



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA

INSTITUTO DE HORTICULTURA

**EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE
JITOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill.) EN
HIDROPONÍA BAJO INVERNADERO**



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

T E S I S
QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

PRESENTA:

Rogelio Coatzín Ramírez

Septiembre de 2011, Chapingo, Estado de México, México.



Instituto de Horticultura

EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE JITOMATE (*Lycopersicon
esculentum* Mill.) EN HIDROPONÍA BAJO INVERNADERO

Esta tesis fue realizada por Rogelio Coatzín Ramírez bajo la dirección del Consejo Particular que se indica, ha sido aprobada y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

CONSEJO PARTICULAR

DIRECTOR:



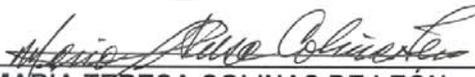
DR. FELIPE SÁNCHEZ DEL CASTILLO

ASESOR:



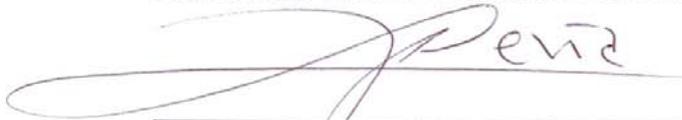
DR. ESAÚ DEL CARMEN MORENO PÉREZ

ASESORA:



DRA. MARÍA TERESA COLINAS DE LEÓN

ASESOR:



DR. AURELIANO PEÑA LOMELÍ

LECTOR EXTERNO:



DRA. LUCILA GONZÁLEZ MOLINA

Chapingo, Estado de México. Septiembre de 2011

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las instituciones y personas que colaboraron en el logro de este objetivo:

Al Consejo Nacional de Ciencia Y tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de Doctorado.

A la Universidad Autónoma Chapingo, departamento de Fitotecnia por brindarme la oportunidad de superarme académicamente.

Al Dr. Felipe Sánchez del Castillo, por su valiosa dirección, apoyo y aporte de experiencia invaluable en la realización del presente trabajo.

Al Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez por sus grandes aciertos en el asesoramiento y realización de la presente tesis y formar parte del comité asesor.

A la Dra. María Teresa Colinas de León por su apoyo incondicional y aporte en la elaboración del presente trabajo, siempre mis agradecimientos y respetos a usted.

Al Dr. Aureliano Peña Lomelí por formar parte del comité asesor y apoyo incondicional en la realización del presente trabajo.

A la Dra. Lucila González Molina, por aceptar ser lector externo de la presente tesis.

Al Biólogo José Cutberto por su valiosa amistad y apoyo en la elaboración de la presente investigación.

Al laboratorio de Ecología de Fitotecnia, especialmente a don Víctor, don Gumaro por su valiosa e invaluable colaboración, ya que son parte de este trabajo, sin

ustedes no hubiera sido posible la elaboración del presente trabajo “GRACIAS POR SU APOYO”

Al laboratorio de Fisiología especialmente a don Florentino que siempre lo tendré presente por la gran persona que es, también a don Toñito por su apoyo incondicional.

Al M. C. Francisco Suazo a quien agradezco su apoyo y amistad incondicional.

Al Sr. Eusebio “Don chebo” por la amistad brindada y apoyo prestado en la presente investigación.

A mis compañeros y amigos que convivimos en el lapso de estudios del Doctorado, a mi compa Juan Ayala a quien agradezco tanto apoyo académico como moral a mi amigo Carlitos por la amistad invaluable, a Román por la gran amistad prestada a Toño por la gran amistad y apoyo de esta investigación gracias a todos.

A mis amigos, Rodrigo Cruz Esteban por la amistad y apoyo en todos los sentidos a Javier Montaña por la invaluable amistad.

DEDICATORIA

Con todo el amor de un hijo, que siempre agradecerá su amor, cariño y apoyo

Les dedico con mucho cariño a:

Mis padres

Sra. Francisca Ramírez Ximello

Sr. Pedro Coatzín Sanguino

A mi esposa

El pilar de mi familia, sin ti no hubiese sido posible esta tesis “gracias”

“La mejor esposa y madre de la actualidad”

A mi hijo

A mi pequeño hijo Osmar (ratoncito), que es la motivación de cada día.

“Te quiero mucho”

A mis hermanos

Jorge que adoro y por supuesto a su esposa Linda

Maribel adorada, mis sobrinas adoradas Jaqui y Aimé, mí cuñado Jesús

Rafael querido, mi sobrinita Vale y claro a mi cuñada Lupita

A mis suegros

Por la comprensión y apoyo

Sra. Carmen Aycardo Martínez

Sr. Brígido Cortes Cid

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor nació el día 2 de Abril de 1977 en Tepetzintla, Huatlatlauca, Puebla. Su instrucción escolar primaria la realizó en la escuela "Agustín Melgar" ubicada en Culiacán, Sinaloa durante el periodo de 1983 a 1989. Posteriormente, su formación media la recibió en la Escuela secundaria federal N° 4 Pablo de Villavicencio durante el periodo 1989 a 1992. Inicó sus estudios de Preparatoria en el ciclo escolar 1992 a 1995. Ingresó a la Universidad Autónoma de Sinaloa en 1995 y culminó su formación profesional en la Facultad de Biología con orientación en Ecología en el año 2000, posteriormente del 2002 al 2004 realizó la maestría en Ciencias Forestales en la Universidad Autónoma Chapingo.

Su experiencia profesional laboral inició en el año 2000. Durante el lapso de un año con dos meses desarrollando actividades en inventarios forestales en la ciudad de Mazatlán, Sinaloa.

CONTENIDO

ÍNDICE DE CUADROS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iii
I.- INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1.- OBJETIVO.....	7
1.1.1.- Objetivo general.....	7
1.2.- HIPÓTESIS.....	7
1.2.1.- Hipótesis general.....	7
II.- REVISIÓN GENERAL DE LITERATURA.....	8
2.1.- Origen, descripción e importancia del jitomate (<i>Lycopersicon</i> esculentum Mill.)	8
2.1.1.- Producción continua del jitomate.....	10
2.1.2.- Hidroponía.....	13
2.1.3.- Invernadero.....	15
2.2.- Relación fuente- demanda.....	16
2.2.1.- Rendimiento.....	20
2.3.- La energía radiante y el funcionamiento y desarrollo de la planta.....	21
2.3.1.- Índice de área foliar.....	26
2.3.2.- Tasa de asimilación neta.....	27
2.3.3.- Tasa de crecimiento del cultivo.....	28
2.3.4.- Análisis de rendimiento.....	30
2.3.5.- Radiación interceptada por el dosel y el rendimiento.....	30
2.3.6.- Eficiencia de la energía interceptada por el dosel.....	39
2.3.7.- Tasa de pérdida de materia seca.....	46
2.4.- Duración del crecimiento.....	46
2.4.1.- Efecto de la incidencia de la radiación solar sobre la acumulación de biomasa.....	47
2.4.2.- Efecto del espaciamiento entre plantas en el desarrollo de las plantas de jitomate.....	51
2.4.3.- Efecto del espaciamiento entre plantas sobre la distribución de la biomasa y el rendimiento del cultivo.....	52
III.- EVALUACIÓN DE SISTEMAS I: EVALUACIÓN AGRONÓMICA Y FISIOTÉCNICA DE SEIS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE JITOMATE EN HIDROPONÍA BAJO INVERNADERO	61
3.1.- Resumen.....	61
3.2.- Abstract.....	62
3.3.- Introducción.....	63
3.4.- Materiales y métodos.....	66
3.5.- Resultados y discusión.....	75
3.6.- Conclusiones.....	83
IV.- LITERATURA CITADA	84
V. EVALUACIÓN DE SISTEMAS II: EVALUACIÓN AGRONÓMICA Y FISIOTÉCNICA DE CUATRO SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN DOS HÍBRIDOS DE JITOMATE.....	102
5.1.- Resumen.....	102
5.2.- Abstract.....	103

5.3.- Introducción.....	104
5.4.- Materiales y métodos.....	107
5.5.-Resultados y discusión.....	112
5.6.- Conclusiones.....	118
VI.- DISCUSIÓN GENERAL.....	124
VII.- CONCLUSIONES.....	130
VIII.- LITERATURA CITADA.....	131

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1.- Unidades de medidas más comunes de la irradiancia.....	22
CUADRO 2.- Equivalencias aproximadas entre diferentes unidades de irradiancia.....	23
CUADRO 3.- Comparación de medias para algunas variables morfológicas en plantas de jitomate a los 60 días después de la siembra.....	75
CUADRO 4.- Comparación de medias para algunas variables morfológicas en plantas de jitomate a los 90 días después de la siembra.....	77
CUADRO 5.- Comparación de medias para algunas variables morfológicas en plantas de jitomate a los 120 días después de la siembra.....	78
CUADRO 6.- Comparación de medias de rendimiento y sus componentes en diferentes sistemas de producción en jitomate.....	80
CUADRO 7.- Comparación de medias de rendimiento entre hileras en diferentes sistemas de producción de jitomate.....	81
CUADRO 8.- Comparación de medias de rendimiento entre racimos por planta en diferentes sistemas de producción en jitomate.....	82
CUADRO 9.- V alores de F y significancia estadística de varios indicadores de crecimiento de plantas de jitomate para los distintos factores de estudio y las interacciones.....	118
CUADRO 10.- V alores de F y significancia estadística de variables relacionadas con el rendimiento en jitomate para los distintos factores de estudio y las interacciones.....	119
CUADRO 11.- TAN y TCC entre 30 y 60 dds e IAF, PSP y PSM ² a los 60 dds, de cuatro sistemas de producción y dos genotipos de jitomate.....	120
CUADRO 12.- TAN y TCC entre 60 y 90 dds e IAF, PSP y PSM ² a los 90 dds de cuatro sistemas de producción y dos genotipos de jitomate.....	121
CUADRO 13.- TAN y TCC entre 90 y 120 dds e IAF, PSP y PSM ² a los 120 dds de cuatro sistemas de producción y dos genotipos de jitomate.....	122
CUADRO 14.- Efecto del sistema de producción y del genotipo de jitomate en el rendimiento y variables relacionadas.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dosel escaleriforme en dirección este-oeste conformado en cuatro hileras de plantas de jitomate despuntadas a tres racimos en bolsas colocadas a diferente altura.....	5
Figura 2. Plantas de diferentes edades en dirección este-oeste.....	6
Figura 3. Dosel uniforme dispuesto en tres hileras.....	67
Figura 4. Dosel uniforme dispuesto en cuatro hileras.....	68
Figura 5. Dosel escaleriforme en dirección este-oeste conformado en cuatro hileras de plantas de jitomate despuntadas a tres racimos en bolsas colocadas a diferente altura.....	69
Figura 6. Sistema de imbricación de doble hilera en el tiempo con dirección norte-sur.....	70
Figura 7. Sistema de imbricación de plantas con orientación este-oeste.....	72
Figura 8. Sistema de imbricación de plantas con orientación este-oeste.....	73

RESUMEN

El jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es la especie hortícola más cultivada bajo invernadero en México y en el mundo, por lo que es de interés encontrar sistemas de producción que incrementen su rendimiento y calidad en estas condiciones. En el presente trabajo se realizaron dos investigaciones con el objetivo de comparar fisiotécnica y agrónomicamente seis sistemas de producción (dosel en forma de escalera formado por cuatro hileras de plantas de la misma edad ubicadas a distinta altura; tres sistemas en doseles con ciclos imbricados en forma de escalera; dosel uniforme formado por cuatro hileras de plantas y dosel uniforme formado por tres hileras de plantas) alternativos al convencional que se basa en cultivares indeterminados manejados a un solo tallo en ciclos muy largos con bajas densidades de población. Se utilizaron tres cultivares de jitomate tipo bola; en el primer experimento se utilizó el 'Charleston', el cual es de crecimiento indeterminado y en un segundo experimento dos híbridos de crecimiento determinado ('Pick Ripe 461' y 'Sun Lider'). Las plantas fueron conducidas a un solo tallo y despuntadas dos hojas por encima del tercer racimo. Las variables evaluadas a los 30, 60, 90 y 120 días después de la siembra fueron: índice de área foliar, tasa de asimilación neta, tasa de crecimiento del cultivo, peso seco por planta y por metro cuadrado útil, rendimiento por planta, número de frutos por planta, peso medio de frutos, número de frutos/m², rendimiento/m² e índice de cosecha. En el primer experimento el sistema de producción con dosel en forma de escalera de plantas a distinta altura, presentó el rendimiento más alto por ciclo (19.15 kg/m²) y el mayor peso medio de fruto (166 g), pero el sistema con mayor potencial de productividad anual fue el de ciclos imbricados cada 50 días. En el segundo experimento el sistema escaleriforme también presentó el rendimiento más alto 16.48 kg/m², así como el mayor peso del fruto 140 g, sin embargo el sistema de imbricación cada 50 días siguió presentando el mayor potencial de rendimiento anual debido a lo corto de sus ciclos de cultivo.

PALABRAS CLAVE: *Lycopersicon esculentum*, densidad de población, disposiciones de plantas, despunte

ABSTRACT

Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) is the horticultural species most commonly grown under greenhouse in Mexico and the world, so it is of interest to find production systems that increase its yield and quality in these conditions. In this study two investigations were conducted with the aim of comparing physio-technical and agriculturally six alternative production systems (ladder-shaped canopy formed by four rows of plants of the same age placed at different heights; three systems in canopies with cycles overlapping as a ladder; uniform canopy formed by four rows of plants and uniform canopy formed by three rows of plants) to a conventional system based on low population densities. Three red tomato ball type cultivars were used; in the first experiment "Charleston" tomato was used, which is of undetermined growth and in a second experiment two hybrids ('Pick Ripe 461' and 'Sun Lider') of determined grow were used. The plants were taken to a single stem and were blunted two leaves above the third cluster. The variables evaluated at 30, 60, 90 and 120 days after planting were: leaf area index, net assimilation rate, crop growth rate, dry weight per plant and per useful square meter, yield per plant, number of fruits per plant, average weight of fruits, number of fruits/m², yield/m² and harvest index. In the first experiment, the production system with ladder-shaped canopy of plants at different height showed the highest yield per cycle (19.15 kg/m²) and the highest average weight of the fruit (166 g), but the system with more potential of annual productivity was that of the overlapping cycles every 50 days. In the second experiment, the ladder-system also showed the highest yield 16.48 kg/m², as well as the highest fruit weight 140 g, however, the overlapping system every 50 days continued to have the greatest annual potential yield due to their short crop cycles.

KEY WORDS: *Lycopersicon esculentum*, population density, plant layout, blunt

I.- INTRODUCCIÓN GENERAL

El tomate o jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es uno de los cultivos hortícolas con mayor área cultivada y producción global (FAO, 2004). La producción de esta hortaliza en México se realiza en casi todos sus estados, pero sólo en cinco (Sinaloa, Baja California, San Luis Potosí, Jalisco y Michoacán) se concentra 75 % de la producción total, donde destaca Sinaloa como el principal productor. En el año 2006 la producción nacional fue de 2,093,431.59 t, con una superficie cosechada de 63,953 ha y rendimiento medio de 32 t ha⁻¹ (SIAP, 2006).

Entre los principales problemas que limitan la producción y productividad del tomate a cielo abierto en nuestro país, está la topografía accidentada en la mayor parte del territorio mexicano, condiciones climáticas adversas (bajas o altas temperaturas, granizo, lluvias excesivas, mala calidad e insuficiente cantidad de agua de riego, entre otras). Las plagas y enfermedades son otros de los principales problemas que impactan en el cultivo de esta hortaliza, incrementando los costos de producción por el uso de productos químicos para su control. Ruiz y Aquino (1996) mencionan que las pérdidas en producción observadas frecuentemente alcanzan 100 %, especialmente en el periodo primaveral, en donde se observan las mayores densidades de mosca blanca entre las plagas más notorias.

Ante esto se ha optado por inclinarse hacia nuevos sistemas de cultivo como es el uso de invernaderos combinado con la técnica de hidroponía, que poseen como principales ventajas el permitir altos rendimientos, mejor calidad, varias cosechas al año en cultivos de alto valor que pueden comercializarse localmente.

Según Steta (2003), en México en el 2002 se tenían establecidas 1,205 has, de las cuales, 830 has eran de tomate (principalmente bola y cherry) y estaban en construcción 365 has más, y para el 2005 se estimaban la existencia de 3,000 has. Las estadísticas por parte de la AMCI (**) muestran que actualmente existen más de 10 mil has y para las próximas dos décadas el potencial de crecimiento visualizado es de 30 a 40 mil has.

El sistema de producción de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en invernadero más utilizado en países Europeos y de Norte América consiste en usar cultivares tipo bola de crecimiento indeterminado capaces de rendir hasta 400 t ha⁻¹ año⁻¹, con densidades de 2 a 3 plantas /m² que se dejan crecer a más de 3 m de altura, donde se cosechan de 15 a 20 racimos por planta por año en ciclos desde trasplante hasta cosecha que pueden llegar a durar 10 meses, con tecnología difícil, basada en una infraestructura y equipo sofisticado que elevan costos de producción (Resh 2001). El rendimiento por unidad de superficie es alto y el ciclo dura todo el año.

En la Universidad Autónoma Chapingo se han realizado trabajos de investigación con sistemas hidropónicos bajo invernadero para generar otros sistemas o paquetes tecnológicos de producción de jitomate, que produzcan al menos los mismos rendimientos anuales, pero más sencillos de manejar técnicamente y de menor costo que el sistema convencional, por lo tanto su potencial de rentabilidad económica es mayor (Cancino *et al.*, 1990; Sánchez y Corona, 1994).

Uno de estos sistemas se basa en dejar cada planta con uno, dos a tres racimos mediante un despunte (eliminación del ápice terminal) temprano dos hojas arriba

de la última inflorescencia que se va a conservar, además se eliminan todos los brotes laterales dejando un tallo por planta.

El trasplante se realiza con plántulas de 45 a 50 días de edad, con lo que el ciclo de trasplante a fin de cosecha se reduce a tres meses si se deja tres racimos por planta, o a dos meses y 10 días si se deja un racimo por planta (Cancino *et al.*, 1990; Sánchez y Corona, 1994; Sánchez y Ponce, 1998). Para lograr plántulas de esa edad el semillero no se hace en charolas convencionales sino en contenedores de más de 500 ml (Contreras, 2007). Cabe destacar que en el sistema convencional adoptado en México, las plántulas germinan y se desarrollan en charolas de poliestireno con 200 cavidades y con un espaciamiento reducido, lo que sólo permite que estas permanezcan en las charolas de 25 a 30 días como máximo.

En la presente investigación se utilizaron contenedores de 750 ml, con espaciamiento suficiente para que las plántulas permanezcan hasta 50 días en condición de semillero. De esta forma, los ciclos de trasplante a fin de cosecha se acortan casi un mes lo que combinado con el sistema de despunte temprano, que también acorta el ciclo de cultivo, permite obtener más ciclos de cultivo por año (McAvoy *et al.*, 1989; Sánchez y Corona, 1994).

El rendimiento por planta es bajo pues sólo se le cosechan de uno a tres racimos, pero como también su área foliar es muy reducida en relación a las plantas que no se despuntan, la densidad de población se puede aumentar considerablemente (desde 6 a 8 plantas/m² para plantas despuntadas de tres racimos hasta 16 a 18 plantas/m², para las despuntadas a un racimo, dejando las plantas a un solo tallo

sin brotes laterales), compensando el poco rendimiento por planta, con más plantas por unidad de superficie. Con ello se logra un rendimiento por ciclo un poco menor al del sistema convencional, pero en un tiempo mucho menor. Como se pueden hacer varios ciclos al año (cuatro a cinco según el nivel de despunte) la productividad anual logra ser superior (Jorge y Sánchez, 2003).

El cultivo bajo este sistema de despunte temprano y alta densidad de población se ha efectuado utilizando como contenedores camas rellenas con sustrato; el largo de las mismas es variable, pero el ancho es de 1 a 1.20 m y las plantas se establecen en tres, cuatro a cinco hileras por cama. Se ha observado que aunque el rendimiento global por unidad de superficie en alto, el rendimiento por hilera es diferente. Las plantas de las hileras adyacentes a los pasillos rinden de un 25 a 30 % más que las hileras centrales debido a que sus hojas interceptan más RFA y más uniformemente al no tener competencia completa por el lado de los pasillos (Ucan y Sánchez, 2005). Las plantas de las hileras centrales están más sombreadas al tener plantas que compiten por RFA por ambos lados.

