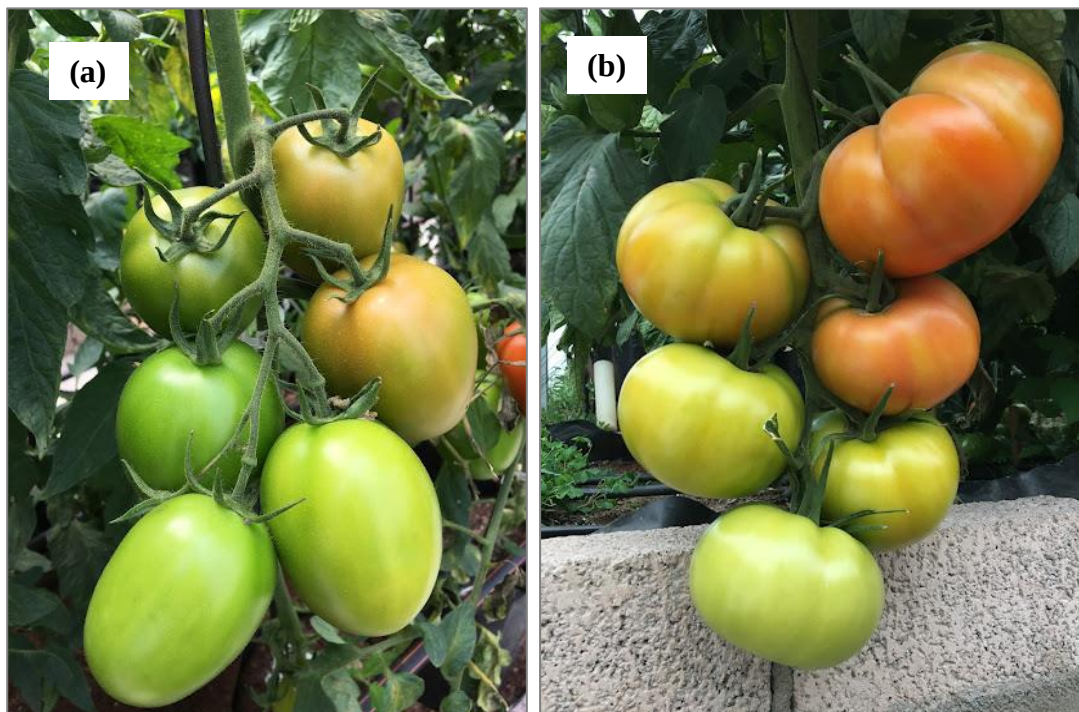


Figura 14. Racimos representativos de los híbridos de jitomate Villa (a) y Cedral (b), frutos tipo saladette y bola, respectivamente.

Aunque de manera informal se hizo un análisis de los posibles costos de producción a escala comercial, cruzándolos con datos de precios de venta del productor. Este sistema de producción se ve económicamente muy redituable, pero queda pendiente hacer una evaluación formal de costo-beneficio para demostrarlo y precisarlo.

En otros trabajos con el sistema de tres racimos por planta se han logrado rendimientos por ciclo aún mayores a los aquí presentados. Por ejemplo, mientras que en el presente experimento el rendimiento para el híbrido Bullseye F1 fue de sólo $1.2 \text{ kg planta}^{-1}$ (9.6 kg m^{-2}), Sánchez *et al.* (2021), reportan un rendimiento de $2.2 \text{ kg por planta}$ para ese mismo cultivar, equivalente a 17.6 kg m^{-2} . Es posible que, en el presente experimento, las limitaciones de espacio para la raíz por crecer en contenedores de 6 litros de capacidad crearon condiciones

de estrés que pudieron afectar negativamente el rendimiento potencial, por lo que se sugiere realizar una investigación encaminada al uso de contenedores con mayor volumen de sustrato para la raíz para contribuir a optimizar este nuevo sistema de producción.

5. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en que se realizó el experimento se puede concluir lo siguiente:

- a) Los índices de área foliar generados por las altas densidades de población a los que temporalmente estuvieron sometidas las plantas durante la etapa intermedia, incluso con los cultivares de hábito indeterminado no fueron tan altos como para afectar de manera importante el rendimiento o alguno de sus componentes en la etapa final del cultivo.
- b) Los cultivares indeterminados crecieron más en altura, grosor del tallo, ancho de planta, área foliar e índice de área foliar y rindieron significativamente más que los determinados.
- c) El rendimiento de los cultivares determinados se vio afectado negativamente por un alto índice de aborto de frutos.
- d) Los cultivares de tipo bola indeterminados, Caronte y Cedral fueron los que más rendimiento produjeron debido a su alto peso de fruto y bajo porcentaje de abortos, por lo que son los que se recomiendan para implementar este sistema de producción de tres fases y siete ciclos de cultivo por año. En el caso de que se quisiera producir sólo tomate saladette, los cultivares recomendados por su mayor rendimiento por planta serían Villa o Paipai F1.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bai, Y., and Lindhout, P. 2007. Domestication and breeding of tomatoes: what have we gained and what can we gain in the future? *Annals of botany*, 100 (5):1085-1094.
- Benítez, S. E. 2019. La estacionalidad del jitomate en Temascaltepec, Estado de México. Universidad Autónoma del Estado de México. México (tesis de licenciatura). 89 p.
- Berova, M., and Zlatev, Z. 2000. Physiological response and yield of paclobutrazol treated tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Plant Growth Regulation*, 30 (2): 117-123.
- Briggs, R. S., Lucas, R. G., and Taylor, Z. T. 2003. Climate classification for building energy codes and standards: Part 1-development process. *ASHRAE Transactions*, 109, 109.
- Cabrera G.J., Perdomo, O., y Mujica, M. 2019. Cultivos protegidos e invernaderos. *Agrotendencia.tv*. Recuperado de <https://agrotendencia.tv/agropedia/cultivos-protegidos/>.
- CEDRSSA. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. 2018. Reporte: la producción y el comercio del tomate en México. *Palacio legislativo de San Lázaro*. México. 15p. Recuperado de <http://www.cedrssa.gob.mx/files/b/13/86Tomate.pdf>.
- Celis, F. 2019. 400,000 empleos están en juego por arancel al jitomate de México. *Forbes México*. Recuperado de: <https://www.forbes.com.mx/400000-empleos-estan-en-juego-por-arancel-al-jitomate-de-mexico/>.
- Cih D. I. R., Jaramillo, V. J. L., Tornero, C. M. A., and Schwentesius R. 2011. Caracterización de los sistemas de producción de tomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) en el estado de Jalisco, México. *Tropical and subtropical agroecosystems*, 14 (2): 501-512.
- Clarín.com. 2019. Plasticultura, en la Argentina hay más de 6.500 hectáreas de cultivos intensivos en invernaderos. Recuperado de https://www.clarin.com/rural/argentina-500-hectareas-cultivos-intensivos-invernaderos_0_U-WlqyXU9.html.
- Contreras, M. E. 2007. Efecto del ambiente de crecimiento de plántulas de Jitomate sobre el número de flores y producción de fruto. Postgrado de

Recursos Genéticos y Productividad. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México. 123 p.

De Santiago, J. 2008. Breve sobre costos reales de producción de tomate. *Hortalizas*. Recuperado de <https://www.hortalizas.com/cultivos/tomates/breve-sobre-costos-reales-de-produccion-de-tomate/>.

Domínguez, I. A., Altamirano, J., Barrientos, A. F., y Ayala, G. A. V. 2019. Análisis del sistema de producción y certificación de semillas en México. *Revista fitotecnica mexicana*, 42 (4): 347-356.

Domínguez, J. I., Vergara, M. M., Aguirre, R., Barrea, D., Montero J., Cáceres, L., Egillor, P., Ezpinoza, A. y García, A. 2019. Panorama de la agricultura chilena. *Oficina de estudios y políticas agrarias de Chile*. Recuperado de <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/09/panorama2019Final.pdf>.