De ahí que la idea central del presente trabajo consistió en probar tratamientos para incrementar el rendimiento por unidad de superficie mediante un manejo de las plantas en tiempo y espacio, que promueva que la radiación solar incidente se intercepte más uniformemente por la planta incrementando la fotosíntesis del dosel y por lo tanto, la materia seca por planta y el número de racimos cosechados por unidad de superficie al año.

(**) www.imagenagropecuaria.com/articulos.php?id_see=26&id_art=740

Dada la inclinación de la radiación solar en su máxima cenital a lo largo del año, por encontrarse Chapingo a los 19° de latitud norte, se plantea la hipótesis de que colocando las hileras de plantas de jitomate a distinta altura y en dirección este-oeste, se pueden formar doseles en forma de escalera (Figura 1) de tal forma que las plantas de hileras contiguas se sombreen menos entre sí, y con esto lograr un incremento en el rendimiento respecto a los sistemas en donde las hileras de plantas se manejen a la misma altura (Sánchez *et al.*, 1999).

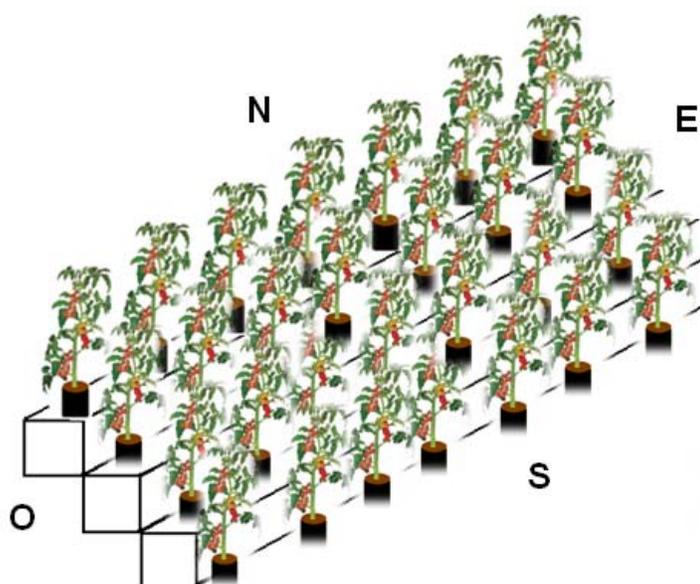


Figura 1. Dosel escaleriforme en dirección este-oeste conformado en cuatro hileras de plantas de jitomate despuntadas a tres racimos en bolsas colocadas a diferente altura.

Otra disposición de las plantas en que parece posible capturar más uniforme y eficientemente la RFA por las hojas del dosel es hacer doseles en forma de escalera, plantando cada hilera de plantas en distintos tiempos colocándolas de tal manera que las hileras de las plantas de más edad y por lo tanto más altas no sombreen a las de menor edad (Figura 2). Se plantea que una vez establecido el

sistema de producción con hileras de plantas sembradas secuencialmente en el tiempo se logra una producción continua, donde hay aparte mejor distribución de RFA en el dosel y por lo tanto mayor producción de biomasa y eventualmente de rendimiento por unidad de superficie por año.

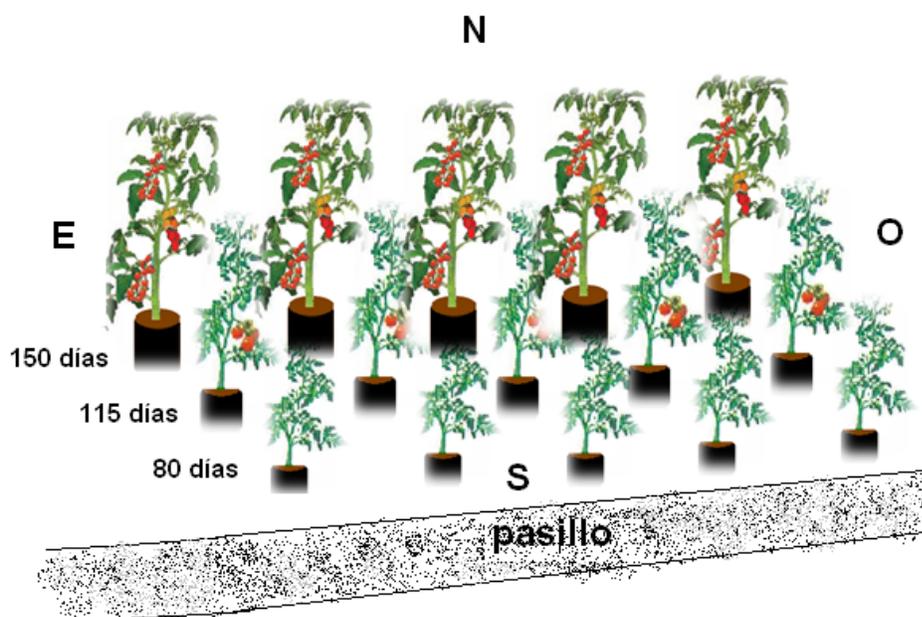


Figura 2. Plantas de diferentes edades en dirección este-oeste.

Al respecto destaca el estudio realizado por Vázquez y Sánchez (2007) que en tinas orientadas Oriente-Poniente, buscando una mejor intercepción de luz, formaron un dosel en forma de escalera manejando, en cada tina de 1.2 m de ancho, tres hileras de plantas despuntadas a diferente número de racimos. Las plantas de la hilera ubicada al sur de la tina se despuntaron a un racimo, las de la hilera central a tres racimos y las de la hilera ubicada al norte a seis racimos por planta. De esta manera, considerando la distancia entre plantas que hubo en cada hilera, lograron cosechar 43 racimos m^{-2} , obteniendo un rendimiento de 30 $kg\ m^{-2}$, contra los 20 $kg\ m^{-2}$ logrados en los tratamientos testigo de plantas en dosel

uniforme despuntadas a tres racimos y 8 plantas m^{-2} (24 racimos m^{-2}), que son los que se han manejado comercialmente.

En la presente investigación se compararan diferentes modalidades de producción de jitomate con doseles en forma de escalera, contra modalidades de dosel uniforme con plantas a tres racimos dispuestas en tres y cuatro hileras utilizando cultivares de jitomate de crecimiento determinado e indeterminado.

1.1.- OBJETIVO

1.1.1.- Objetivo general

Comparar la productividad anual de diferentes sistemas de producción de jitomate en hidroponía bajo invernadero basada en poblaciones con doseles en forma escalonada contra poblaciones basadas en dosel uniforme.

1.2.- HIPOTESIS

1.2.1.- Hipótesis general

Para una misma densidad de población ciertas formas de disponer o arreglar las plantas en tiempo o espacio, pueden hacer más homogénea la distribución de radiación solar (directa y difusa) entre las hojas de un dosel.

Para un índice de área foliar determinado el dosel con distribución más homogénea de la radiación fotosintéticamente activa, tendrá una mayor tasa de asimilación neta (TAN) y, por lo tanto, mayor producción de materia seca por unidad de superficie y tiempo.

Debido a una distribución más homogénea de la RFA y una mejor (TAN), el rendimiento por unidad de superficie será mayor en los sistemas de dosel escalonado respecto a la del dosel uniforme.

Materiales y Métodos

Para el logro del objetivo propuesto y de la comprobación de las hipótesis planteadas, el trabajo de investigación que se realizó contó de una revisión de literatura exhaustiva sobre el tema y de dos experimentos secuenciados.

En el primer experimento se compararon de manera agronómica y fisiotécnica seis sistemas de producción de jitomate, en hidroponía bajo invernadero, dos de ellos basados en doseles uniformes y los otros cuatro en forma de escalera. El cultivar utilizado fue Charleston el cual es de hábito indeterminado.

En función de los resultados obtenidos se planteó un segundo experimento donde se seleccionaron los dos mejores tratamientos escaleriformes del primer experimento para compararlos con los dos tratamientos de dosel uniforme, pero ahora con dos cultivos de hábito determinado (Sun Lider y Pick Ripe 461), decisión que se tomó al observar que la densidad de follaje que produjo el cultivar Charleston fue muy alto por su hábito indeterminado, afectando el promedio de rendimiento por planta en altas densidades como las que se manejaron en el primer experimento.

II.- REVISIÓN GENERAL DE LITERATURA

2.1.- Origen, descripción e importancia del jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.)

El tomate o jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), especie cultivada originaria de América y al parecer domesticado por primera vez en México, es la hortaliza más importante en numerosos países y su popularidad aumenta constantemente, debido a su alto nivel de consumo, por lo que constituye una de las principales fuentes de vitaminas y minerales (Nuez, 1999).

El jitomate es una planta dicotiledónea perteneciente a la familia de las solanáceas, perenne, de porte arbustivo que se cultiva como anual. La planta puede desarrollarse en forma rastrera, semierecta o erecta y el crecimiento es limitado en variedades determinadas e ilimitadas en las variedades indeterminadas. La ramificación es generalmente simpodial, con lo que los ejes sucesivos se desarrollan a partir de la yema axilar del eje precedente y la yema terminal da lugar a la inflorescencia o a ramas abortivas. Las hojas son compuestas, imparipinadas con 7 a 9 folíolos y una filotaxia de 2/5 en espiral. La inflorescencia es un dicasio compuesto generalmente por 4 a 12 flores. El fruto es una baya de forma globular, ovoide o aplastada cuyo peso oscila, según la variedad entre 5 y 500 g. Cuando la planta crece directamente de la semilla sin sufrir trasplantes desarrolla una potente raíz principal que le permite adaptarse a ecosistemas semidesérticos, pero cuando la raíz principal se daña como por ejemplo a consecuencia del trasplante, se desarrolla un sistema de raíces laterales adventicias (Nuez, 1999).

La planta se desarrolla bien en un amplio rango de latitudes, tipos de suelo, temperaturas y métodos de cultivo, pero se desarrollan mejor en ambientes cálidos, con buena iluminación y drenaje. La exposición prolongada a temperaturas inferiores a 10 °C, la escarcha, una iluminación diurna inferior a 12 h, un drenaje deficiente o un abonado nitrogenado excesivo le afectan desfavorablemente. El fallo en el cuajado por polinización deficiente es uno de los problemas más comunes en el cultivo del jitomate (Nuez, 1999).

2.1.1.- Producción continúa de jitomate

Mediante diferentes trabajos de investigación, se ha logrado definir y validar comercialmente una nueva tecnología de producción de jitomate en hidroponía, que se basa en despuntar (eliminar la yema apical) las plantas para dejar sólo una, dos o tres inflorescencias (racimos florales) con una a dos hojas arriba de estas: además, se eliminan mecánicamente todos los brotes laterales que emite la planta antes, durante y después del despunte, con el propósito de establecer altas densidades de población (Cancino *et al.*, 1990; Sánchez y Corona. 1994; Sánchez *et al.*, 1998).

Así, a través de prácticas de manejo, se ha logrado un arquetipo de jitomate que, a diferencia de las plantas del sistema convencional, incorpora varias características de las mencionadas como adecuadas para el logro de altos rendimientos en un ambiente no restrictivo, como el propiciado por un invernadero en condiciones hidropónicas. Por ejemplo, con el despunte para dejar un racimo por planta y la poda de brotes laterales, se reduce la altura, de más de 2 m a solo 50 cm, así como el área foliar por planta y obliga a la planta a un crecimiento determinado,

reduciendo notablemente la competencia entre crecimiento vegetativo y reproductivo, lo que favorece a este último, además al dejar una sola inflorescencia por planta, se elimina por completo la competencia entre racimos, favoreciendo un mayor tamaño y peso de frutos (Sánchez, 1997).

Gracias a la reducción de la altura y del área foliar por planta que se ha logrado con el despunte temprano, la densidad de población se ha podido incrementar hasta 25 plantas por m^2 de superficie útil (18 plantas m^2 de invernadero) en el caso de plantas conducidas a un racimo, lo que ha permitido el establecimiento rápido y temprano en el ciclo de cultivo, de un índice de Área Foliar (IAF) óptimo, así como el mantenimiento del mismo durante todo el periodo de crecimiento del fruto. Potencialmente se pueden producir cinco ciclos de cultivo en un año, por tanto, la biomasa que se puede lograr por m^2 al año es muy superior y el índice de cosecha casi igual al del sistema convencional, por lo que la productividad anual puede aumentar por encima de las $600 t ha^{-1} año^{-1}$ (Sánchez y Corona, 1994; Ponce, 1998).

En muchos ensayos experimentales y comerciales se han comparado tratamientos con diferentes niveles de despunte (despunte para dejar uno, dos a tres racimos por planta) y diferentes densidades de población dentro de cada nivel de despunte: de 6 a 15 plantas m^2 de superficie útil en sistemas a tres racimos por planta, de 9 a 25 plantas m^2 de superficie útil en sistemas a dos racimos por planta, y de 10 a 36 plantas m^2 de superficie útil en sistemas a un racimo por planta. En todos estos casos se han usado como contenedores camas o tinas de 1 a 1.2 m de ancho

rellenadas por un sustrato a una profundidad de 20 a 25 cm (Cancino *et al*, 1990; Sánchez y Corona, 1994).

En un trabajo Ucan *et al* (2005) y a través de varias experiencias comerciales se ha podido observar que las hileras de plantas (generalmente 4 hileras de plantas por cama) que corren a lo largo del centro de las camas rinden de 20 a 30 % menos que las plantas ubicadas en las hileras orientadas hacia los pasillos y que ello se debe a una menor cantidad de RFA interceptada por la planta en las hileras centrales, como producto del sombreadamiento ocasionado entre ellas y las hileras exteriores, mismas que se ven favorecidas con mayor iluminación y mejor distribución de la luz en las hojas por el espacio de los pasillos que hay entre tina y tina.

Considerando la flexibilidad en el manejo de las plantas de jitomate y en la ubicación y movimientos diarios y estacionales del sol, es posible pensar en formas y disposiciones de plantas que mejoren la distribución de la radiación solar (directa y difusa) en cada una de las hojas del dosel, conduciendo a un incremento en la TAN (gramos de materia seca producida por cada m^{-2} de hoja por día) o a un incremento en el IAF (sin una disminución importante de la tasa de asimilación neta) que se refleje en una mayor producción de biomasa por unidad de superficie por día, de tal forma que se busca disposiciones de plantas donde la radiación incidente se intercepte más uniformemente por el dosel, permitiendo la obtención de más racimos por unidad de superficie y tiempo, sin detrimento significativo del número de frutos por racimo ni del peso medio de los frutos para así incrementar el rendimiento y la productividad anual (Sánchez *et al.*, 1999). Jorge *et al.* (2003)

realizaron un experimento que demuestra que esto es posible en tinas orientadas norte-sur, buscando mejorar la intercepción de luz por el dosel, se formó un dosel escaleriforme manejando 25 plantas m^{-2} de superficie útil distribuidas en cuadro real (cinco hileras de plantas por cama a 20 cm entre plantas y 20 cm entre hileras) y despuntando las dos hileras exteriores para dejar un racimo por planta, las dos hileras intermedias para dejar dos racimos por planta y la hilera central para dejar tres racimos por planta. De esta manera lograron alojar 45 racimos m^{-2} útil contra 25 que se logran con el sistema de despunte a un racimo ó 36 con el esquema de 3 racimos y 12 plantas m^{-2} . Con esta disposición de plantas, formando un dosel escaleriforme, obtuvo un rendimiento de 30 $kg\ m^{-2}$, contra solo 20 $kg\ m^{-2}$ en los tratamientos testigo de un racimo y 25 plantas m^{-2} y de 3 racimos y 12 plantas m^{-2} , que son los que se aplican comercialmente.

Dada la inclinación de la radiación solar en su máxima cenital, por encontrarse Chapingo a los 19° de latitud norte se plantea la idea de que orientando las hileras de plantas de jitomate en dirección este-oeste y manejándolas a distinta edad, se pueden formar doseles en forma de escalera (escaleriforme) de tal forma que las plantas más desarrolladas no sombreen a las chicas, y con esto lograr un incremento en el rendimiento anual con relación a los sistemas convencionales de producción en invernadero (Sánchez *et al.*, 1999).

Se han realizado bastantes trabajos en jitomate basados en doseles escaleriformes. Al respecto, Méndez y Sánchez (2005) probaron el formar en cada tina de cultivo con orientación este-oeste, doseles escaleriformes mediante el manejo de tres o cuatro hileras de plantas de distintas alturas y con orientación

este-oeste obteniendo rendimientos significativamente superiores respecto a plantas manejadas en doseles uniformes.

Vázquez *et al.*, (2007) también obtuvo mayor rendimiento (29.3 kg m⁻² de parcela útil) al acomodar en un sistema escaleriforme 48 racimos m⁻² de parcela útil, contra 36 kg m⁻² del testigo uniforme con 6 plantas de parcela útil despuntadas a seis racimos y rendimiento de 21.3 kg m⁻² de parcela útil por ciclo de cinco meses.

2.1.2.- Hidroponía

La hidroponía, etimológicamente significa "trabajo en agua" o cultivo en agua. Actualmente se considera como el establecimiento de cultivos sin suelo (Urrestarazu, 2004) y se define como un sistema de producción en el que las raíces de las plantas se riegan con una mezcla de elementos nutritivos esenciales disueltos en el agua, y en el que en vez de suelo se utiliza como sustrato un material inerte o simplemente la misma solución (Sánchez y Escalante, 1989).

Existen muchas modalidades de este sistema de cultivo y se usan en función de los factores ambientales, socioeconómicos y tecnológicos de cada país y de cada productor. El uso de esta técnica ha ocurrido a raíz de los descubrimientos de las sustancias (elementos minerales) que permiten el desarrollo de las plantas, que al conjugarse con el uso de invernaderos permitió un gran impulso, especialmente en el cultivo de flores y hortalizas, particularmente en países como Estados Unidos, Canadá, Japón, Rusia, Holanda, España y otros países de Europa, Asia y África (Resh, 2001).

Por la fuerte inversión que implica la instalación y operación de estos sistemas, la rentabilidad económica se restringe a cultivos de alto valor económico y con mercado seguro, con un manejo eficiente del espacio y del tiempo para alcanzar la máxima productividad, entendida esta como el rendimiento por unidad de superficie y tiempo ($\text{kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$).

La necesidad de incrementar la producción agrícola en un contexto de escasa superficie cultivable por habitante y por productor, de irregularidades en el clima como la falta de agua y las heladas, y de serias limitaciones en la fertilidad de los suelos acentuadas por la topografía accidentada, erosión hídrica y eólica y salinidad, ha llevado a considerar como una opción tecnológica el uso de sistemas de producción intensivos como la hidroponía y los invernaderos (Sánchez y Corona, 1994).

2.1.3.- Invernadero

La función de los invernaderos es la de modificar total o parcialmente aquellas condiciones de clima que son adversas, además de aplicar agua y fertilizantes de acuerdo al estado de desarrollo de las plantas; esto se traduce en incrementos significativos de producción, tanto en cantidad como en calidad. Se debe tener en cuenta que producir en condiciones de invernadero es más costoso que producir en campo abierto y que no es tarea fácil ya que se trata de practicar agricultura de precisión. También se debe tener en cuenta que si bien, las condiciones ambientales dentro del invernadero le son favorables a las plantas para que expresen su potencial de producción, también son favorables para la presencia y daño por plagas y enfermedades, por lo cual se deben implementar medidas

preventivas y correctivas, pues éstas pueden acabar con el cultivo en su totalidad en un corto espacio de tiempo (Espinosa, 2004).

2.2.- Relación fuente-demanda

Las plantas vasculares tienen un mecanismo complejo que regula la cantidad de nutrimentos que se exportan desde las hojas hacia los tejidos de poca o nula actividad fotosintética, producto de la energía ganada por la fijación de CO₂ en forma de carbohidratos durante la fotosíntesis.

Sonnewald y Willmitzer (1992), definen a los órganos fuente como exportadores netos de fotoasimilados (hojas maduras, tubérculos y otras estructuras de reserva en los momentos en que exportan sus azúcares almacenados). A los órganos de demanda los definen como importadores netos de carbono fijado (yemas terminales o apicales en crecimiento, meristemos en raíces, hojas que inician su crecimiento, flores y frutos en proceso de crecimiento, semillas etc.); Los frutos son incapaces de fotosintetizar, o su producción de fotosintatos es insuficiente para cubrir sus necesidades. Los órganos de demanda se pueden subdividir en: a) demandas de utilización, que se refiere a tejidos de crecimiento rápido con metabolismo alto y activo (meristemos, hojas inmaduras, frutos que inician su crecimiento), y b) demandas de almacenamiento, donde los carbohidratos se almacenan como almidones, ácidos grasos o proteínas (tubérculos, raíces o semillas).

El ambiente en que crecen la planta y el estado de desarrollo en que ésta se encuentra, afectan las proporciones en que la nueva materia seca es distribuida

entre sus distintos órganos (Salisbury y Ross, 1994). Sonnewald y Willmitzer (1992) señalan que los órganos de las plantas se dividen en a) órganos fuente, definidos como exportadores netos de fotoasimilados (hojas maduras, tubérculos y otras estructuras de reserva en el momento en que exportan sus azúcares almacenados), y b) órganos de demanda, definidos como importadores netos de carbono fijado (yemas terminales o apicales en crecimiento, meristemos en raíces, hojas que inician su crecimiento, flores y frutos en proceso de crecimiento, semillas entre otros); estos órganos son incapaces de fotosintetizar, o su producción de fotosintatos es insuficiente para cubrir sus necesidades. Los órganos de demanda pueden ser de utilización inmediata o de almacenamiento.

Según Lawlor (1993), la fotosíntesis y el rendimiento agronómico están indirectamente relacionados. La materia seca se distribuye entre los órganos de interés económico y órganos que no son consumidos. La distribución depende del número de sitios potenciales de almacenamiento, de su capacidad para asimilar y del abastecimiento de asimilados. El rendimiento agronómico está limitado, bajo ciertas condiciones, por la capacidad de almacenamiento de asimilados (capacidad de la demanda). Mientras que en otras circunstancias la limitación proviene de la tasa de producción de asimilación (capacidad de la fuente).

Shishido *et al.* (1989) mencionan que, para el caso del jitomate, la tasa de fotosíntesis de las hojas disminuye gradualmente con la edad, pero la cantidad de fotosintatos producidos se incrementa con el aumento de su área, alcanzando un máximo un poco antes de la expansión completa de cada hoja. La mayoría de los asimilados son traslocados a la demanda más cercana. La relación entre la fuente

y la demanda cambia con los diferentes estados de desarrollo de las raíces, tallos y frutos. Se calcula que de 60 a 80 % de los requerimientos de una inflorescencia son abastecidos por 2 a 4 de las hojas adyacentes a ella. La máxima contribución de una hoja a la acumulación de asimilados por una demanda fue de 30 %. La competencia entre órganos demandantes de asimilados puede ser facilitada por la ruta de transporte común entre algunos órganos demandantes y sus hojas fuente. Existen cuatro conductos vasculares verticales en el tallo que conecta con las hojas adyacentes (Shishido *et al.*, 1989).

Tanto la iniciación de la inflorescencia como el desarrollo de las flores requieren un cierto nivel de suministro de asimilados. La iniciación de la primera inflorescencia en jitomate es retardada por bajo FFF, debido a que mas hojas son iniciadas antes de la primea inflorescencia (Picken *et al.*, 1885). Los efectos de baja radiación sobre el desarrollo floral son muy parecidos a la carencia en el suministro de asimilados (Ho, 1996). Bajo temperaturas óptimas, pero insuficiente luz, el desarrollo floral puede sufrir aborto (Picken, 1984). La competencia por los asimilados entre los órganos vegetativos y reproductivos cambia con el desarrollo de la inflorescencia. El ápice parece ser una demanda más fuerte que la inflorescencia en iniciación y cuando el suministro de asimilados es inadecuado: por ejemplo, por bajo FFF la inflorescencia sólo obtiene asimilados después de que las necesidades del ápice vegetativo han sido satisfechas. En estas condiciones la inflorescencia puede abortar, mientras que las hojas jóvenes pueden continuar su crecimiento (Kinet, 1977).

El patrón de crecimiento de una planta de jitomate sugiere que existe una prioridad

definida en la distribución de asimilados hacia los órganos en crecimiento. Varios órganos demandantes tienen diferentes habilidades para atraer asimilados y así la prioridad de un órgano en recibir asimilados es el resultado de la competencia entre órganos de demanda. Un bajo FFF o una elevada densidad de población en plantas de jitomate de crecimiento determinado, una vez que se inicia la fructificación, propicia aborto de flores y disminuye el crecimiento de brotes y raíces (Hewitt y Marrush. 1986). En una planta de crecimiento indeterminado, el peso fresco ganado por fruto es cercano a 80 % del peso ganado por la planta: como el fruto acumula más agua que otros órganos, la diferencia en materia seca ganada entre órganos es menor. Sin embargo, la tasa de acumulación diaria de materia seca en los frutos por planta (2.05 g), es considerablemente más alta que la de las hojas (1.52 g) y el tallo (0.8 g). Aunque cuando el suministro de asimilados es limitado, el fruto toma la mayoría de los asimilados disponibles y se retrasa el subsiguiente desarrollo de las inflorescencias, nuevos brotes y raíces, causando senescencia temprana de hojas o muerte de raíz (Hurd *et al.*, 1979). El orden de prioridad en los cambios de distribución de asimilados es raíces > hojas jóvenes > flores en plantas floreciendo hacia fruto > hojas jóvenes > flores y raíces en plantas fructificando (Ho, 1996).

La ubicación de las hojas de jitomate abajo de la primera inflorescencia puede describirse como una filotaxia de 2/5 en espiral en el tallo (Ho y Hewitt. 1986). La primera inflorescencia es alimentada de fotoasimilados por las hojas 1,3,6 y 8 con una diferencia de menos de 90° respecto a la inflorescencia, mientras que el ápice es abastecido por las hojas 1 a 4 y las raíces por las hojas 5 a 9 (Rusell y Morris. 1983). Las hojas 1, 3, 6 y 8 además suministran al ápice y las raíces, y todas estas

hojas están conectadas del mismo filamento vascular, por lo que existe competencia directa entre estos órganos demandantes para la misma fuente de asimilados. Comúnmente los racimos de frutos puede abastecerse de asimilados principalmente de las dos hojas que se encuentran inmediatamente arriba de tales racimos (Sishido *et al.*, 1989).

Una expresión de la proporción de materia seca total que finalmente es traslocada al producto de interés agronómico es el llamado índice de cosecha (IC) por planta, el cual se define como el cociente entre el rendimiento económico (Re) y la biomasa (B) total producida o rendimiento biológico. El rendimiento económico (Re) por unidad de superficie es el producto del IC (promedio por planta) y la B acumulada, por lo que el Re anual por unidad de superficie depende directamente del IC promedio de las plantas en el año y de la B producida durante el mismo lapso (Beadle, 1988, Sánchez. 1997).

2.2.1.- Rendimiento

El análisis del rendimiento de un genotipo implica el estudio de sus principales componentes, que en el caso de jitomate están dados fundamentalmente por el número y el peso de los frutos ya sea por planta o por unidad de superficie. Los componentes más importantes del rendimiento son el número, peso y tamaño de fruto. El tamaño y peso del fruto están determinados en su aspecto genético y son heredables. Sin embargo, pueden modificarse por temperaturas, agua, suelo, podas, fertilización, raleo de frutos, riegos, etc. (Bernabé y Solís, 1999).

La repartición de fotoasimilados entre varios frutos está determinada por la fuerza

demandante en los diferentes frutos y la habilidad de las distintas hojas para abastecerlos. Los frutos que empiezan su crecimiento más temprano tienen una mayor tasa de acumulación de peso seco y mayor periodo de crecimiento que los frutos en los que el crecimiento se inicia posteriormente (Wolf y Rudich, 1988).

Entre mayor es el número de racimos por planta, menor es el peso de racimos individuales y el número de frutos por racimo, debido a la competencia entre racimos por fotoasimilados disponibles. El mayor grado de competencia para un racimo en particular proviene del inmediatamente superior a éste (Fisher, 1977).

Al incrementar el número de frutos por racimo en jitomate, se incrementa el rendimiento por planta, aunque existe la tendencia de la obtención de frutos más pequeños. Generalmente, un número alto de frutos por racimo, incrementan el rendimiento, pero reducen el peso medio de los fruto. Un bajo número de frutos por racimo incrementa el tamaño y la calidad del fruto pero reduce el rendimiento (Saglam y Yazgan, 1995).

2.3.- La energía radiante y el funcionamiento y desarrollo de la planta

Para mantener su estructura y funcionamiento, los seres vivos necesitan un continuo aporte de energía, que reciben al tomar alimentos. A su vez, estos alimentos han sido sintetizados por las plantas con una inversión de energía, pero la energía que las plantas emplean es energía de la luz. La luz tiene características de partícula y de onda y representa sólo la porción de la energía radiante con longitudes de onda visibles para el ojo humano (aproximadamente 390 a 760 nm), la cual es una región muy angosta del espectro electromagnético (Salisbury y Ross, 1994).

La luz, es la parte visible de la radiación solar, por mucho tiempo ha sido reconocida como el factor esencial en la fotosíntesis. La longitud de onda en la banda de 400-700 nm (radiación fotosintéticamente activa, RFA) es usada más eficientemente en la fotosíntesis (Gardner *et al*, 1995), y la medida de la luz para la fotosíntesis se puede expresar como densidad del flujo de fotones fotosintéticos o simplemente flujo de fotones fotosintéticos (FFF).

Sánchez (2001a) define la irradiancia como la cantidad de energía de radiación que incide sobre una unidad de superficie plana en un cierto intervalo de tiempo. La irradiancia se mide en unidades radiométricas (basadas en la energía producida por unidad de espacio y tiempo), cuánticas (basadas en el número de fotones incidentes en una superficie por unidad de tiempo) y fotométricas (indicadores indirectos basados en el brillo producido por la intensidad de radiación).

Ejemplos de unidades de medida de la irradiancia se muestran en el Cuadro 1 y las equivalencias aproximadas se incluyen en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Unidades de medidas más comunes de la irradiancia

Radiométricas	Cuánticas	Fotométricas
Js ⁻¹ m ⁻² o sea W m ⁻²	μmol m ⁻² s ⁻¹ antes μE m ⁻² s ⁻¹	Lux (brillo de una candela a 1 m de distancia)
Erg s ⁻¹ m ⁻²		
Cal cm ⁻² min ⁻¹ (Langley min ⁻¹)		Pie-bujía o pie candela (brillo de una candela a 1 pie de distancia)
MJ m ⁻² día		

Fuente: Sánchez (2001 a) J= Joule; s= segundo; W= watt; Cal= caloría; Einsten

Cuadro 2. Equivalencias aproximadas entre diferentes unidades de irradiancia.

unidad	Equivalencia aproximada	Equivalencia aproximada
1 Watt m ⁻² (RFA)	23.184 pie-bujía	249.07 lux (luz solar)
1 Watt m ⁻² (RFA)	21.882 pie-bujía (luz incandescente)	234.45 lux (luz incandescente)
1 Watt m ⁻² (RFA)	28.571 pie bujía (luz fluorescente)	307.43 lux (luz fluorescente)
1 Watt m ⁻² (RFA) (RST) sostenido un minuto	0.00143 cal cm ⁻² min ⁻¹ (cualquier luz)	
1 Watt m ⁻² (RFA) sostenido un día	0.0864 MJ m ⁻² día ⁻¹ (cualquier luz)	
1 Watt m ⁻² (RFA)	4.657 μmol m ⁻² s ⁻¹ (luz solar)	
1 μmol m ⁻² s ⁻¹ (RFA)	4.97 pie-bujía (luz solar)	53.48 lux (luz solar)
1 pie-bujía (RFA)	10.76 lux (cualquier luz)	

Fuente: Sánchez (2001 a), adaptado de Mastalerz (1977) y Coombs *et al.* (1988).

El proceso biológico de las plantas autótrofas es directa y dramáticamente influido por la intensidad de la luz (la fuerza motriz de la fotosíntesis), la cual abastece la energía química necesaria para reducir el CO₂ en carbono orgánico (CH₂O) y con ello obtener energía química para el desarrollo de la planta. Además, la intensidad de la luz (densidad de flujo fotónico) es tal vez la variable ambiental más sobresaliente a la cual las plantas deben enfrentarse (Björkman, 1981).

El proceso de fotosíntesis se presenta principalmente en las hojas verdes y en mucha menor proporción en otros órganos verdes (peciolos y tallos) de la planta, Jones (1999) señala que la tasa de fotosíntesis es afectada por factores externos a la planta, tales como: temperatura del aire (alta y baja), nivel de CO₂ en el aire cercano a la planta, e intensidad y calidad de la luz.

La radiación de onda corta influye de dos maneras en el desarrollo de los cultivos: La Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA, luz de 400 a 700 nm) es necesaria para la fotosíntesis, y en consecuencia para la producción de los cultivos, mientras que la energía de radiación de onda larga es el factor principal que afecta la transpiración de los cultivos (Jolliet, 1993). La productividad de la mayoría de los cultivos de invernadero es influenciada fuertemente por la cantidad de radiación que reciben. Cockshull *et al.* (1992) observaron una relación proporcional entre el rendimiento de jitomate y la radiación solar recibida. A menudo, la luz limita la producción en invernaderos, especialmente en invierno y a altas latitudes (Cockshull, 1988).

Las especies cultivadas eficientes tienden a invertir la mayoría de su crecimiento inicial en la expansión de área foliar, lo que resulta de una intercepción más eficiente de la radiación solar. De hecho, muchas prácticas agronómicas, tales como el abono de base, altas densidades de plantas y arreglos de distribución de plantas más uniformes, se usan para acelerar el cubrimiento del terreno con follaje e incrementar así la intercepción de luz en fases más tempranas del ciclo del cultivo. Conforme aumenta el área foliar, la intercepción de la radiación solar por las hojas también es mayor (Gardner *et al.*, 1995).

La respuesta de una planta a la radiación incidente ha sido clasificada como fotosintética y fotomorfogénica (Sager *et al.*, 1982). Ballaré *et al.* (1995) señala que los pigmentos vegetales absorben la mayoría de los fotones de las partes ultravioleta (100-400 nm) y visible (390-760 nm) del espectro. Por el contrario, pocos fotones son absorbidos del rojo lejano (700-775 nm) y la mayoría se reflejan

en forma de radiación difusa. Por lo tanto, dentro del dosel de las plantas, la radiación ambiental se caracteriza por niveles bajos de longitudes de onda azul y rojo que son más absorbidos por las clorofilas, y niveles altos de rojo lejano. Cambios en la relación rojo: rojo lejano, mediada por el sistema fitocromo, puede alterar el patrón de crecimiento de ciertas plantas, mismas que cuentan con mecanismo para detectar la proximidad de las vecinas en plantas erectas. De acuerdo con Bruggink y Heuvelink (1987), los mecanismos fotomorfogénicos pueden estar involucrados por las siguientes respuestas al amontonamiento: a) aumento de altura; b) distribución heterogénea de brotes; c) alteración en la ramificación y en la distribución de asimilados. Estos autores también señalan que el incremento en el área foliar total en respuesta a una disminución en el FFF total diario se debe a la influencia de fotorreceptores de luz azul.

El nivel de luz dentro de un invernadero depende de su localización y de su construcción, afectando la transmisión. Lo anterior puede ser modificado por el tipo de invernadero, su construcción y su orientación. Es importante poder predecir la transmisión de un invernadero, por ejemplo, en el diseño de nuevos invernaderos y cuando se está buscando la mejor orientación del invernadero (Bailie *et al.*, 1990); Cockshull *et al.*, 1992. Además, la transmisión de un invernadero es difícil de medir debido a la variación espacial dentro del invernadero. Heuvelink *et al.* (1995) midió la radiación total global y la fracción difusa fuera del invernadero. Las mediciones mostraron valores constantes de 62 % para la transmisión en días medios nublados (90-100 % de radiación difusa), mientras que la transmisión promedio diaria para el sector varió entre 51 % y 73 % en días claros (cuando una gran parte de la

radiación es directa) la transmisión se puede incrementar desde valores inferiores a 40 % en la mañana temprano hasta 70 % alrededor del medio día.

2.3.1.- Índice de Área Foliar

Según Pearce *et al.* (1965), el índice de área foliar (IAF) no es más que el área de hojas que existen por unidad de superficie de suelo. Estos autores indican que el número y tamaño de las hojas son afectados por el genotipo y el medio ambiente; la posición de las hojas en la planta es controlado principalmente por el genotipo, que también tiene un efecto importante sobre la tasa de crecimiento de la hoja y de las dimensiones finales, así como la capacidad de respuesta a las condiciones imprevistas del medio ambiente y a las condiciones hídricas.

El desarrollo del IAF en el tiempo es de suma importancia debido a su relación cercana con la intercepción del FFF, un prerequisite de la fotosíntesis (Williams *et al.*, 1965; Shibles y Weber, 1966). El desarrollo de un área foliar adecuada para la cobertura completa del suelo en el momento más temprano en la vida del cultivo resulta en una mayor duración del área foliar (frondosidad durante el periodo de crecimiento) y ha sido destacado por muchos investigadores, por sus beneficios en la intercepción del FFF en la estación de crecimiento y por tanto en la producción final. La forma más apropiada para aumentar el IAF rápidamente es incrementando la población de plantas por unidad de superficie lo cual se ha probado en varios cultivos: chile (Verheij y Verwer, 1971); pepino (Nederhoff, 1984) y jitomate (Harper *et al.*, 1979; Papadopoulos y Ormrod, 1990).

Por su lado, Van de Vooren *et al.* (1986) mencionan que en plantas viviendo en poblaciones después de que se sobrepasa un cierto IAF, como un efecto del sombreado mutuo, se intercepta menos radiación y se producen menos fotoasimilados por planta, lo que puede conducir a un menor número de frutos por planta y un menor diámetro y peso de los mismos.

Pendleton *et al.* (1968), investigando con maíz, concluyeron que cuando se busca rendimiento de fruto o de grano, hay una densidad óptima (IAF óptimo) más allá de la cual el IAF puede ser excesivo, ocasionando que muchos fotosintatos sean desviados hacia crecimiento vegetativo o para la respiración de mantenimiento y queden menos disponibles para el crecimiento de los frutos o granos. En este caso, debe procurarse formar un dosel denso tan pronto como sea posible. Aunque no hay pérdida de rendimiento por estar sobre el IAF crítico, tampoco hay ganancia porque no se puede interceptar más de 100 % del FFF.

2.3.2.- Tasa de asimilación neta

Dado que la superficie de las hojas es la parte fotosintética primaria de las plantas, es deseable expresar el crecimiento con base en el área foliar. La Tasa de asimilación neta (TAN) es la tasa de acumulación de materia seca por unidad de área foliar por unidad de tiempo (generalmente se expresa como g m^{-2} de área foliar día^{-1}). La TAN es una medida de la eficiencia de la fotosíntesis en el promedio de todas las hojas del dosel y conforme el cultivo crece y el IAF aumenta más y más hojas se sombrean, hay una disminución de la TAN conforme el ciclo avanza (las hojas sombreadas hacen muy poca fotosíntesis y además gastan fotoasimilados para respirar y mantenerse vivas). En doseles con alto IAF las hojas

jóvenes en la punta de las plantas son las que absorben la mayor parte de la radiación solar, tienen una tasa elevada de asimilación de CO₂ y translocan grandes cantidades de asimilados a otras partes de la planta. En contraste, las hojas más viejas en el interior del dosel, bajo condiciones de sombra excesiva tienen tasas muy bajas de asimilación de CO₂ y contribuyen con pocos o ningún asimilado a otras partes de la planta. La TAN no incluye la fotosíntesis no laminar (la que se da en órganos distintos a las hojas), la cual puede ser importante para el rendimiento en ciertos cultivos (Gardner *et al.*, 1995).