Dorais, M., Gosselin, A., and Trudel, M. 2015. Greenhouse Crops. In *The Canadian Encyclopedia*. Retrieved from <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/en/article/greenhouse-crops>.

Douglas, J. S. 1997. Hidroponía: cómo cultivar sin tierra. El Ateneo. 157p.

Durán, R. F. 2010. Manual de cultivos hidropónicos. *Grupo Latino Editores*. Colombia. 424 p.

El Economista. 2015. Cinco empresas concentran el mercado de semillas en México. *América Economía*. Recuperado de <https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/cinco-empresas-concentran-el-mercado-de-semillas-en-mexico>.

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of de United Nations. 2019. The Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. Tomato statistics. FAO, Roma, Italy. Retrieved from <http://www.fao.org/faostat/es/#compare>.

FDA. 2016. Tomatoes PDF. Retrieved from https://www.wifss.ucdavis.edu/wp-content/uploads/2016/10/Tomatoes_PDF.pdf.

FIRA. Fideicomiso Instituido en Relación a la Agricultura. 2019. Panorama agroalimentario, dirección de investigación y evaluación económica y sectorial, tomate rojo 2019. Recuperado de:

<https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2019/06/Panorama-Agroalimentario-Tomate-rojo-2019.pdf>.

Gardner, F. P., Pearse, R. B. and Mitchel, R. L. 1990. Physiology of Crop Plants, Iowa State University Press. 327 p.

Gericke, W. F. 1937. Hydroponics: Crop production in liquid culture media. *Science*, 85 (2198): 177-178.

Gómez, A. 2020. Nivel tecnológico y desarrollo de los invernaderos en Colombia. *Redagricola.com*. Recuperado de <https://www.redagricola.com/co/nivel-tecnologico-y-desarrollo-de-los-invernaderos-en-colombia/>.

Gómez, O. 2021. Invernaderos y sistemas de riego en México. *ICEX España Exportación e Inversiones*. Oficina Económica y Comercial de España en Ciudad de México. 11p. Recuperado de <https://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros-servicios/informacion-de-mercados/paises/navegacion-principal/el-mercado/estudios-informes/DOC2020858538.html?idPais=MX>.

Hernández, J.L.M., Razo, F.D.J.G., y Martínez, J.H. 2017. Análisis de rentabilidad del cultivo de jitomate bajo invernadero en San Simón de Guerrero, Estado de México. *Paradigma Económico*, 9 (2): 167-187.

Heuvelink, E. Tao, L., and Dorais, M. 2018. Plant growth and yield. In: Heuvelink, E. (ed.). Tomatoes, 2nd Edition. CABI. Publishing Co. Wageningen, The Netherlands. pp: 89-136.

Heuvelink, E. and Okello, C. O. R. 2018. Developmental process. In: Heuvelink, E. (ed.). Tomatoes, 2nd Edition. CABI. Publishing Co. Wageningen, The Netherlands. pp: 59-88.

Higashide, T. 2016. Factors pertaining to dry matter production in tomato plants (*Solanum lycopersicum*) In: Higashide, T. (editor). *Solanum lycopersicum*. Nova Publ., New York, NY. pp: 1-23.

Higuchi, Y., and Hisamatsu, T. 2016. Light acts as a signal for regulation of growth and development. In: Kosai, T.; Fujiwara, K; Runkle, E. S. (Editors). Led Lighting for Urban Agriculture. *Springer*. Singapore, Singapore. pp: 57-73.

Higuchi, Y., Sumitomo, K., Oda, A., Shimizu, H., and Hisamatsu, T. 2012. Day light quality affects the night-break response in the short-day plant

chrysanthemum, suggesting differential phytochrome-mediated regulation of flowering. *Journal of Plant Physiology* 169: 1789-1796.

Hopkins, W. G. and Hüner, N. P. A. 2009. Introduction to Plant Physiology (Fourth edition). John Wiley and Sons. Hoboken, New Jersey, USA. 503 p.