2.3.3.- Tasa de crecimiento del cultivo

El crecimiento en la mayoría de los casos, se define como un incremento en biomasa (Challa *et al.*, 1993). El término con un significado más claro para el análisis de doseles de cultivos es el de acumulación de materia seca por unidad de superficie de suelo por unidad de tiempo, llamado comúnmente tasa de crecimiento del cultivo (TCC). La TCC se mide cosechando una comunidad de plantas a intervalos frecuentes y calculando el incremento en peso seco de un muestreo a otro. Generalmente se expresa como gramos de materia seca producida por las plantas que cubren un metro cuadrado de suelo en un día (g m⁻² día⁻¹). La TCC está estrechamente relacionada con la intercepción de la radiación solar. Puesto que la superficie de la hoja es el órgano fotosintético principal de la planta, en ocasiones es deseable expresar el crecimiento con base en el área foliar; la acumulación de biomasa por unidad de área foliar por unidad de tiempo es denominada tasa de asimilación neta (TAN), de tal modo que: $TCC = TAN \times IAF$. El crecimiento del cultivo cuando es expresado como acumulación de biomasa por

unidad de área por unidad de tiempo se define como la tasa de crecimiento del cultivo (TCC) (Scurlock,1988)

Brougham (1960) trabajando con un dosel formado por pasto y trébol mostró que, a pesar de que la TAN va disminuyendo, la TCC se incrementa conforme lo hace el IAF hasta alrededor de 5, que es cuando se intercepta, en este dosel, 95 % de la radiación solar, índices de área foliar mayores a 5 ya no causaron cambios en la TCC denominando IAF crítico a aquel en el que el dosel alcanza la máxima TCC. Este concepto fue retomado por varios fisiólogos por dos causas: primero, porque la interceptación de energía radiante se aproxima asintóticamente a su máximo, lo cual significa que un IAF que intercepta 100 % de la radiación es muy difícil de medir con precisión; y segundo, porque la interceptación 95 % bajo la máxima radiación de $2300 \mu\text{mol fotonos m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, significa que la radiación en el fondo del dosel es de $115 \mu\text{mol de fotonos m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, que es el punto de compensación por luz para la mayoría de las plantas C_3 .

El incremento del IAF para lograr una interceptación de radiación solar superior a 95 % da como resultado incrementos insignificantes o nulos de la TCC. Brougham (1960) encontró que las plantas que usaron la mayoría de las hojas para interceptar el FFF crecieron más rápido, sugiriendo que un dosel eficiente debe permitir la penetración de parte del FFF hacia las hojas inferiores y que la distribución del FFF entre muchas hojas es un prerrequisito para una elevada productividad total. Esto no es sorprendente debido a que a niveles normales de CO_2 las hojas individuales de muchas plantas C_3 alcanzan tasas de asimilación máximas con aproximadamente un cuarto de la radiación disponible de la luz solar total en verano en una zona templada (Blackman, 1961): algunas de estas hojas

realmente absorben de 80 a 90 % del FFF incidente sobre ellas (Monteith, 1980). Bajo condiciones de FFF que favorecen altas tasas de fotosíntesis (alto IAF), el crecimiento de la planta sigue un patrón bien definido con hojas gruesas que tienen una elevada biomasa foliar por unidad de área foliar y un área foliar baja por unidad de biomasa total. La evidencia experimental en jitomate indica que la relación entre TRC (tasa relativa del cultivo) y el FFF media total diaria interceptada por las plantas jóvenes es una hipérbola rectangular (Bruggink y Heuvelink, 1987), sugiriendo que un FFF total diario bajo, disminuye bruscamente la TRC.

2.3.4.- Análisis de rendimiento

Según Charles-Edwards (1986), el crecimiento y productividad de un cultivo se puede determinar en función de cinco variables fisiológicas: a) la cantidad de energía radiante interceptada por el dosel; b) la eficiencia con la cual la energía interceptada por el dosel es utilizada para la producción de nueva materia seca; c) la proporción de nueva materia seca que es translocada al producto de interés agronómico; d) la tasa de pérdida de materia seca; y e) la duración del crecimiento y producción de la planta.

2.3.5.- Radiación interceptada por el dosel y el rendimiento.

Los cultivos, a nivel de población o comunidad, interceptan tanto radiación directa como difusa. Las hojas superiores reciben ambos tipos de luz, mientras que las hojas en el interior del dosel reciben una proporción más baja de luz directa (rayos solares que llegan a pasar). La radiación indirecta se vuelve dominante debido a la radiación transmitida a través de las hojas y reflejada de la superficie de las hojas y del suelo, además de la propia luz difusa incidente sobre el dosel desde todos los

ángulos. Tanto la cantidad como la calidad de la radiación cambian con la profundidad en el dosel debido a que la radiación transmitida y reflejada por las hojas es predominantemente infrarroja. Debido a que las plantas absorben luz principalmente entre los 400 y 700 nm, las longitudes de onda más largas se vuelven más prominentes en los estratos inferiores del dosel (Gardner *et al.*, 1995; Papadopoulos y Ormrod, 1990).

Generalmente las hojas expuestas a la radiación solar directa se encuentran arriba de su punto de saturación por luz. En un dosel planófilo y en ausencia de otros factores limitantes, las hojas superiores realizan fotosíntesis máxima por estar saturadas con luz, mientras que las de abajo tienen una fotosíntesis reducida debido al sombreadamiento, lo cual limita el incremento en la fotosíntesis total del dosel ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}$ de suelo cubierto por el dosel s^{-1}) al incrementar el IAF. Teóricamente, un dosel podría ser más eficiente (mayor fotosíntesis total del dosel por unidad de área del suelo) si la radiación estuviera distribuida más homogéneamente entre todas las hojas. Esto último podría lograrse con un dosel donde las hojas superiores fueran erectas y las de abajo planófilas con el sol ubicado cerca del zenit (Gardner *et al.*, 1995).

Del total de radiación que llega al dosel no toda es absorbida por éste, existiendo un coeficiente de extinción, el cual se define como la fracción de la energía de la radiación fotosintéticamente activa incidente absorbida por unidad de área foliar de un dosel vegetal (Nobel y Long, 1988).

Diferentes autores (Loomis y Williams, 1969; Nobel y Long, 1988; Gardner *et al.*, 1995; Acock, 1991) señalan que la energía radiante interceptada por el dosel (J),

depende de la cantidad diaria de energía incidente (S) y de la proporción en que ésta absorbida en dicho dosel (Q): es decir: $J = SQ$. Cuando se trata de un dosel cerrado, Q puede estimarse en función del índice de área foliar (IAF) y el coeficiente de extinción de luz en el dosel (K), del modo siguiente:

$$Q = 1 - e^{(-KIAF)}$$

En doseles en los cuales se supone una distribución aleatoria del follaje en las tres dimensiones, K depende principalmente del ángulo de inclinación dominante de las hojas, del IAF (relación inversa): de las proporciones relativas de radiación directa y difusa, de la elevación del sol respecto al horizonte, del diámetro finito del disco solar, de los cambios en la distribución espectral de la radiación incidente al penetrar en el dosel de las múltiples reflectancias de la radiación incidente dentro del dosel y de la disposición o arreglo de las hojas en forma vertical y horizontal (Campbell, 1981).

Generalmente los valores de K se encuentran entre 0.3 y 1.0, y para elevados IAF (más de 3), entre menor sea el valor de la distribución de la luz en el dosel se considera más eficiente para la fotosíntesis. En doseles con hojas verticales, como en muchas gramíneas, el valor de K frecuentemente es bajo (0.4 a 0.5) y la luz penetra con facilidad hasta los niveles inferiores. Por el contrario, doseles con hojas horizontales como en los cultivos de papa, soya, girasol, etc., presentan coeficientes de extinción elevados. Mock y Pearce (1975) señalaron que aun las hojas de las especies más eficientes alcanzan 80 % de su fotosíntesis máxima con menos del 50 % de la intensidad plena de luz y que la fotosíntesis máxima del dosel se logra cuando el mayor número de hojas del mismo interceptan luz a una

irradiancia media: es decir, cuando la distribución de la luz sea más uniforme en el dosel.

Los principales factores que afectan la producción o rendimiento de materia seca total por unidad de superficie son la radiación solar absorbida y la eficiencia en el uso de tal energía para la fijación del CO₂. La asimilación de CO₂ se ha estudiado mucho a nivel bioquímico y subcelular, incluso a nivel de hoja, pero hay poca información en lo referente a doseles de plantas realizando su actividad como población o comunidad. El problema es complejo debido a que los factores ambientales (macro y microambiente) constantemente están cambiando y varían de un estrato a otro del dosel aunado a que las plantas y sus órganos, según se ubiquen en tal dosel, responden de forma distinta (Gardner *et al.*, 1995).

Para determinar una densidad óptima deben considerarse algunos aspectos relacionados con las plantas o con el ambiente que las rodea, como son el tamaño de las plantas y su manejo. Los principales factores implicados son: radiación y fertilidad del suelo (Gardner *et al.*, 1995).

Normalmente, en investigaciones acerca de la interceptación solar parte del supuesto que las plantas están uniformemente distribuidas en el suelo y que sus hojas están homogéneamente distribuidas en el dosel. Sin embargo, cuando se manejan cultivos agrícolas muy rara vez se presenta este caso. Las semillas o plántulas generalmente se siembran en hileras. Entre mayor es el espacio dejando entre hileras se tiende a una menor distancia entre plantas en una misma hilera para mantener la misma densidad por unidad de superficie. La forma para conseguir alto rendimiento por unidad de superficie es intercepta tanta radiación solar como sea

posible y la distribución equidistante de plantas es la que proporciona la más temprana y máxima intercepción de luz. Conforme las hileras se separan más y el espacio de plantas en la misma hilera se vuelve menor (para mantener la misma densidad), la competencia interplantas ocurre más temprano. La altura de planta afecta la densidad óptima. La densidad debe de aumentar y la distancia entre hilera disminuir en plantas de poca altura para la intercepción óptima de la radiación fotosintéticamente activa y alcanzar así el potencial de rendimiento del cultivo (Gardner *et al.*, 1995).

Para el cultivo de jitomate en invernadero la estructura del dosel está basada en una, dos o cuatro hileras, separadas por pasillos que proporcionan el acceso para la cosecha del fruto y otras labores. Esta estructura del dosel tiene dos características que contrastan con el dosel horizontalmente uniforme de extensión infinita que frecuentemente se asume para estudio de la intercepción del FFF y fotosíntesis de los cultivos (Warren Wilson *et al.*, 1992). Primero, este es finito en extensión horizontal y en la orilla del invernadero hay un lado del dosel vertical elevado, el cual recibe un FFF adicional por ese lado. En segundo lugar, el dosel es limitado a hileras discontinuas (Warren Wilson *et al.* 1992) donde las hojas están a diferente profundidad en el dosel y pueden recibir distinto FFF (Longuenesse *et al.*, 1993).

Otra forma de analizar el efecto de la intercepción del FFF por el follaje de cultivos que son cerrados y tienen sus hojas aleatoriamente distribuidas en forma horizontal es mediante ecuaciones simples. La radiación se atenúa exponencialmente dentro de un dosel y es dada por: $I/I_0 = e^{-KL}$

Donde I y I_0 son el total del FFF en los puntos inferior y superior del dosel respectivamente, k es el coeficiente de extinción del FFF y L es el índice de área foliar acumulada (área foliar / área cultivada) de la superficie del follaje. Si $k=1$ y el $L=1$, todas las hojas aleatoriamente distribuidas en el plano horizontal interceptarían 63 % del total de FFF incidente. Tomando el logaritmo natural de ambos lados de la ecuación anterior: $\ln(I) = \ln(I_0) - kL$: cuando $\ln(I)$ fue graficado contra L , la inclinación de la línea recta, k , es una función de la orientación de las hojas que forman el dosel (Acock. 1991). Las plantas tales como los pastos, que tienen hojas erectas rígidas, tienen un bajo valor de k , mismo que es mayor en plantas como el algodón que tienen hojas anchas horizontales, indicando que la penetración del FFF es mayor en el follaje de un pasto que en el follaje del algodón. Acock *et al.* (1978) encontró un valor k de 0.63 para el estrato de hojas superiores en el dosel de jitomate, valor que decrece a 0.52 en el interior del dosel, lo cual indica que el área foliar fue menos eficiente en la interceptación del FFF cerca de la base del dosel.

En uno de los primeros reportes para jitomate en invernadero donde se midió la interceptación del FFF, Warren Wilson *et al.* (1992) observaron que el FFF incidente en la parte alta del dosel fue de 76.5 %, mientras que aproximadamente 20 % se perdía a través de los espacios entre las hileras. La radiación transmitida a través de lo más profundo del dosel fue reflejada por plástico blanco en el suelo, así que la superficie inferior del dosel recibió aproximadamente 13 % de la radiación incidente en la parte superior. Warren Wilson *et al.* (1992) señalaron que la pérdida considerable del FFF a través de las hileras puede reducirse cerrando los pasillos, aunque puede dificultarse el manejo de las plantas con tales espaciamientos.

Papadopoulos y Ormrod (1988) realizaron una serie de mediciones sobre la penetración del FFF como una función de la altura en el dosel de un cultivo de jitomate para diferentes espaciamientos entre hileras (23, 30, 38, 45, 53, y 60 cm) y posiciones horizontales dentro de las hileras, usando dos cultivares. Realizaron ocho muestreos a intervalos de 0.25 m iniciando desde el nivel del suelo hasta que el cultivo alcanzó una altura de 1.75 m. Se definieron siete planos verticales y el dosel de una planta testigo para muestreo, y las mediciones fueron en cielo despejado y nublado usando sensores de RFA. Los resultados mostraron que bajó la interceptación de FFF en 5 % como efecto del espaciamiento entre plantas y el cultivar. Los resultados indicaron que la proporción del FFF interceptado se incrementó con espacios cerrados, la penetración del FFF aumenta y se mejora su distribución vertical con el incremento del espaciamiento entre plantas. En la primavera, 159-162 días después de la siembra, 95% del FFF disponible sobre el dosel fue interceptado por las plantas, indistintamente de su espaciamiento.

Papadopoulos y Ormrod (1988) mencionan que el efecto del espaciamiento entre plantas se manifestó menos en la primavera que en el otoño, pero esto fue atribuido a los diferentes estados de desarrollo de los cultivos (el cultivo de otoño fue de 64-68 días al momento de la medición). Aunque los coeficientes de extinción de luz en los cultivos que persistieron no fueron reportados, las observaciones mencionadas dan soporte a lo señalado en el sentido de que el espaciamiento entre plantas y su estado de desarrollo tienen efecto en el coeficiente de extinción en el jitomate. Los autores concluyen que dando suficiente tiempo para el desarrollo del área foliar, el cultivo interceptará todo el FFF disponible independientemente del espaciamiento inicial y que el espaciamiento denso

seguramente tendrá alta intercepción de FFF en cada fase de la estación de cultivo. (Iwaki 1958).

Al examinar la colocación de las hojas y su grado de dispersión dentro de las capas del dosel, se ha concluido que entre más uniforme es la dispersión mayor es el crecimiento del cultivo, porque menos FFF penetra al suelo y el traslape de las hojas es mínimo. Watson y Witts (1959) compararon la remolacha silvestre con la remolacha azucarera y señalan que cuando el IAF fue cercano a uno, la tasa de asimilación neta de ambas remolachas es similar ocurriendo lo mismo con la eficiencia fotosintética. Sin embargo, cuando el IAF fue mayor, la TAN de la remolacha cultivada era más alta que el de la del tipo silvestre. Esta diferencia en la TAN fue atribuida al habito más rastrero de la remolacha silvestre, con hojas menos inclinadas y con mayor traslape de estas que las de la remolacha azucarera. Así, en la remolacha silvestre una proporción menor del área foliar total era expuesta a FFF altos.

La gran importancia que tiene el estudio acerca de la sobreiluminación de las hojas de la parte superior del dosel, y su influencia en la fotosíntesis neta en jitomate cultivado en invernadero, coincide con lo que se ha reportado para otros cultivos como trigo (Dhillon y Kler, 1981), soya (Miyaji, 1984), pasto (Pearce *et al.*, 1965) y haba (Crompton *et al.*, 1984). Las proporciones altas de luz saturan la fotosíntesis (con base en área foliar), lo que es típico de hojas soleadas (Ludlow .1976; Boardman. 1977; Louwerse y Zweerde. 1977; Kappel y Flore. 1983) porque éstas reciben la mayoría de la luz y están adaptadas anatómica, fisiológica y bioquímicamente para hacer un uso mejor de la misma. Sin embargo, la

contribución de las hojas más bajas en el dosel no debe subestimarse. Aunque estas se exponen a bajos niveles de radiación, también son adaptadas para hacer uso eficaz de los niveles bajos de radiación, evidenciado por los puntos bajos de compensación de luz y el aparentemente elevado rendimiento cuántico típico de las hojas sombreadas (Boardman 1977; Fails *et al.*, 1982). Aunque hay que señalar que Papadopoulos y Ormrod (1988b) encontraron puntos de compensación de luz ($50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ FFF) similares para las hojas sombreadas y expuestas al sol de un dosel del jitomate.

Estudios donde se examine el efecto del espaciamiento sobre la intercepción de la radiación directa y difusa en cultivos hortícolas en invernadero son escasos. Para un dosel de pepino de invernadero. Warren Wilson *et al.* (1992) indicaron que la intercepción fue más variable espacialmente en condiciones despejadas que en condiciones nubladas. Con cielo despejado, la sombra de las hileras N-S tendieron a desviarse hacia el oeste o el este con el azimut solar antes o después del mediodía, respectivamente. Para un dosel de pepino, Hand *et al.* (1993) reportaron que bajo nublado, conforme la distancia desde el centro de la hilera se incrementa, la transmisión aumenta de 3 % en la hilera del centro a 16 % en el centro del pasillo. Bajo cielo despejado, alrededor del medio día, cuando el sol se encontraba alineado con las hileras, los valores fueron de 2 % y 49 %, respectivamente: cuando el sol no estuvo alineado con las hileras, aproximadamente 2 h después, la transmisión se redujo a 5 % (pasillo) y 1 % (fila).

Charles-Edwards y Thorpe (1976) encontraron un incremento en la cantidad promedio de radiación absorbida por unidad de área cultivada, en un huerto de

manzana a espaciamiento cerrado, pero un descenso en la cantidad absorbida por unidad de superficie a lo largo de la hilera. A medida que se aumentó la distancia entre hileras, la radiación absorbida por unidad de superficie en el espacio de hileras se incrementó, mientras que la cantidad promedio absorbida por unidad de área cultivada del huerto decreció. También determinaron que la orientación de las hileras no afectó la proporción de la radiación difusa absorbida, pero ésta si es notablemente afectada por la variación diaria de la radiación directa absorbida. Estimaron que en una orientación este-oeste (E-W) de las hileras, las plantas absorbieron aproximadamente 13 % menos radiación directa que en una orientación norte-sur (N-S).

En un estudio de Hand *et al* (1993), aproximadamente a medio día, en el momento de la radiación solar más intensa, hubo un 80 % de disminución en la interceptación del FFF en hileras orientadas N-S. En hileras orientadas E-W se presentó una reducción de la interceptación temprano y tarde durante el día cuando el FFF fue bajo y la importancia de la radiación directa fue baja comparada con la luz difusa.

2.3.6.- Eficiencia de la energía interceptada por el dosel

El rendimiento se puede incrementar al aumentar la eficiencia fotosintética y/o la fotosíntesis del dosel, esta última como consecuencia de incrementos en el índice de área foliar, o mediante una distribución más homogénea de la luz en el dosel para mantener activas fotosintéticamente tanto las hojas superiores como las inferiores (Charles-Edwards *et al.*, 1986).

La eficiencia en el uso de la radiación (EUR; gramos de biomasa acumulada.

dividida entre el total de la radiación total interceptada) se ha probado como una variable de utilidad para cuantificar la acumulación de biomasa por los cultivos. Resultados experimentales y análisis teóricos indican que existen diferencias en la EUR entre especies (Collino *et al.*, 2005). El punto de partida para hacer una conclusión general al respecto, parte del hecho de que se han reportado valores altos de la EUR para condiciones en las cuales normalmente es alta la proporción de radiación difusa respecto a la total (como en plantas desarrolladas bajo invernadero). Distintos resultados indican que las plantas desarrolladas en invernadero o en otros espacios con proporciones elevadas de radiación difusa, son probablemente las que tienen mayor eficiencia en el uso de la radiación que las observadas a baja radiación, sobre todo directa (Sinclair *et al.*, 1991, Arkebauer *et al.*, 1994).