Hortydaily.com[®]. 2019. US: Greenhouse vegetable acreage up 15 percent between 2012 and 2017. Retrieved from <https://www.hortidaily.com/article/9093453/us-greenhouse-vegetable-acreage-up-15-percent-between-2012-and-2017/>.

Huterwal, G. O. 1977. Hydroponics: cultivation of plants without any soil. Albatros. México. 251 p.

Jensen, M. H. 1997. Hydroponics. *HortScience*, 32 (6): 1018-1021.

Jishi, T. 2018. Led lighting technique to control plant growth and morphology. In: Kosai, T. (Editor). Smart Plant Factory. Springer. Singapore, Singapore. pp: 211-222.

Kosai, T. 2016. Transplant production in closed systems. In: Kozai, T.; Niu, G.; Takagaki, M. (eds). Plant Factory. Elsevier. San Diego, California, USA. pp: 237-250.

Kubota, Ch. de Gelder, A., and Peet, M. M. 2018. Greenhouse tomato production. In: Heuvelink, E. (Ed.): Tomatoes, 2nd Edition. CABI. Publishing Co. Wageningen, The Netherlands. pp 276-313.

Leskovar, D. I. and D. J. Cantliffe. 1991. Growth and yield of tomato plants in response to age of transplants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116 (3): 416-420.

López, L. M. 2017. Manual técnico del cultivo del tomate: *Solanum lycopersicum*. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria – INTA. San José Costa Rica. 126 p. Recuperado de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/F01-10921.pdf>.

Miguel, N., Ayala O. J., Sánchez, Del C. F., and 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. doi: 10.5154/r.rchsh.2021.01.003.

- Molina, E., y Victorero, E. 2015. La agricultura en países subdesarrollados. Particularidades de su financiamiento. La Habana: CLACSO. 29p. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/35230323>. Pdf.
- Momokawa, N., Kadono, Y., and Kudoh H. 2011. Effects of light quality on leaf morphogenesis of a heterophyllous amphibious plant, *Rotala hippuris*. *Annals of Botany* 108: 1299-1306.
- Morales, J. L., González, F. D. J., y Hernández, J. 2017 Análisis de rentabilidad del cultivo de jitomate bajo invernadero en San Simón de Guerrero, Estado de México. *Paradigma económico* 9 (2): 167-187.
- Moreno, A., Aguilar, J., y Luévano, A. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 15 (29): 763-774.
- Moreno P. E. C., Sánchez, Del C. F., Ruiz D. M., and Contreras, M. E. 2021. Effect of population densities and paclobutrazol applications on seedling quality and yield in tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 27 (1): 5-17. doi: 10.5154/r.rchsh.2020.05.010.
- Naik, P. K., Dhuri, R. B., Karunakaran, M., Swain, B. K., and Singh, N. P. 2013. Hydroponics technology for green fodder production. *Indian Dairyman*, 65 (3): 54-58.
- Ortiz Solorio. C. A. 1987. Elementos de Agrometeorología Cuantitativa. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 327 p.
- Peralta, I.E., Knapp, S., and Spooner, D.M. 2006. Nomenclature for wild and cultivated tomatoes. *Tomato genetics cooperative report*, 56, 6-12.
- Pérez, M. J. 2021. Efecto de dosis de nitrógeno, fósforo, luz suplementaria, paclobutrazol y aminoácidos sobre calidad de plántula y floración en jitomate. Instituto de Horticultura, Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. 99 p.
- Pérez, J., Hurtado, G., Aparicio, V., Arqueta Q., y Larí, M. 2002. Guía Técnica del Cultivo de Tomate. CENTA. El Salvador. 48 p. Recuperado de <http://www.centa.gob.sv/docs/guias/hortalizas/Guia%20Tomate.pdf>