Según Charles-Edwards *et al.* (1986), la eficiencia con que una planta usa la energía radiante interceptada en la producción de materia seca (ϵ) puede medirse como la pendiente de regresión resultante de considerar a la cantidad de energía radiante interceptada en un intervalo de tiempo (J), como variable independiente, y a la producción bruta de materia seca obtenida en ese intervalo, como variable dependiente. La unidad de medición puede ser, por ejemplo, microgramos de materia seca por joule de energía radiante interceptada ($\mu\text{g J}^{-1}$). Si se considera todo el ciclo biológico del cultivo, la tasa neta de crecimiento se puede equiparar con el rendimiento biológico (B); es decir, con la biomasa acumulada a lo largo del ciclo de vida de las plantas consideradas. Entonces: $B = \epsilon J - T_P$; donde T_P = tasa de pérdidas (respiración, caída de hojas. fotorespiración.etc.).

La máxima eficiencia teórica con que una hoja puede usar la energía radiante en la asimilación de CO_2 es de $12 \mu\text{g} (\text{CO}_2) \text{ J}^{-1}$ (rendimiento cuántico de la hoja); sin embargo, como una mol de CO_2 (44g) produce una mol de $(\text{CH}_2\text{O})_n$ (30g), el rendimiento cuántico se reduce aproximadamente a 8 μg de materia seca por joule. Estas son estimaciones que en realidad no se dan, pero proporcionan un límite a la eficiencia con que una planta puede convertir la energía interceptada en materia.

De qué tan eficientemente usa el cultivo la radiación solar y qué tanto tiempo puede mantenerse esta eficiencia, depende el rendimiento final de materia seca del cultivo. Para correlacionar el rendimiento de materia seca con el IAF. Watson (1958) integró el IAF con el tiempo, denominándole duración del área foliar, término que toma en cuenta tanto la duración como la cantidad de tejido fotosintético del dosel. Las unidades de duración de área foliar, expresadas como tiempo son el promedio de IAF multiplicado por el tiempo de principio a fin del área foliar. Generalmente la duración del área foliar está estrechamente correlacionada con el rendimiento, porque la intercepción de la radiación solar por periodos de tiempo más prolongados implica mayor producción total de materia seca.

La intercepción eficiente de energía radiante por la superficie del cultivo necesita del desarrollo de un área foliar adecuada, uniformemente distribuida para lograr una cobertura completa del suelo. Esto se puede conseguir manipulando la densidad y distribución de plantas, así como combinando técnicas como los despuntes, las podas, el tutoraje y las imbricaciones, cuando las especies de cultivo se prestan para ello. En realidad son las mediciones de IAF y TCC de las poblaciones de plantas, las que más revelan la forma en que éstos logran

rendimientos elevados; aunque estas variables son difíciles de medir y por razones prácticas se manejan indicadores como la densidad de plantas se debe de tener claro que el objetivo con el manejo de la densidad de plantas (o de las otras prácticas) es lograr y mantener un IAF óptimo lo más pronto posible en el ciclo para lograr un máximo rendimiento (Harper *et al.*, 1979; Papadopoulos y Ormrod, 1990).

La eficiencia en la intercepción del FFF depende del genotipo de la planta y de factores ambientales. Para las especies cultivadas, el IAF óptimo con distribución uniforme de las plantas es influida por muchos factores en su intercepción del FFF (Campell y Norman, 1989) y ésta se ha logrado optimizar cambiando la densidad del cultivo. Manipular la densidad de plantas (o espaciamiento) para optimizar la intercepción del FFF es, por lo tanto, una posible estrategia para incrementar el rendimiento de jitomate y ha sido reportado en soya (Shibles y Weber, 1966), cereales (Gallagher y Biscoe, 1978) y en cultivos hortícolas (Jackson, 1980; Nogueira, 2000).

Cockshull *et al.*, (1992) desarrollaron plantas de jitomate sin sombra, sombreadas ligeramente (6.4 % de reducción de la radiación solar incidente en plantas) y muy sombreadas (23.4 % de reducción), y reportaron que los dos tratamientos con sombra redujeron el rendimiento de peso fresco total de fruta en 7.5 % y 19.9 % y la biomasa total en 6.2 % y 16.5 %, respectivamente. Durante las primeras 14 semanas de cosecha (febrero a mayo), el rendimiento era acumulado en proporción directa a la cantidad de FFF interceptada y, sin tener en cuenta el tratamiento, se cosecharon 2.01 kg de peso fresco de fruto por cada 100 MJ (aproximadamente $248 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ FFF) en el cultivo, desde el inicio de cosecha.

Después, la radiación solar neta incidente fue utilizada al parecer más eficazmente, sobre todo bajo mayor sombreado.

El efecto de la orientación de las hileras de jitomate sobre la interceptación de la FFF varía con la hora del día, estación, latitud y geometría del dosel (Jackson. 1980). Jackson y Palmer (1972) mostraron que a 34° de latitud, los sistemas compactos, en forma de setos, de hileras orientadas N-S, interceptaron más radiación en la estación de crecimiento que los orientados E-O, pero a los 51.3° latitud el hallazgo se invierte cuando se trata de sistemas de plantas con mayor altura. Concluyeron que, aunque la eficiencia relativa de un sistema compacto orientado N-S al interceptar el FFF cambia poco a través de la estación, las hileras en forma de seto orientadas E-O son ineficientes en pleno verano debido al ángulo del sol (especialmente a las latitudes más bajas), pero intercepta más la luz directa que las hileras en forma de seto orientados N-S en agosto, septiembre y octubre (especialmente a altas latitudes); Ferguson (1960) también encontró que las hileras en forma de seto orientadas E-O interceptan más FFF, a altas latitudes en septiembre, que las orientadas N-S.

La estrecha relación existente entre la acumulación de la interceptación del FFF y el IAF del follaje ha sido perfectamente establecida para muchos cultivos. Por ejemplo, Williams *et al.* (1965), quienes al cultivar maíz a densidades de población en un rango de 0.7 a 70 plantas m⁻², obtuvieron un record de producción de biomasa (52 g m⁻² día⁻¹) con la densidad de población más alta.

Shibles y Weber (1966) descubrieron que las altas densidades dan como resultado un incremento del IAF y una reducción en el número de días de la emergencia a 95

% de la intercepción de la radiación solar. Los espaciamientos extensos dan como resultado menos intercepción en todos los estados de su desarrollo para una intercepción máxima. El índice de área foliar requerido para lograr 95 % de la FFF interceptada es llamado IAF crítico.

Brougham (1960) comparó el comportamiento de diversos cultivos establecidos en el mismo lugar y descubrió una correlación significativa entre la velocidad de producción de biomasa y el IAF crítico. Encontró que las plantas que cuentan con más superficie de hojas para la intercepción del FFF aceleran su crecimiento, indicando que un follaje más eficiente permite mas penetración de la FFF debajo de las hojas de la parte superior y que compartir el FFF disponible entre muchas hojas es un prerrequisito de una alta productividad total. Esto no es sorprendente, porque a niveles normales de CO₂ las hojas individuales de la mayoría de las plantas C₃ alcanzan una velocidad de asimilación máxima a aproximadamente un cuarto del total de la radiación solar disponible durante el verano en una zona templada (Blackman, 1961); y algunas de esas hojas absorben efectivamente 80- 90 % del FFF incidente sobre ellas.

Para los pimientos de invernadero, Verheij y Verwer (1971) encontraron que la intercepción del FFF aumentaba rápidamente con el tiempo y que a densidades mayores más rápido se alcanzaba la máxima intercepción del FFF. Con una densidad de 17.6 plantas m⁻² el cultivo alcanzó la máxima intercepción del FFF a 6 semanas después del trasplante, mientras que a las densidades de 8.8 y 4.4 plantas m⁻² tomó 8 y 12 semanas respectivamente. La penetración más profunda del FFF en los doseles de mayor espaciamiento estuvo ligada a la distribución más

uniforme en los doseles cerrados, como lo observado por Papadopoulos y Ormrod (1988), lo cual es de importancia considerable, tal y como varias investigaciones lo han establecido, pues hay una correlación positiva entre la uniformidad de la distribución del FFF (y su grado de penetración) en el dosel y la eficiencia de conversión del FFF a fotosintatos.

Loomis y Williams (1969) mostraron que la fotosíntesis máxima del dosel se presenta cuando la inclinación de las hojas, con respecto al cenit cambia gradualmente de 0° en la capa superior a 90° en la capa más baja del dosel. Basados en la curva de respuesta de la tasa de fotosíntesis ante el FFF, predijeron un alto (y por lo tanto más eficiente) uso del mismo cuando proporcionalmente más hojas son iluminadas a niveles moderados de FFF que en un dosel donde la mitad de las hojas están muy iluminadas y la otra mitad muy sombreada. Se hicieron predicciones similares antes por Verhagen *et al.* (1963), quienes observaron que el "follaje ideal" consiste en capas con cambios continuos de inclinación, de modo que el FFF disponible se distribuya uniformemente sobre el área foliar disponible. Con respecto a la arquitectura y productividad del dosel. Loomis *et al.* (1967) llegaron a las siguientes dos conclusiones:

1. En un ambiente de baja insolación, o con baja elevación del sol, se obtendrá eficiencia alta con ángulos de la hoja bajos (cerca del horizontal) y con bajo IAF;
2. Con alta insolación y elevación solar alta, se lograrán mayores eficiencias con alto IAF y el ángulo de la hoja más alto, particularmente en los estratos superiores del dosel.

2.3.7.- Tasa de pérdida de materia seca

La materia seca formada por las plantas puede perderse por causas fisiológicas como la respiración, la fototranspiración o exudados de la raíz o bien por causas no fisiológicas como daño mecánico, sombra, sequia, salinidad, altas o bajas temperaturas, plagas o enfermedades (Charles-Edwards *et al.*, 1986).

Las pérdidas de materia seca por respiración son necesarias para el metabolismo de las plantas y generalmente no se consideran como negativas para el rendimiento, al menos que este proceso ocurra con tasas más altas en relación a la materia seca producida por la fotosíntesis. Tanto la producción de biomasa como el rendimiento agronómico de un cultivo, dependerán de la intensidad y duración con que actúen los agentes causales de la pérdida de materia seca (Salisbury y Ross, 1994).

2.4.- Duración del crecimiento

La duración del crecimiento es el intervalo existente entre la emergencia y el término de la cosecha de un cultivo. A medida que sea mayor este intervalo, más energía luminosa podrá interceptar al dosel y si los otros determinantes del rendimiento se mantienen constantes, más materia seca se podrán acumular y, por consiguiente, su rendimiento agronómico será mayor. La duración del periodo vegetativo deberá ser lo suficientemente larga para que el cultivo desarrolle un dosel lo suficientemente grande para proveer de suficientes fotoasimilados a las demandas reproductivas que se desarrollarán posteriormente. Entre más dure el periodo desde la iniciación de la inflorescencia hasta la antesis, potencialmente se

podrán iniciar y establecer más flores, y entre más dure el periodo de antesis a madurez de los frutos o semillas es de esperar que sea mayor su peso y tamaño, dado que hay translocación de asimilados por un mayor periodo de tiempo, y el rendimiento agronómico será mayor. Se debe tomar en cuenta además, que también influye sobre el rendimiento las tasas de fotosíntesis y de crecimiento de fruto o de grano (Charles-Edwards *et al.*, 1986).

2.4.1.- Efecto de la incidencia de la radiación solar sobre la acumulación de biomasa

La influencia de la radiación solar sobre el desarrollo y rendimiento del jitomate puede atribuirse a sus efectos sobre la asimilación fotosintética del CO₂, un proceso clave para la producción de biomasa. Varios estudios (Peat, 1970; Acock *et al.*, 1978; Papadopoulos, 1985; Jones *et al.*, 1999; Longuenesse *et al.*, 1993) en jitomate revelan que la tasa neta de fotosíntesis de las hojas (la mayor parte de la fotosíntesis sin la tasa de respiración no asociada con el proceso fotosintético) se incrementa de una forma lineal, en proporción al incremento en el FFF por arriba de cierto nivel dependiendo del historial de la hoja en cuanto al nivel de luz acumulado (Acock *et al.*, 1978). Esto es limitado por la tasa de producción de trifosfato de adenosina (ATP) y Nicotina-amin dinucleótido fosfato reducido (NADPH) en la reacción luminosa para la regeneración de Ribulosa Bifosfato (Gijzen. 1995).

El efecto del FFF sobre la tasa de fotosíntesis neta disminuye incrementando el FFF hasta que se alcanza la saturación cuando la actividad de la Rubisco se convierte en el factor limitante. Cockshull (1988) reporta que en jitomate bajo invernadero la tasa neta de fotosíntesis se acerca a un valor máximo en

radiaciones por arriba de los $100\text{-}150\text{ W m}^{-2}$ (aproximadamente $465\text{ - }700\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ seg}^{-1}$).

De ese modo, podría esperarse que la tasa de fotosíntesis neta del dosel en jitomate aumente con el incremento del FFF, sobre el rango completo de FFF encontrado en invernaderos (Cockshull, 1988). Por ejemplo en jitomate, pepino y pimiento cultivado en invernadero. Nederhoff (1994) encontró que no había saturación de la fotosíntesis del dosel cuando el FFF se incrementó por arriba de $700\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ S}^{-1}$. Gijzen (1995) reportó que para doseles cerrados, la fotosíntesis no se alcanza a saturar por arriba de $2000\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ S}^{-1}$. Hand *et al.* (1993) observaron que la tasa fotosintética de un dosel de berenjena se aproxima a la saturación a $900\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ de FFF. En uno de los primeros estudios en que se midió directamente la tasa fotosintética neta del dosel. Harper *et al.* (1979) sugirieron que la saturación por luz del jitomate en invernadero (considerando todo el dosel) no es probable y cualquier descenso en el FFF reducirá la fotosíntesis total. Observaron que en condiciones de poca luz en invierno en Georgia, Estados Unidos de América, que implica una pérdida de 50 % de la luz solar disponible, podría ser suficiente para causar abscisión floral debido a la escasa fotosíntesis.

Heuvelink *et al.* (1996) midieron la tasa fotosintética neta en un dosel de plantas de jitomate (en un sistema semi-cerrado) en el verano en Wageningen (lat. 52°N) en dos compartimentos iluminados (un área de 4.8 m por 5.1 m) a 20°C , con concentraciones de CO_2 de 340, 500 y $900\text{ }\mu\text{mol mol}$, sobre un rango de densidades de flujo de fotones fotosintéticos (FFF de $0\text{-}1400\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$) y para diferente índices de área foliar (IAF. $1.5\text{ - }3\text{ m}^2\text{ m}^{-2}$). Los compartimentos facilitaron

combinaciones de alto FFF y alta concentración de CO₂ a temperaturas normales, independientemente del FFF, la tasa fotosintética total del cultivo (TFTC) se incrementó en 17 % cuando la concentración de CO₂ se incrementó de 500 a 900 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Aun con una FFF incidente de 1400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, la TFTC no se saturó completamente de luz. Independientemente de la concentración de CO₂ y del IAF, la fotosíntesis bruta del dosel se incrementó de 5 a 7 % cuando la FFF se incrementó de 1200 a 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y a 1400 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ la fotosíntesis bruta del dosel fue entre 8 y 13 % más baja que su tasa máxima.

Acock *et al.* (1978) reportan que el estrato superior del dosel del jitomate (23 % del total del área foliar) asimila un desproporcionado 66 % del CO₂ neto fijado por el dosel. Una reducción en el IAF de 8.6 a 5.2 después de eliminar las hojas inferiores, tuvo poco efecto sobre la tasa de fotosíntesis del dosel y la tasa de respiración. No obstante, la reducción del IAF a 2.0, con la remoción de las hojas del estrato medio, redujo la tasa de fotosíntesis del dosel cerca de 30 % y la tasa de la respiración oscura cerca de 25 %.

El efecto de la variación del espaciamiento entre plantas sobre la fotosíntesis neta, frecuentemente se ha estudiado en términos de las interrelaciones entre la exposición de la hoja y con la tasa de fotosíntesis neta, así como en términos de la habilidad de las hojas para adaptarse fotosintéticamente a un nuevo ambiente de déficit de luz, como ocurre en el interior de un dosel denso. Rodríguez y Lambeth (1975) encontraron que el espaciamiento de jitomate en invernadero en un ciclo de primavera, fue la principal determinante de la tasa de fotosíntesis, siendo ésta mayor para el espaciamiento entre plantas a 51 cm x 41 cm. Sugirieron que el

efecto del espaciamiento entre plantas podría ser visto en términos de exposición a la luz, en el sentido de que con amplios espaciamientos hay menor competencia por luz. También observaron incrementos significativos en la tasa de fotosíntesis aparente con la adición de 184 y 368 W m⁻² de luz suplementaria. Determinaron que, en comparación con la luz natural, en el momento de iluminación máxima en un día nublado se duplicó la eficiencia fotosintética (número de moléculas de CO₂ fijadas divididas entre el número total de fotones cruzando la unidad de área foliar por unidad de tiempo) y fue mayor que el lado más iluminado. Indicando la importancia de las hojas más expuestas en la parte superior del dosel.

Papadopoulos y Ormrod (1988b) investigaron el efecto de cuatro espaciamientos equidistantes (23, 30, 38 y 45 cm) sobre la fotosíntesis neta de plantas de jitomate establecidas en invernadero a cuatro hileras. Reportaron un efecto significativo sobre la fotosíntesis neta de hojas inferiores (área foliar basal), la cual disminuye a espaciamiento limitado. A 23 cm de espacio la fotosíntesis neta de la parte baja fue 56 µg CO₂ m⁻² S⁻¹, mientras que en la parte superior fue de 80 µg CO₂ m⁻² s⁻¹, a 45 cm de espaciamiento los valores correspondientes fueron de 75 y 80 µg CO₂ m⁻² s⁻¹ respectivamente. La fotosíntesis neta en las partes superiores de las plantas fue más alta que en las partes bajas.

El efecto de la densidad de plantas sobre la calidad del espectro de radiación bajo el dosel fue examinado por Papadopoulos y Ormrod (1988) en jitomate en invernadero plantado a cuatro hileras. La calidad de la radiación transmitida por el dosel fue afectada por la densidad de plantas y las relaciones de azul: rojo lejano, rojo; rojo lejano y azul: rojo disminuyeron a medida que aumentó la densidad de

plantas de 2.5 a 11.3 plantas m^{-2} . Papadopoulos y Ormrod (1991) reportaron que la altura de la planta y longitud del entrenudo aumentan significativamente con sucesivas disminuciones en el espaciamiento entre plantas. Por ejemplo, a 23 cm de espaciamiento, la altura de planta en las hileras fue de 138.6 cm, mientras a 60 cm de espaciamiento fue de 93.8 cm; al mismo espaciamiento la longitud de los entrenudos de las plantas en las hileras fue de 7.9 y 5.2, respectivamente. Hubo una tendencia de las plantas a ser más altas en el interior que en el exterior al estar plantadas a cuatro hileras. Atribuyeron este comportamiento a las respuestas fotomorfogénicas provocadas por la disminución en las relaciones rojo: rojo lejano y azul: rojo lejano al disminuir el espaciamiento entre plantas. Los cambios en la tasa de elongación provocados por la disminución de la relación rojo: rojo lejano son benéficos para una planta sola pero en un dosel que crece rápidamente, una pequeña diferencia en altura podría resultar en una gran diferencia en la captura del FFF (Ballaré *et al.*, 1995).

2.4.2.- Efecto del espaciamiento entre plantas en el desarrollo de las plantas de jitomate

La iniciación floral es un signo fácilmente identificable y junto con el desarrollo de la flor se ha usado extensivamente en la caracterización de los efectos de varios factores medioambientales en el desarrollo del jitomate (Wittwer, 1963; Calvert, 1964). Se ha mostrado que, una vez que el crecimiento reproductivo se ha establecido, evidenciado por la iniciación y desarrollo de flores, un suministro adecuado de fotosintatos asegurará proporciones altas de amarre de fruto y llevan al desarrollo abundante de fruto (Rodríguez y Lambeth. 1975; Picken, 1984).

El equilibrio entre crecimiento vegetativo y reproductivo es muy frágil en jitomate. Por consiguiente, se requiere un suministro continuo de fotosintatos para la producción continua de fruto (Rodríguez y Lambeth. 1976).

Papadopoulos y Pararajasingham (1997) mencionan que se han encontrado indicios de que el sombreamiento en espacios cerrados puede tener un efecto perjudicial en el amarre de fruto, debido a un suministro inadecuado de fotosintatos. Por ejemplo. Zahara y Timm (1973) en un estudio de 4 años en jitomate, encontraron que el número de frutos amarrados por planta, el número de flores, el número de hojas y el diámetro de tallo, disminuyeron en la medida en que la densidad de población se fue incrementando por arriba de 96.3 plantas m⁻². Ferry y Janick (1970), también trabajando con jitomates, encontraron que el número de entrenudos, el número de racimos y el número de flores por planta, así como el porcentaje de frutos amarrados, disminuyeron significativamente conforme las densidades de planta aumentaban. También se han reportado aumentos similares en el total de flores por planta y porcentaje de fruto amarrado, a los espacios más amplios en jitomate bajo invernadero (Rodríguez y Lambeth. 1975).

2.4.3.- Efecto del espaciamiento entre plantas sobre la distribución de la biomasa y el rendimiento del cultivo

La producción eficiente de biomasa de un cultivo depende de la habilidad de cada planta para hacer un uso máximo de los recursos en el limitado espacio en el que crece, pero interfiriendo lo menos posible con sus vecinas; es decir, cada planta debe hacer una demanda mínima de recursos por unidad de biomasa producida, pero la población como un todo debe presionar sobre el total de recursos

disponibles a un grado máximo, para que así se alcance la máxima producción. El logro de ésta no reside en la agresividad de la planta individual sino de la población en una alta densidad de plantas, en la que los individuos son resistentes a la competencia y hacen un uso eficiente de su ambiente en el reducido espacio del que disponen para crecer (Donald. 1968). No existe una relación cuantitativa concreta entre la reducción de la luz y la reducción de la producción, ya que esta relación depende de la intensidad de radiación incidente y de la fase de desarrollo del cultivo (Challa y Schapendonk. 1984).

Un bajo FFF puede propiciar el incremento de yemas florales al priorizarse la iniciación de la inflorescencia, lo cual puede retrasar la antesis, cuando ésta ocurre después de que la inflorescencia es visible lo que puede causar el aborto de algunos o todos los botones florales. Este efecto está asociado particularmente con la baja intensidad luminosa y día largo (Picken *et al.*, 1985).

Las plantas que, viviendo en población, pueden dar el mayor rendimiento por unidad de superficie en un ambiente no restrictivo, son aquellas que por sus características morfológicas y anatómicas sufren la menor interferencia de sus vecinas, y que por su alta eficiencia fisiológica explotan al máximo el ambiente favorable que les rodea y optimizan la partición de asimilados hacia el grano o fruto (alto IC). Este arquetipo de planta en condiciones de baja densidad, tendera a subutilizar los recursos disponibles y rendirá menos por unidad de superficie que plantas con alta habilidad competitiva individual, pero maximizará su utilización en altas densidades con un mayor rendimiento económico (Donald y Hamblin, 1983; Sedgley, 1991).

Major *et al.* (1992) señalan que una importante característica del arquetipo, independientemente del ambiente, es que haga una mínima demanda sobre los recursos por unidad de peso seco producido, lo cual implica que sea altamente compatible con sus vecinos. Así, se ha planteado por varios autores (Donald y Hamblin, 1983; Sedgley, 1991; Adams y Kelly, 1992) que una vía potencial para incrementar el rendimiento de un cultivo dado, en ambientes no restrictivos (manejado en hidroponía e invernadero), es el aumento en la densidad de población, a fin de lograr el rápido establecimiento de un IAF óptimo para la intercepción de energía radiante. Es posible concebir un arquetipo básico general para alta productividad, semejante para varias especies de cultivo, el cual incluye un conjunto de características, entre las que destacan: tallo grueso, poca altura, hojas pequeñas y eficientes fotosintéticamente, habito determinado con un solo tallo y sin ramas, y estructuras reproductivas numerosas y de gran tamaño, con alta capacidad demandante (Sánchez *et al.*, 1999).

En la mayoría de las especies cultivadas la incorporación de características deseables para la conformación de un arquetipo resulta laboriosa y puede ser tardada cuando se tiene que recurrir al mejoramiento genético. Se debe conjuntar el germoplasma que presente las características consideradas para un ambiente dado; mediante métodos de selección, cruzamientos o retrocruzamientos habrá de incorporar esas características a materiales élite, los que después se tienen que reproducir masivamente, evitando que las mencionadas características se vayan perdiendo en las nuevas generaciones (Sánchez *et al.*, 1999).

Dos determinantes importantes de alta productividad en una especie de cultivo bajo invernadero son: su habilidad de producir niveles elevados de asimilados en el proceso fotosintético y su capacidad para distribuir eficientemente una alta proporción de estos hacia los órganos económicamente importantes. Cuando el suministro de asimilados aumenta, la tasa de crecimiento de los órganos de demanda o almacenamiento de los asimilados también puede aumentar. A largo plazo, el número de los órganos de demanda también puede aumentar, debido a un aumento en las tasas de inicio y/o disminución en las tasas de aborto. A veces ocurre retroalimentación como resultado de una reducción de tasa fotosintética; sin embargo, en jitomate en invernadero no se ha encontrado correlación entre demanda de almacenamiento y fotosíntesis (Marcelis y de Koning, 1995).

Heuvelink y Buischool (1995) diseñaron un experimento para determinar si la retroalimentación (inhibición de producto final) de la fotosíntesis es un factor en la producción de jitomate en invernadero. La proporción fuente-demanda se manipuló con la poda de fruto y de racimos, así como por poda de racimos en plantas a dos tallos. La relación fuente-demanda no influyó en la producción de biomasa, pero sí la distribución de la biomasa entre los frutos y las partes vegetativas. El área específica de la hoja y la longitud del entrenudo disminuyeron y el área foliar aumentó cuando la proporción de la relación fuente-demanda se redujo. El índice de área foliar estaba más alto en la relación fuente demanda baja en todos los experimentos. El desarrollo de la planta, medido por número de hojas al final del experimento, no fue influenciado por la proporción de la fuente-demanda. Aunque la tasa fotosintética no fue medida directamente, la eficacia en el uso de la luz no mostró diferencia significativa entre los diferentes tratamientos. Los autores

concluyeron que el efecto de la demanda en la producción de la biomasa por la unidad de radiación interceptada puede ignorarse, excepto quizás en casos extremos, como la remoción de todos los frutos.

El control de la distribución del carbono en plantas ha sido revisado por Wardlaw (1990), quien propuso que la ruta del transporte pudiera afectar la distribución de la materia seca, pero estos efectos disminuyen rápidamente cuando la demanda se incrementa. Heuvelink (1995a) concluyó que en jitomate la distancia entre la fuente y la demanda sólo es de importancia limitada y se asume que conjuntamente tienen un asimilado en común, para la distribución de la biomasa entre la fuente y la demanda.

El FFF no tiene mayor impacto en la distribución de la biomasa en jitomate (Cockshull *et al.*, 1992; Heuvelink, 1995b. Marcelis y de Koning, 1995), pero si en los totales de asimilados disponibles para su distribución a través de la fotosíntesis en el cultivo. Por consiguiente, en la producción comercial la proporción fuente/demanda puede ser manipulada controlando la carga de fruto potencial total por el área de suelo, a través de la variación en fotosíntesis potencial por variación del FFF interceptado por las plantas.

Mcavoy *et al.* (1989) cultivaron plantas de jitomate despuntadas a un racimo, proporcionando luz suplementaria (mayor intensidad y mas duración) durante el periodo de antesis inicial hasta el amarre del fruto (15 días), que es cuando se presenta el cierre del dosel. Observaron que se incrementó significativamente el número de frutos producidos, sin presentarse influencia sobre el peso del fruto; en cambio, cuando se adicionó luz artificial en etapa de crecimiento rápido del fruto

(30 días) se incrementó el peso del fruto, lo que atribuyeron a un aumento en la capacidad de la fuente y no a las diferencias en la fuerza de la demanda.

El número de nuevos frutos desarrollados que crecen en una planta dependen de la proporción fuente/demanda, de la proporción entre la suma de fuerzas de la demanda de todos los órganos y la tasa fotosintética (Marcelis y de Koning, 1995). En el experimento reportado por Cockshull *et al.* (1992), donde se examinaron efectos de la sombra en rendimiento de frutos de jitomate, el número de frutos por racimo tuvo correlación positiva con la radiación solar recibida, lo que fue más evidente cuando hubo menos de 1.5 MJ m^{-2} por día, en el momento de la primera antesis de un racimo. El número de frutos fue similar en todos los tratamientos, pero en la primera etapa la temporada, hubo menos flores abiertas y menos frutos comerciales en el tratamiento con sombra, cuando fue alta la relación fuente-demanda, hubo disponibilidad suficiente de asimilados que estaba disponible para los frutos jóvenes que iniciaban su crecimiento; sin embargo, con el incremento en el peso de los frutos y/o disminución del FFF, la relación fuente/demanda disminuyó, ocasionando el aborto de frutos jóvenes. No se afectó la duración de desarrollo de fruto por sombreamiento; sin embargo, Heuvelink (1995b) sugirió que un momento en la fuerza de la fuente, debida a la variación del espaciamiento entre plantas, podría aumentar el número de frutos que crecen al mismo tiempo en las plantas.

El tamaño potencial del fruto de jitomate es dependiente de su posición dentro de un racimo y del cultivar (Ho, 1996), pero realmente el tamaño logrado depende de la cantidad de asimilados producidos por el follaje y el número de frutos que

compiten por éstos. La acumulación de asimilados producidos por el follaje es regulado por la fotosíntesis, misma que es dependiente en la cantidad de la radiación solar y del promedio de la concentración de CO₂ por día. El número de frutos que compiten por los asimilados se relaciona con el número de frutos por racimo, el número de racimos por planta, el número de plantas por metro cuadrado, y la duración de desarrollo del fruto, aunque la habilidad competitiva de los frutos, evaluada por su tasa de crecimiento, variará durante su desarrollo. Como más de 90 % del peso fresco del fruto es agua, la disponibilidad de agua para crecimiento de fruto puede influir en su tamaño (Ehret y Ho, 1986; Ho *et al.*, 1987).

Según Cockshull *et al.* (1992), la sombra aumentó la proporción de fruto de tamaño pequeño, incluso en las primeras semanas de producción. El número de frutos por racimo y la duración de desarrollo del fruto no son afectados por sombra, y en cualquier periodo, el número de frutos disponibles para recibir asimilados se ve afectado por aborto de flor y/o fruto. Como el porcentaje de distribución de los asimilados disponibles hacia el fruto no fue muy reducida por la sombra, Cockshull *et al.* (1992) concluyeron que se produjeron más frutos pequeños porque el suministro de asimilados se redujo proporcionalmente más que el número de frutos.

La producción total de materia seca y su distribución entre los distintos órganos de la planta de jitomate puede diferir según las condiciones ambientales de cultivo; por ejemplo, una planta de crecimiento determinado crecido en California, sin defoliar acumuló 445 g de materia seca, con un índice de cosecha de 55 % (Hewitt y Marrush. 1986). Ammerlaan *et al.* (1986) han reportado considerables reservas de almidón en plantas de jitomate, que podrían apoyar el crecimiento de fruto por uno

o dos días en ausencia de fotosíntesis. Pearce *et al.* (1993) encontraron que el crecimiento de fruto se puede sostener por lo menos 20 h después de que las plantas estén en oscuridad continua. Encontraron además que esa proporción de crecimiento de fruto sólo disminuyó cuando la radiación total diaria estuvo por debajo de $6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ de radiación.

Papadopoulos y Pararajasingham (1997) señalan que se pueden obtener altos rendimientos de jitomate en invernadero usando espaciamientos reducidos (alta densidad de plantación), comparado con espaciamientos amplios. El incremento del rendimiento en espacios reducidos, puede ser resultado de la elevada biomasa generada por el efecto del incremento de la intercepción de la FFF y de la fotosíntesis del dosel. Estos incrementos en el rendimiento y la biomasa del cultivo están asociados con el incremento de la tasa de amarre de fruto; así, la elevada biomasa del cultivo está asociada con alto IAF y con incrementos de la intercepción de la FFF. Alta intercepción de FFF no sólo estimula el crecimiento del cultivo, sino que también incrementa el total de asimilados para su distribución en los frutos.

La revisión de la literatura revela que el tamaño de fruto y el rendimiento de jitomate se ven influenciados fuertemente por el FFF interceptado, actuando en el suministro de los asimilados de la hoja. Las condiciones que favorecen la alta tasa de fotosíntesis por unidad de área de suelo (por ejemplo espacio cerrado) se correlacionan positivamente con rendimiento de fruto (peso por unidad de área), pero no con su tamaño. Dado que la distribución de los asimilados no es afectada por la intercepción del FFF, los frutos pequeños producidos en espaciamiento estrecho, son debidos probablemente a insuficiente cantidad de asimilados

disponible para su distribución a los frutos.

III.- EVALUACIÓN AGRONÓMICA Y FISIOTÉCNICA DE SEIS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE JITOMATE EN HIDROPONÍA BAJO INVERNADERO

3.1.- RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue comparar fisiotécnica y agronómicamente, seis sistemas de producción de jitomate en hidroponía utilizando un híbrido de crecimiento indeterminado (Charleston). Las plantas fueron conducidas a un solo tallo y despuntadas dos hojas por encima del tercer racimo. El experimento se llevó a cabo en condiciones de invernadero. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones, que comprendió seis sistemas de producción (dosel en forma de escalera formado por cuatro hileras de plantas de la misma edad ubicadas a distinta altura; tres sistemas de dosel en forma de escalera formada con ciclos de cultivo imbricados; dosel uniforme formado por cuatro hileras de plantas y dosel uniforme formado por tres hileras de plantas), todos ellos basados en plantas despuntadas a tres racimos. Las variables evaluadas a los 30, 60, 90 y 120 días después de la siembra fueron: área foliar, peso seco por planta, altura de planta, grosor del tallo, rendimiento y número de frutos por planta y por unidad de superficie y peso medio de frutos. El sistema de producción con dosel en forma de escalera de plantas a distinta altura, presentó el rendimiento de fruto más alto (16.48 kg/m^2) en un periodo de trasplante a fin de cosecha de sólo cuatro meses, así como el mayor peso medio del fruto (165 g).

PALABRAS CLAVE: *Lycopersicon esculentum*, densidad, despunte, dosel, rendimiento

3.2. - ABSTRACT

The objective of this study was to compare physio-technical and agriculturally six production systems of tomato in hydroponics using a hybrid (Charleston) of undetermined growth. Plants were taken to a single stem and blunted two leaves above the third cluster. The experiment was conducted under greenhouse conditions. A randomized complete block design with four replications was used, which comprised six production systems (ladder-shaped canopy formed by four rows of plants of the same age placed at different heights; three systems of ladder-shaped canopy formed with overlapping crop cycles; uniform canopy formed by four rows of plants and uniform canopy formed by three rows of plants), all of them based on blunted plants at three clusters. The variables evaluated a 30, 60, 90, and 120 d after sowing were: leaf area, dry weight per plant, plant height, stem thickness, performance and number of fruits per plant and per area unit and average weight of fruits. The production system with ladder-shaped canopy of plants at different heights, presented the highest fruit yield (16.48 kg/m²) over a period of transplant to harvest of only four months, as well as the highest average weight of fruit (165g).

KEY WORDS: *Lycopersicon esculentum*, density, blunted, canopy, yield

3.3.- INTRODUCCIÓN

El tomate o jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) es un cultivo ampliamente distribuido alrededor del mundo y ocupa el segundo lugar en importancia mundial, solamente superado por la papa (FAOSTAT, 2007); sin embargo, desde el punto de vista económico es considerada la hortaliza más importante en el mundo (Nuez *et al.*, 2004). A nivel nacional es el cultivo hortícola más importante por cubrir la mayor superficie (70,000 a 80,000 ha cada año), con una producción de alrededor de 2.5 millones de toneladas en 2005; y su consumo *per cápita* es de 18 kg, gracias a la cual México ha desarrollado la industria hortifrutícola, tanto para abastecer al mercado interno como para exportar a los Estados Unidos (Macías, 2003).

Sin embargo, la producción de tomate a campo abierto se hace cada vez más difícil, debido a condiciones ambientales adversas y a la incidencia de plagas y enfermedades que afectan la productividad de este cultivo. Ante lo expuesto, se han impulsado en las últimas dos décadas tecnologías de producción en sistemas protegidos como son los invernaderos y casas sombras, obteniéndose así un mejor resultado en rendimientos, calidad y rentabilidad (Ruiz y Aquino, 1996).

Actualmente el método de cultivo en jitomate que convencionalmente se practica en hidroponía bajo invernadero en el mundo, principalmente en el norte de Europa y los Estados Unidos de América, consiste en el uso de variedades de fruto redondo y hábito de crecimiento indeterminado sembradas en suelo o sustrato hidropónico a densidades que oscilan entre dos y tres plantas por metro cuadrado, dejándolas crecer para cosechar más de 20 racimos por planta y completar su ciclo

en casi un año. En este sistema el rendimiento obtenido fluctúa entre 200 y 400 t ha⁻¹ año⁻¹ (Resh, 2001).

Por lo largo del ciclo se pueden mencionar que con este sistema hay una producción relativamente baja de biomasa por año, debido principalmente a que el IAF óptimo para una máxima interceptación de radiación fotosintéticamente activa (RFA) por el dosel tarda mucho tiempo en establecerse y, con frecuencia, ese IAF óptimo se sobrepasa al continuar el crecimiento de las plantas, ocasionando que la competencia por la RFA las llegue a afectar en forma negativa (Sánchez *et al.*, 1999).

Con el fin de definir un sistema de producción de jitomate más fácil y de menor costo para las condiciones de los productores de México, desde 1986 se ha estado trabajando una línea de investigación que ha derivado en un paquete tecnológico capaz de otorgar, al menos tres ciclos de cultivo por año superando en rendimiento anual y bajando los costos de producción respecto a los sistemas convencionales (Méndez y Sánchez, 2005., Vázquez *et al.*, 2007). Estos sistemas de cultivo consisten en despuntar las planta a uno, dos y tres racimos, la principal ventaja de estos sistemas de despunte temprano y altas densidades es la obtención de cosechas muy concentradas (menos de un mes contra más de cuatro meses en los sistemas convencionales) y por lo tanto, se pueden programar para las ventanas en donde estadísticamente se obtienen los precios más altos del año en el mercado, logrando mejor precio de venta y niveles más altos de rentabilidad económica (Sánchez, 2001).

Aun con el éxito obtenido estos sistemas presentan limitaciones por la distribución heterogénea de radiación fotosintéticamente activa (RFA) en el dosel, ya que las plantas, aunque se han despuntado para dejar tres racimos en cada una de ellas se siembran en altas densidad de población en camas de aproximadamente 1.2 m de ancho, generalmente con dirección Norte-Sur y dispuestas en cuatro hileras de plantas, quedando 50 % de estas con competencia completa por luz (hileras centrales) y 50 % con menos competencia (hileras exteriores), ya que se ven favorecidas por el espacio de los pasillos que se dejan entre cada cama. A ese respecto se ha observado que en experiencias comerciales y comprobadas en trabajos experimentales (Jarvis, 1998; Vázquez y Sánchez, 2007), que las plantas de las hileras centrales interceptan menor RFA y rinden menos que las hileras exteriores.

Por lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo comparar diferentes sistemas de producción de plantas de jitomate en hidroponía bajo invernadero basadas en el manejo de plantaciones con distintas distribuciones de plantas en espacio y tiempo para lograr doseles que incrementen la eficiencia de captación de la radiación fotosintéticamente activa incidente y con ello la productividad anual por unidad de superficie.

La hipótesis es que al lograr una distribución más equitativa de radiación solar entre todas las hojas de un dosel se puede obtener una mayor producción de materia seca por día y eventualmente un mayor rendimiento por unidad de superficie y tiempo.

3.4.- MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó del 13 de mayo al 12 de diciembre del 2006, en condiciones de invernadero e hidroponía. La fase de semillero se estableció en un invernadero de cristal y la de producción en un invernadero con estructura metálica y cubierta de polietileno, ambos ubicados en la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México a 19° 29' de latitud norte, 98° 53' de longitud oeste y una altitud de 2251 msnm. Como material vegetal se utilizó el híbrido comercial de jitomate "Charleston" de hábito indeterminado y fruto tipo bola.