- Perry, K. B., Wu, Y., Sanders, D. C., Garrett, J. T., Decoteau, D. R., Nagata, R. T., and McLaurin, W. J. 1997. Heat units to predict tomato harvest in the southeast USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 84 (3-4): 249-254.
- Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E., and Maccleery, B. 2015. Greenhouse design and control. *The Netherlands*: CRC Press.
- Quesada, G., and Bertsch, F. 2012. Fertirriego en el rendimiento de híbridos de tomate producidos en invernadero. *Agronomía mesoamericana*, 23 (1): 117-128.
- RaboBank. 2018. World vegetable map: More than just a local affair. Rabo-Research Food & Agribusiness. Retrieved from <https://research.rabobank.com/publicationservice/download/publication/to ken/XKmlnK6nCpbdmfITxAV>.
- Reina G. J. 2020. Comparación de la dinámica nutrimental en jitomate despuntado a tres racimos entre sistemas hidropónicos abiertos y cerrados. Universidad Autónoma Chapingo, 114 p.
- Resh, H. M. 2006. Cultivos hidropónicos. 5a edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 558 p
- Resh, H. M 1989. Hydroponic food production. Woodridge Press. Santa Barbara, California, 384 p.
- Roberto, K., 2003. How to Hydroponics. The Future Garden Press, Farmingdale, NY, 86 p.
- SAGARPA. 2017. Planeación agrícola nacional 2017-2030, Jitomate mexicano. *Secretaría de agricultura de México*. México 20 p. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/257077/Potencial-Jitomate.pdf>.
- Sánchez, Del C. F., y Escalante, R. E. 1988. Hidroponía. 3a ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 194 p.
- Sánchez, Del C. F., y Moreno, P.E.C. 2017. Diseño agronómico y manejo de invernaderos. *Universidad Autónoma Chapingo (UACH)*. Chapingo, Texcoco, México. 405 p.
- Sánchez, Del C. F., Moreno P. E. C., Coatzín, R. R., Colinas, L. M. T., y 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. doi: dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2010.16.026.
- Sánchez, Del C. F., Moreno, P. E. C., and Contreras, M. E. 2012. Development of alternative crop systems for commercial production of vegetables in hydroponics - I: tomato. *Acta Horticulturae*, 947, 179-187.
- Sánchez, Del C. F., Moreno, P. E. 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.
- Sánchez Del C. F., Moreno, P. E. C., Pastor, Z. O. A., y Contreras, M. E. 2017a. Disposición de plantas de tomate en doseles en forma de escalera bajo dos densidades de población. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40 (3): 333-340.
- Sánchez, Del C. F., Moreno, P. E. C., Pineda, P. J., Osuna, J. M., Rodríguez, P. J. E. y Osuna E. T. 2014. Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia*, 48: 185-197.
- Sánchez, Del C. F., Moreno, P. E. C., Vázquez, R. J. C., y González, N. M. A. 2017b. Densidades de población y niveles de despunte para variedades contrastantes de jitomate en invernadero. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 23 (3): 163-174. doi: 10.5154/r.rchsh.2017.01.003.
- Sánchez, Del C. F., Portillo, M. L., Moreno, P. E., del C. Magdaleno, V. J. y 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.
- Sardare, M. D., and Admane, S. V. 2013. A review on plant without soil-hydroponics. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2 (3): 299-304.
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., and Chaurasia, O. P. 2018. Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17 (4): 364-371. doi: 10.5958/2455-7145.2018.00056.5.
- Shi, X., An, X., Zhao, Q., Liu, H., Xia, L., Sun, X., and Guo, Y. 2019. State-of-the-art internet of things in protected agriculture. *Sensors, MDPI* 19 (8): 1-24. doi:10.3390/s19081833.

- SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2020. Boletín mensual de avance de la producción de tomate rojo (jitomate). México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en: <https://www.gob.mx/siap/documentos/boletin-mensual-de-avances-de-la-produccion-de-tomate-rojo-jitomate>.
- Singh, S., Singh, D. R., Velmurugan, A., Jaisankar, I., and Swarnam, T. P. 2008. Coping with Climatic Uncertainties Through Improved Production Technologies in Tropical Island Conditions. *In Biodiversity and Climate Change Adaptation in Tropical Islands* (pp. 623-666). Academic Press. doi:10.1016/B978-0-12-813064-3.00023-5
- SNICS. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. 2021. Gaceta derechos de obtentor en línea. *Secretaría de agricultura y desarrollo rural*. Registro en línea obtenido de <https://datastudio.google.com/reporting/d00350bc-3705-414a-bf36-da97e7aa071f/page/itBWB>.
- SNIIM. Sistema Nacional de Información e Integración de Mercados. 2021. Mercados nacionales agrícolas, precios al mayoreo de frutas y Hortalizas: tomate saladette y bola, registros del 01/01/2020 al 31/12/2020. Registro en línea disponible en <http://www.economia-sniim.gob.mx/Nuevo/Home.aspx?opcion=Consultas/MercadosNacionales/PreciosDeMercado/Agricolas/ConsultaFrutasYHortalizas.aspx?SubOpcion=4|0>.
- Souza, S. V., Gimenes, R. M. T., and Binotto, E. 2019. Economic viability for deploying hydroponic system in emerging countries: A differentiated risk adjustment proposal. *Land Use Policy*, 83, 357-369. doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.020
- Suazo, L. F., Zepeda, B. R., Sánchez, Del C. F., Martínez, H. J. J., Virgen, V. J., and Tijerina, C. L. 2014. Growth and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) as affected by hydroponics, greenhouse and irrigation regimes. *Annual Research & Review in Biology*, 4 (24): 4246-4258. doi:10.9734/ARRB/2014/11936.
- Taiz, L. and Zeiger, E. 2002. Plant physiology, third edition. Sinauer Associates, Sunderland, Massachusetts. 690 p.
- Terrones, A., Sánchez, Y., Robles, V. H., y Vargas, J. R. 2020. Rentabilidad Económica De La Producción De Jitomate En Valle De Tulancingo,

- Hidalgo, México: 2018-2019. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 4: 595-606.
- Tewolde, F. T., Shiina, K., Maruo, T., Takagaki, M., Kozai, T., Yamori, W. 2018. Supplemental LED inter-lighting compensates for a shortage of light for plant growth and yield under the lack of sunshine. *PLoS ONE* 13 (11): 1-14.
- Urrestarazu, M. 2015. Manual Práctico del Cultivo sin Suelo e Hidroponía. *Mundi-Prensa*. Madrid, España. 278 p.
- Vargas, C. J. M., Palacios R. M. I., Aguilar, A. J., Ocampo, L. J. G., Kreimer, P., and Ortiz, M. G. (2018). Technological innovation in a case of protected agriculture in Mexico. *Revista de Geografía Agrícola*, 61 (2): 9-38. doi.org/10.5154/r.rga.2017.61.02.
- Vinci, G., and Rapa, M. (2019). Hydroponic cultivation: life cycle assessment of substrate choice. *British Food Journal*. 121 (8):1801-1812. Doi: 10.1108/BFJ-02-2019-0112.
- Washington, M. 2021. Mercado internacional de semillas de frutas y hortalizas 2021: Bayer cropscience, Sakata seed, Syngenta, Monsanto de otras industrias. *El Heraldo de León*. Recuperado de <https://www.el-heraldo-bajio.com/mercado-de-semillas-de-frutas-y-hortalizas-de-otras-industrias/>
- Wien, H. C. 1999. Transplanting: *In: The Physiology of Vegetable Crops*. Wien, H. C. (Editor). CABI Publishing. Ithaca, NY, USA. pp: 37-67.
- Zar, J. H. 1996. Biostatistical analysis. 3er edition. New Jersey. Prentice Hall. 662 p.
- Zárate, M. W., Arellano G. M. A., Ramírez G. F., Moreno L. K., y González S. D. C. 2021. Evaluación de diferentes niveles de radiación sobre la densidad estomática de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8 (3): e3009. doi.org/10.19136/era.a8n3.3009.