La fase de semillero duró 30, 45 y 50 días después de la siembra (dds), según el tratamiento. La siembra de la semilla se hizo en macetas de 750 ml, las cuales se rellenaron con tezontle cernido de granulometría ≤ 3 mm de diámetro el cual se humedeció hasta punto de escurrimiento y luego se depositó una semilla por maceta. En los primeros 8 días después de la emergencia se aplicaron cuatro riegos por día sin fertilizante y una vez que aparecieron las primeras hojas verdaderas se aplicaron dos riegos por día con una solución nutritiva compuesta por las siguientes concentraciones de nutrimentos minerales en mg Litro⁻¹: N=250, P=50, K=250, Ca=280, Mg=50, Fe=2, Mn=0.5, B=0.5, Cu= 0.1 y Zn=0.1, como la sugieren Sánchez *et al.* (1991). En la conducción del semillero se utilizó un sistema de enfriamiento con panel evaporativo para mantener una temperatura entre 25 y 30 °C y humedad relativa entre 65 a 85 % durante el día.

La fase de producción se desarrolló en un invernadero con cubierta de polietileno y piso con cubierta de tela blanca permeable de polipropileno (ground cover). Como sustrato se utilizó arena de tezontle rojo con partículas de 3 a 5 mm de diámetro;

los contenedores fueron bolsas de polietileno de color negro con capacidad de 10 litros. En el sistema de riego se utilizaron goteros con gasto de 4 Litros h^{-1} con cuatro derivaciones, una por maceta, dando un gasto final individual de 1 Litro h^{-1} , con cuatro riegos de 15 minutos usando la solución antes mencionada.

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y seis tratamientos que se describen a continuación:

Tratamiento 1: Dosel uniforme dispuesto en tres hileras (testigo) (Figura 3). Consistió de una unidad experimental de 27 plantas con orientación de norte-sur; el espacio entre plantas fue de 21.7 cm y 40 cm entre hileras, resultando también una densidad de 10 por plantas m^{-2} útil (7 plantas m^{-2} de invernadero) despuntadas a tres racimos para obtener ciclos de cuatro meses para cosechar 21 racimos por m^{-2} de invernadero por ciclo (63 racimos por m^{-2} de invernadero por año). Las plántulas se trasplantaron a los 30 dds.

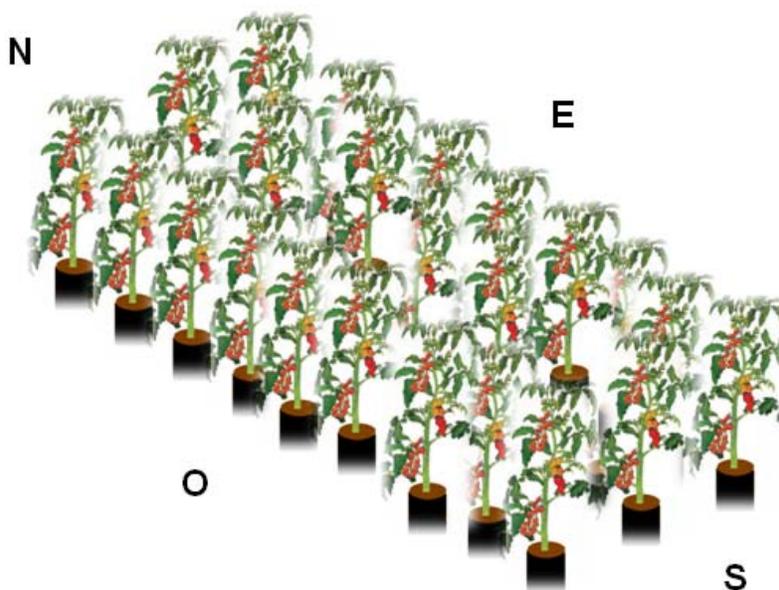


Figura 3. Dosel uniforme dispuesto en tres hileras

Tratamiento 2: Dosel uniforme dispuesto en cuatro hileras (testigo) (Figura 4). Consistió en unidades experimentales de 28 plantas con una orientación norte-sur, con un espacio entre plantas de 30 cm y 30 cm entre hileras, resultando una densidad de diez plantas por m^2 útil (7 plantas m^2 de invernadero) despuntadas a tres racimos por planta para obtener ciclos de cuatro meses y buscando cosechar 21 racimos por m^2 de invernadero por ciclo (63 racimos por m^2 de invernadero por año). En este caso las plántulas se trasplantaron a los 30 días después de la siembra (dds).

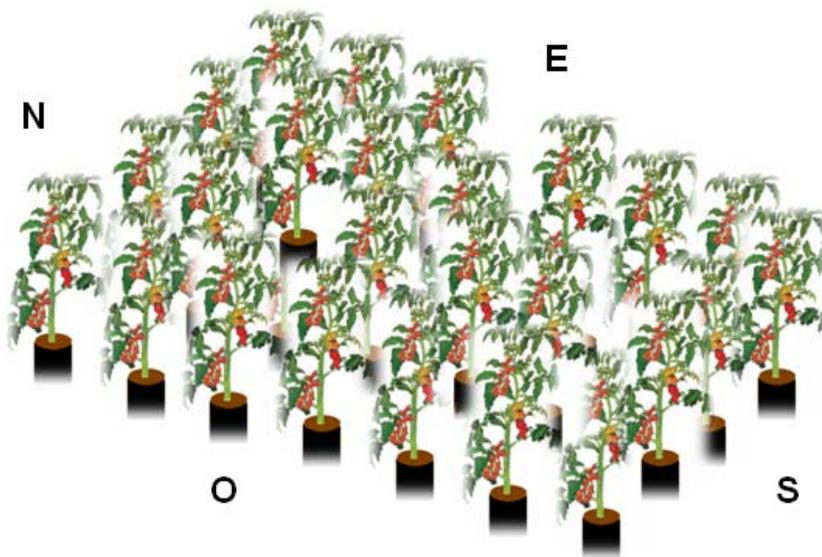


Figura 4. Dosel uniforme dispuesto en cuatro hileras

Tratamiento 3: Dosel escaleriforme (Figura 5). Consistió en colocar plantas de la misma edad y despuntadas a tres racimos en cuatro hileras a diferente altura mediante el uso de un armazón metálico de forma escalonada. La distancia entre plantas fue de 30 cm y 30 cm entre hileras; la diferencia de altura entre hileras de plantas contiguas fue de 30 cm. La orientación de las hileras fue con dirección este-oeste, resultando una densidad de siete plantas por m^2 de invernadero. La hilera

más alta quedo en el lado norte, los ciclos fueron de cuatro meses para obtener 21 racimos por m² de invernadero por año. El trasplante se realizó con plántulas de 30 días de edad por lo que potencialmente se puede lograr tres ciclos de cultivo al año.

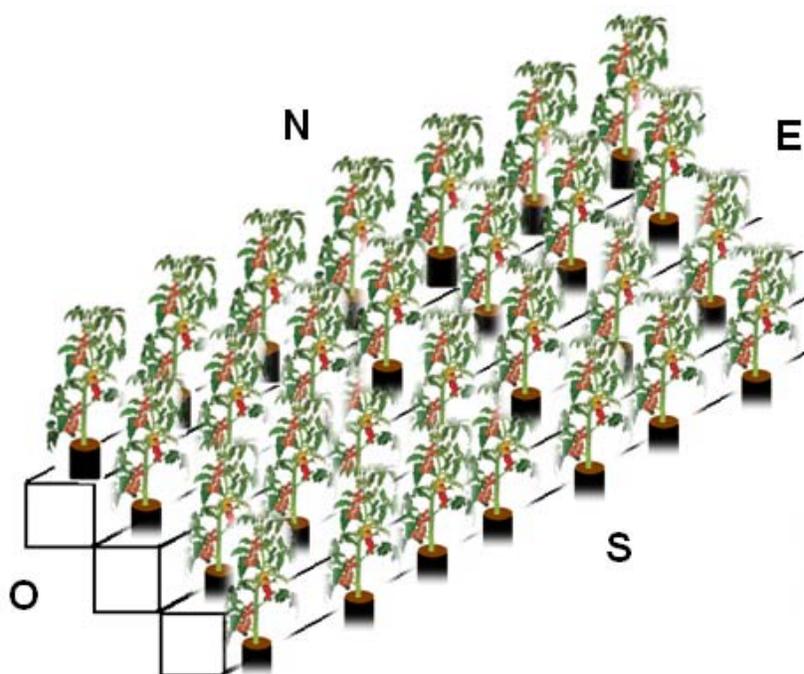


Figura 5. Dosel escaleriforme en dirección este-oeste conformado en cuatro hileras de plantas de jitomate despuntadas a tres racimos en bolsas colocadas a diferente altura.

Tratamiento 4: Sistema de imbricación de dos hileras por ciclo en orientación norte-sur con plantas despuntadas a tres racimos (Figura 6): consistió en un trasplante inicial de dos hileras con plántulas de 50 dds; la distancia entre hileras fue de 30 cm y entre planta de 16.6 cm. Cuando las plantas cumplieron 100 dds, se procedió a trasplantar otras dos hileras de plántulas de 50 dds a los costados de las primeras a la misma distancia entre plantas e hileras, formando así un dosel en forma de doble escalera con plantas de distinta edad. Posteriormente cuando las

plantas centrales cumplieron 150 dds y terminó su cosecha de tres racimos por planta, fueron eliminadas y las plantas de las hileras de los costados (que ya tenía 100 días de edad) se recorrieron al centro, y se colocaron nuevamente dos hileras de plántulas de 50 dds en los costados. El procedimiento se repitió cada 50 días hasta el final del experimento. Esto resulto en una densidad de 9 plantas por m^2 útil (6.5 plantas por metro cuadrado de invernadero) por cada ciclo de dos hileras de plantas lo que permite potencialmente siete ciclos por año y siendo la producción de forma continua (189 racimos m^{-2} $año^{-2}$) siempre y cuando sea de manera continua; las plantas también se despuntaron al tercer racimo.

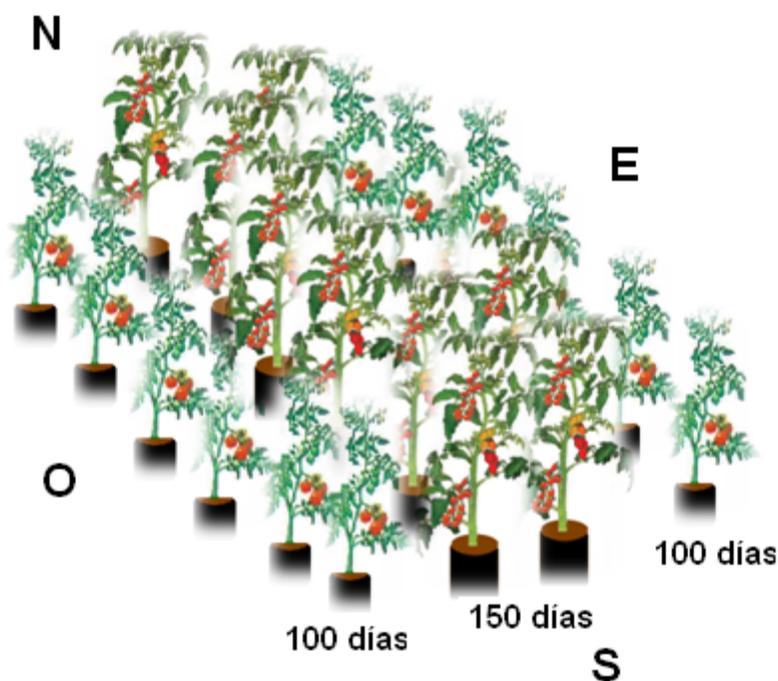


Figura 6. Sistema de imbricación de doble hilera en el tiempo con dirección norte-sur

Tratamiento 5: Sistema de imbricación (cuatro hileras con orientación este-oeste) de plantas en el tiempo, para producción continua, basada en el trasplante de plántulas de 50 días de edad cada 25 días (Figura 7): consistió en un trasplante inicial de una hilera con plántulas de 50 días de edad; cuando las plantas de la primera hilera cumplieron 75 días de edad, se procedió a trasplantar una segunda hilera con plántulas de 50 días de edad al lado sur de la primera, posteriormente cuando la primera hilera cumplió 100 días de edad la segunda hilera cumplió 75 días y la tercera hilera se formó con plántulas de 50 días de edad al lado sur de la segunda. Una vez que la primera hilera llegó a los 125 días, la segunda hilera cumplió 100 días de edad, la tercera hilera 75 días de edad, la cuarta inició con plántulas de 50 días de edad al lado sur de la tercera, completando las cuatro hileras del sistema de imbricación con un arreglo escaleriforme del dosel . Una vez que la primera hilera cumplió los 150 días (fin de ciclo) se excluyeron y se procedió a recorrer las hileras iniciando un trasplante con plántulas de 50 días de edad al lado sur de las demás para mantener siempre cuatro hileras con plantas de diferentes edades, la distancia entre hileras fue de 30 cm y entre plantas de 16.6 cm., resultando una densidad de cuatro plantas por metro cuadrado de invernadero con este sistema se tiene el potencial de alcanzar 14 ciclos al año (un ciclo por hilera de planta).

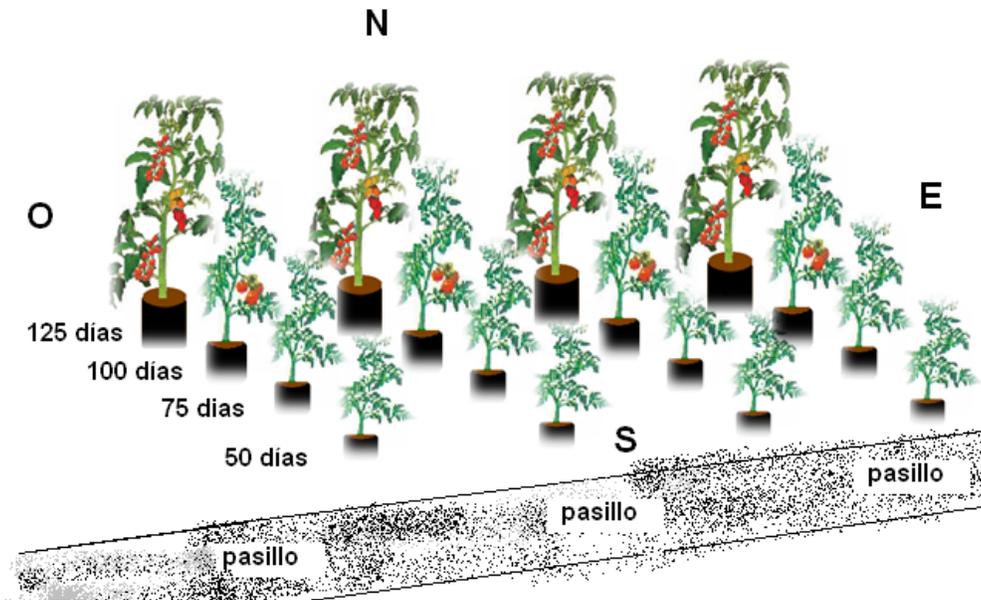


Figura 7. Sistema de imbricación de plantas con orientación este-oeste

Tratamiento 6: Sistema de imbricación (tres hileras de plantas en dirección este-oeste) de plantas en el tiempo para producción continua con despuntes para dejar tres racimos por planta, basada en el trasplante de plántulas de 45 días de edad cada 35 días (Figura 8): consistió en un trasplante inicial de una hilera con plántulas de 45 días de edad; cuando la primera hilera cumplió 80 días (45 + 35 días) se inició una segunda hilera con plántulas de 45 días de edad colocadas al lado sur de la primera hilera, cuando la primera hilera cumplió 115 días y la segunda 80, se inició una tercera hilera al sur de la segunda con plántulas de 45 días de edad, cuando la primera hilera cumplió 150 días (fin de ciclo) se procedió a eliminarlas y a colocar otra hilera al sur de la última sembrada y así, mantener siempre tres hileras de plantas con diferentes edades, y un dosel en forma de escalera (escaleriforme) la distancia entre hileras fue de 33 cm y entre plantas de 16.6 cm, para dar una densidad de 4 plantas por metro cuadrado de invernadero.

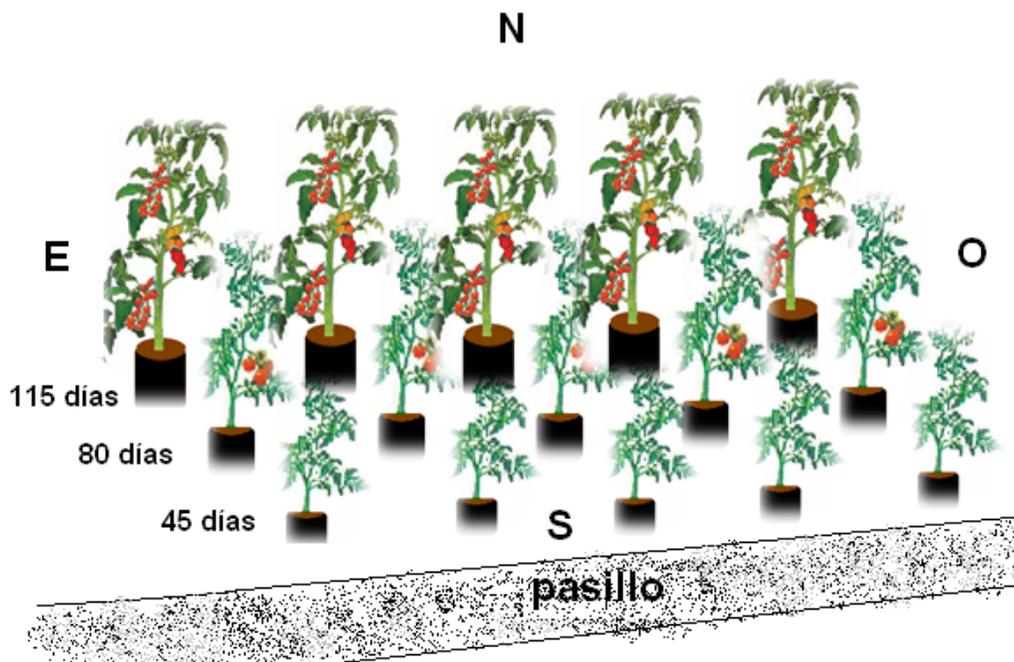


Figura 8. Sistema de imbricación de plantas con orientación este-oeste

El genotipo utilizado fue Charleston; es un tomate híbrido, la planta es de vigor medio con gran potencial de rendimiento; peso promedio de 210-220 gramos, de larga vida de anaquel, este genotipo tiene una amplia adaptación a distintas zonas de producción y es ideal para cultivo en invernaderos y tiene tolerancia a enfermedades V F1 F2 FCR TMV C 1-5. (**)

Como parte del experimento se realizó un análisis funcional del crecimiento, para lo cual se obtuvo el peso seco de distintos órganos (tallo, hoja, fruto), al secar en una estufa a 70 °C durante 48 horas, con ellos se calculó el peso seco total de la planta, la tasa de acumulación neta y la tasa de crecimiento del cultivo, y se midió la altura de la planta y grosor del tallo a los 30, 60, 90 y 120 días después de la siembra (dds). Se muestrearon dos plantas por tratamiento y repetición (8 plantas en total), cada planta se seccionó en tallo, hoja individual, frutos por racimos y el

grosor del tallo se midió 5 cm debajo de la última hoja, para la toma de altura se iniciaba en la marca del cotiledón hasta el extremo del despunte.

Al final del ciclo se midieron las siguientes variables:

Peso individual de cada racimo por planta

Número de frutos por planta.

Peso medio de los frutos.

Rendimiento por m^{-2} útil por ciclo.

Número de frutos por m^{-2} útil por ciclo.

Rendimiento potencial al año por m^{-2} .

En cada muestreo, se tomaron dos plantas de cada tratamiento y repetición.

Los datos obtenidos fueron sometidos a una prueba de análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) utilizando para su análisis, el programa computacional SAS (SAS, 1990).

(**) www.ahernseeds.com

3.5.- Resultados y discusión

En el Cuadro 3 se puede observar que no hubo diferencias significativas para ninguna de las variables estudiadas en el muestreo realizado a los 60 dds (días dds después de la siembra), donde se evaluó, área foliar por planta (AFP), peso seco total por planta (PSP), altura de la planta (AP) y grosor del tallo (GT). Estos resultados son esperados pues las plantas a los 60 dds aún no tenían una competencia importante con sus vecinas en ninguno de los sistemas estudiados.

CUADRO 3. Comparación de medias para algunas variables morfológicas en plantas de jitomate a los 60 días después de la siembra.

Tratamiento (T)	Área foliar por planta (cm ²)	Peso seco por planta (gr)	Altura de planta (cm)	Grosor de tallo (mm)
T1. (3 hileras)	2651 a ^z	36.7 a	74 a	11.8 a
T2. 4 (hileras)	2699 a	36.5 a	75 a	11.7 a
T3. (Escaleriforme)	3096 a	41.1 a	64 a	11.9 a
T4. (Imbricación (50 días))	2885 a	40.1 a	75 a	12.8 a
T5. (Imbricación (50-25 días))	2755 a	35.9 a	64 a	11.9 a
T6 . (Imbricación (45-35 días))	3015 a	40.3 a	73 a	12.4 a
DMS	1310	18.3	12.63	1.74

^zMedias con la misma letra, dentro de cada columna, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey con una $P \leq 0.05$; DMS: Diferencia mínima significativa; dds: días después de la siembra.

En el Cuadro 4 se muestra la comparación de medias (Tukey $P \leq 0.05$) donde se evaluaron las mismas variables a los 90 días después de la siembra. Se presentaron diferencias estadísticas en peso seco por planta (PSP) y altura de planta (AP); en la variable PSP se puede observar que los sistemas conformados en tres y cuatro hileras y el sistema escaleriforme obtuvieron los valores más altos y de esta manera se diferenciaron estadísticamente de los sistemas de imbricación; la diferencia en PSP se puede deber a la edad de la plántula al momento del trasplante, las plantas de los sistemas de producción del primer grupo sólo crecieron 30 días en macetas de 750 ml sin competencia por espacio y luz antes del trasplante, en cambio las plántulas de los sistemas de imbricación estuvieron hasta 50 días en las mismas macetas antes del trasplante, lo que ocasionó cierta competencia por RFA, lo que coincide con lo mencionado por Gardner *et al.* (1995), que una distribución más equitativa de la radiación solar entre las hojas del dosel, permite mayor producción de materia seca por día y eventualmente un mayor rendimiento por unidad de superficie y tiempo.

En AP la menor altura comprendió a los sistemas que hasta ese momento tenían menor competencia o mejor distribución de luz, estos fueron el sistema escaleriforme y de imbricación 50-25 días, y visualmente fueron plantas más compactas.

CUADRO 4.- Comparación de medias para algunas variables morfológicas en plantas de jitomate a los 90 días después de la siembra.

Tratamiento (T)	Área foliar por planta (cm ²)	Peso seco por planta (gr)	Altura de planta (cm)	Grosor de tallo (mm)
T1. (3 hileras)	7538 a ²	177.1 a	109 a b	16.2 a
T2. 4 (hileras)	7854a	183.3 a	116 a	15.9 a
T3. (Escaleriforme)	7851 a	169.2 a	102 b c	17.1 a
T4. (Imbricación (50 días))	7160 a	134.2 b	116 a	17.3 a
T5. (Imbricación (50-25 días))	6537 a	150.8 a b	97 c	17.7 a
T6 . (Imbricación (45-35 días))	7460 a	164.5 ab	103 b c	16.7 a
DMS	1733.5	34.0	12	2.1 a

²Medias con la misma letra, dentro de cada columna, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey con una $P \leq 0.05$; DMS: Diferencia mínima significativa; dds: días después de la siembra.

(Cuadro 5). En el tercer muestreo se encontraron diferencias estadísticas en las variables de área foliar (AF), peso seco por planta (PSP) y altura de planta (AP). En la primera variable el valor más alto correspondió al sistema escaleriforme y al sistema de imbricación 50-25 días, y en PSP sólo al sistema escaleriforme y al sistema uniforme de tres hileras. En la variable AP los valores más bajos correspondieron al sistema escaleriforme y sistemas de imbricación 50-25 días y 45-35 días, al ser de menor tamaño las plantas visualmente fueron más compactas esto por la disposición en la que se encontraban distribuidas.

Al estar las plantas en acomodo escaleriforme la captación de luz fue más homogénea que en el resto de los tratamientos y así resultó más eficiente la importación de fotoasimilados de las hojas maduras hacia el resto de los órganos

demandantes (yemas terminales o apicales en crecimiento, meristemas, flores y frutos en crecimiento), el crecimiento resulta de la importación de fotoasimilados de las hojas y que la fuerza demandante se expresa como la habilidad de un órgano en particular para acumular fotoasimilados y está determinado por su tamaño y actividad (Wolf y Rudich, 1988).

CUADRO 5.- Comparación de medias para algunas variables morfológicas en plantas de jitomate a los 120 días después de la siembra.

Tratamiento (T)	Área foliar por planta (cm ²)	Peso seco por planta (gr)	Altura de planta (cm)	Grosor de tallo (mm)
T1. (3 hileras)	7220 a b ^z	299.6 a	109. a b	16.1 a
T2. 4 (hileras)	7490 a b	290.6 a b	118 a b	16.2 a
T3. (Escaleriforme)	8179 a	305.4 a	104 b	17.7 a
T4. (Imbricación (50 días))	6415 b	259.2 b	119 a	17.3 a
T5. (Imbricación (50-25 días))	8305 a	271.9 a b	107 a b	19.1 a
T6 . (Imbricación (45-35 días))	8031 a b	276.3 a b	111 a b	18.5 a
DMS	1735	34.74 a	13	4.3

^zMedias con la misma letra, dentro de cada columna, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey con una $P \leq 0.05$; DMS: Diferencia mínima significativa; dds: días después de la siembra.

En el cuadro 6 se observa que las plantas en el sistema escaleriforme se logró el mayor rendimiento en la variable de peso de tres racimos por planta a comparación del resto de los sistemas, la ventaja de este sistema al resto se debió a que las plantas se colocaron en una estructura metálica en forma de escalera con el fin de que las plantas recibieran luz difusa de forma más homogénea en todo el dosel y con esto aumentar el rendimiento, siguiendo lo citado por Charles-Edwards *et al.*

(1986) y Gardner *et al.* (1995), quienes mencionan que el rendimiento se puede aumentar incrementando la eficiencia fotosintética y/o la fotosíntesis del dosel, esto último como consecuencia de incrementar hasta cierto punto el índice de área foliar, de aumentar la duración de la fotosíntesis o de lograr una distribución más homogénea de la luz en el dosel.

En la variable de número de frutos por planta, estadísticamente no hubo diferencia significativa lo que indica que esta variable no influyó en el rendimiento por planta, en cambio la variable del peso medio del fruto y la densidad de plantas (7 plantas m^{-2} invernadero) si influyeron en el rendimiento por m^{-2} de invernadero, en el cual el sistema escaleriforme obtuvo el valor más alto en comparación al resto de los sistemas. En los sistemas de imbricación se observa que el rendimiento por unidad de superficie fue menor en los tratamientos 5 y 6 respecto al tratamiento 4, debido a que en este último caso, la imbricación contempla dos hileras de plantas y en los otros dos casos solo una hilera por planta.

En la variable número de frutos por m^2 de invernadero el tratamiento de tres y cuatro hileras uniformes y el sistema escaleriforme fueron estadísticamente iguales, consecuencia del igual número de plantas por unidad de superficie (siete plantas m^{-2} invernadero). Los sistemas de imbricación tuvieron menos frutos por metro cuadrado de invernadero por tener menos plantas por unidad de área en cada ciclo, pero visualizando el rendimiento potencial al año, los sistemas de imbricación superan al sistema escaleriforme y a los sistemas uniforme de tres y cuatro hileras debido a que se obtienen más ciclos por año (tres ciclos en el tratamiento T3

escaleriforme, contra 5.5, 11 y 8 ciclos en los tratamientos de imbricación T4, T5 y T6, respectivamente).

CUADRO 6.- Comparación de medias de rendimiento y sus componentes en diferentes sistemas de producción en jitomate.

Tratamiento (T)	PTRP	NFP	PMF	RM ⁻² I	NFM ⁻² I	RPAM ⁻²
3 hileras	2.48 b ^z	17.31 a	149.12 b	17.37 b	121.18 a	52.12 c
4 hileras	2.46 b	17.41 a	142.76 b	17.21 b	121.88 a	51.62 c
Escaleriforme	274 a	16.53 a	165.60 a	19.15 a	115.71 a	57.45 b
Imbricación (50 días)	2.20 c	16.97 a	134.59 b	14.51 c	101.86 b	79.81 a
Imbricación (50-25 días)	1.89 e	18.58 a	106.92 c	7.55 d	74.33 b	83.05 a
Imbricación (45-35 días)	2.05 d	18.05 a	108.75 c	7.69 d	67.68 b	61.52 b
DMS	1.22	2.20	16.29	0.72	9.37	4.96

^zMedias con la misma letra, dentro de cada columna, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey con una $P \leq 0.05$; PTRP: Peso de tres racimos por planta (Kg), NFP: Número de frutos por planta, PMF: Peso medio de fruto(g), RM⁻² I: Rendimiento por m² de invernadero, NFM⁻²I: Número de frutos por m² de invernadero, RPAM⁻²: Rendimiento potencial al año por metro cuadrado, DMS: Diferencia mínima significativa.

Dentro de cada uno de los sistemas de tres, cuatro hileras y el sistema escaleriforme, se analizó el rendimiento por hilera de plantas, comparando la producción de las hileras centrales contra hileras de los costados. En el Cuadro 5 se puede observar como las hileras centrales fueron estadísticamente diferentes a las hileras de los costados en los sistemas de tres y cuatro hileras. En este caso las plantas de las hileras exteriores, las que colindan con los pasillos, quedan bien iluminadas, en tanto que las hileras interiores, por tener competencia completa

intercepta menos radiación, ya que sólo las hojas superiores no están sombreadas. La consecuencia como lo señalan Jarvis (1998) y Ucan *et al* (2005), es una disminución del rendimiento por planta en dichas hileras interiores.

En cuanto al sistema escaleriforme (donde la hilera 1 fue la de abajo y la 4 de más arriba) el rendimiento por hileras fue homogéneo, esto debido a la disposición en que se pusieron las plantas, respaldando lo mencionado por Gardner *et al* (1995) y Charles-Edwards *et al.* (1986), que mencionan que si la distribución solar es más equitativamente entre todas las hojas del dosel, se podría lograr mayor producción de materia seca por día y, por lo tanto, mayor rendimiento por unidad de superficie y tiempo.

CUADRO 7. Comparación de medias de rendimiento entre hileras en diferentes sistemas de producción de jitomate.

	Uniforme, tres hileras	Uniforme, cuatro hileras	Escaleriforme, cuatro hileras
Hilera 1	2667 a ²	2720 a	2703 a
Hilera 2	2239 c	2273 b	2670 a
Hilera 3	2539 b	2175 b	2757 a
Hilera 4		2666 a	2812 a
DMS	92.88	105.83	151.91

²Medias con la misma letra, dentro de cada columna, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey con una $P \leq 0.05$; DMS: Diferencia mínima significativa.

En el Cuadro 8 se observa que el peso del racimo uno fue superior a los racimos dos y tres, lo cual se debe a la competencia entre racimos por los fotoasimilados disponibles en la planta, ya que el racimo uno tiene ventaja favorable sobre los demás debido a que inicialmente crece sin la competencia de los otros, lo que le da mayores posibilidades de alcanzar un mayor tamaño y peso; y al haber un mayor índice de área foliar, como efecto de sombreado mutuo, se producen menos

fotoasimilados por planta lo que puede conducir a un menor diámetro y peso de fruto. Por otro lado, los frutos inducidos más tempranos compiten más favorablemente por fotoasimilados que los que se forman posteriormente (Hernández y Vázquez, 2006).

CUADRO 8. Comparación de medias de rendimiento entre racimos por planta en diferentes sistemas de producción en jitomate.

	3 hileras	4 hileras	Escaleriforme
Racimo 1	1024 a ^z	948 a	1042 a
Racimo 2	763 b	804 b	886 b
Racimo 3	695 c	707 c	808 c
DMS	67	78	43

^zMedias con la misma letra, dentro de cada columna, son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey con una $P \leq 0.05$; DMS: Diferencia mínima significativa.

3.6.- Conclusiones

El arreglo de plantas de la misma edad en cuatro hileras orientadas en dirección este-oeste con despunte a tres racimos para formar un dosel escalonado con una densidad de 7 plantas/m² de invernadero produjo un mayor rendimiento por unidad de superficie por ciclo que el resto de los tratamientos

Los sistemas de imbricación (ciclos de dos hileras de plantas cada 50 días y de una hilera de plantas cada 25 días) pueden dar por resultado un mayor rendimiento anual, debido a que se pueden obtener siete y catorce ciclos de cultivo al año respectivamente.

La disposición de plantas en tres hileras formando un dosel uniforme no mostró diferencias estadísticas en rendimiento con respecto al sistema uniforme en cuatro hileras sugiriendo que no se mejoró la distribución de radiación solar respecto al sistema de cuatro hileras, lo que si se logró con el sistema de dosel escaleriforme con plantas de la misma edad colocadas a diferente altura.

IV. - LITERATURA CITADA

ACOCK, B. 1991. Modelling canopy photosynthetic response to carbon dioxide, light interception, temperature and leaf traits. pp. 41-51. *In: Modelling Crop Photosynthesis-from Biochemistry to Canopy*. Boote K. 1., and R. S. Loomis (eds). Crop Science Society of America, Inc. Madison. Wisconsin, USA.

ACOCK, B.; CHARLES-EDWARDS, D. A.; FINER, D. J.; HAND, D. W.; LUDWIG, J.; WARREN-WILSON, J.; WITHERS, A. C. 1978. The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: an experimental of two canopy models. 1. *Exp. Bot.* 29: 815-827.

ADAMS, M. W.; KELLY, J. D. 1992. The role of architecture, crop physiology and recurrent selection in ideotype breeding for yield in dry beans. *Crop and Soil Sciences Department*. Michigan State University. Mich .. USA. 224 p.

AMMERLAAN, A. W. S.; JOOSTEN, M. H. A.; GRANGE, R. I. 1986. The starch content of tomato leaves grown under glass. *Sci. Hortic.* 29: 1-9.

ARKEBAUER, T. L.; WEISS, A.; SINCLAIR, T. R.; BLUM, A. 1994. *In: defense of radiation use efficiency: a response to Demetriades-Shah et al. (1992)*. *Agricultural and Forest Meteorology* 68: 221-227.

BAILLIE, M.; BAILLE, A.; TCHAMITCHIAN, M. 1990. A simple model for the estimation of greenhouse transmissivity: influence of estructures and internal equipment. *Acta Hortic.* 281: 35-46.

- BALLARE, C. L.; SCOPEL, A. L.; SÁNCHEZ, R. A. 1995. Plant photomorphogenesis in canopies, crop growth and yield. *HortScience* 30: 1172-1181.
- BEADLE, C. I. 1988. Análisis del crecimiento vegetal. pp. 17-20 *In: Técnicas en Fotosíntesis y Bioproductividad*. Coombs. L D. O. Hall. S. P. Long., y J. M. Scurlock (eds). Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- BERNABE, A.; A.; SOLÍS, V. 1999. Evaluación del rendimiento, calidad, precosidad y vida de anaquel de 21 genotipos de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en invernadero en Chapingo. Tesis de Licenciatura. Departamento de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 85 p.
- BJORKMAN, O. 1981. Responses to different quantum flux densities. pp. 57-107. *In: Physiological plant ecology*. Langer. I. O. L.. P. S. Nobel. C. B. Osmond, and H Ziegler. (eds.). *Encyc. Plant Physiol.: New Series*. v 12A. Springer-Verlag, New York. USA.
- BLACKMAN, G. E. 1961. The limit of plant productivity. Annual Report. East Malling Research Station. pp: 39-50.
- BOARDMAN, N. K. 1977. Comparative photosynthesis of sun and shade plants. *Annual Review of Plant Physiology* 28: 355-377.
- BROUGHAN, R. W. 1960. The relationship between the critical leaf area total chlorophyll content and maximum growth-rate of some pasture and crop plants. *Ann. Bot.* 24: 463-474.

- BRUGGINK, G. T.; HEUVELINK, E. 1987. Influence of light on the growth of young tomato, cucumber and sweet pepper plants in the greenhouse: effects on relative growth rate, net assimilation rate and leaf area ratio. *Sci. Hortic.* 31: 161-174.
- CALVERT, A. 1964. Growth and flowering on the tomato in relation to natural light conditions. *J. Hortic. Sci.* 39: 182-193.
- CAMPBELL, G. S. 1981. Fundamentals of radiation and temperature relations. pp. 11-40. *In: Physiological Plant Ecology.* Lange, O. L. S., Nobel, C. B. Osmond, and H. Ziegler (eds.). Springer-Verlag. New York, USA.
- CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. 1989. The description and measurement of plant canopy structure. pp. 1-19. *In: Plant Canopies: Their Growth, Form and Function* G. Russell. B. Marshall and P. G. Jarvis (eds.). Cambridge University Press. Cambridge. UK. England.
- CANCINO, B. J.; SÁNCHEZ DEL C. F.; ESPINOZA, R. P. 1990. Efecto del despunte y densidad de población en dos variedades de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en hidroponía bajo invernadero. *Revista Chapingo* 73-74: 26-30.
- CHALLA, H.; HEUVELINK, E. 1993. Economic evaluation of crop photosynthesis. *Acta Hortic.* 328: 219-228.
- CHALLA, H.; SHAPENDONK, A. H. C. M. 1984. Quantification of effects on light reduction in greenhouse on yield. *Acta Hortic.* 148: 501-510.

- CHARLES-EDWARDS, D. A.; DOLEY, D.; RIMMINGTON, G. M. 1986. Modelling plant growth and development. Academic Press. Sydney. Australia. 235 p.
- CHARLES-EDWARDS, D. A.; THORPE, J. H. M. 1976. Interception of diffuse and direct-beam radiation by a hedgerow apple orchard. *Ann. Bot.* 40: 603-613.
- COCKSHULL, K. E. 1988. The integration of plant physiology with physical changes in the greenhouse climate. *Acta Hortic.* 229: 113-123.
- COCKSHULL, K. E.; GRAVES, C. J.; CAVE, C. R. J. 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. 1. *Hortic. Sci.* 67: 11-24.
- COLLINO, D.J.; J. L. DARDANELLI; M. J. 2005. Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Aust. J. Exp. Agric.* 45: 383-390.
- CONTRERAS, M. E. 2007. Efecto del ambiente de crecimiento de plántulas de jitomate sobre el número de flores y producción de fruto. Tesis de Doctorado. Colección de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, Estado de México . 120 p.
- CROMPTON, H. J.; HILL-COTTINGHAM, D. G.; HUDD, G. A.; LLOYD-LONES, C. P. 1984. Effect of plant density on the uptake and distribution of ¹⁴C in the field bean, *Vicia faba*. *Plant Physiology* 60: 543-546.
- DHILLON, G. S.; KLER, D. S. 1981. Relation of shape of canopy to interception of radiation and yield of wheat. 1. *Agric. Sci.* 97: 135-142.
- DONALD, C. M. 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica* 17: 385-403

- DONALD, C. M.; HAMBLIN, L. 1983. The convergent evolution of annual seed crops in agriculture. *Advances in Agronomy* 36: 97-143.
- EHRET, D. I.; HO, L. C. 1986. The effects of salinity on dry matter partitioning and fruit growth in tomatoes grown in nutrient film culture. 1. *Hortie. Sci.* 61: 361-367
- ESPINOSA, Z. C. 2004. Memorias del IV Simposium Nacional de Horticultura. Invernaderos: Diseños. Manejo y Producción Torreón, Coahuila, México. pp 19-43
- FAILS, B. S.; LEWIS, A. J.; BARDEN, J. A. 1982. Net photosynthesis and transpiration of sun and shade grown *Ficus benjamina* leaves. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 107: 758761.
- FAO., (FAOSTAT, 2004) Estadísticas de Agricultura. www.fao.org/faostat.
- FAOSTAT., (2007) Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. [http://faostat.fao.org/De sk topDef aul t . asp? PageID = 339 & lang = es](http://faostat.fao.org/De%20sk%20topDef%20aul%20t%20.aspx?PageID=339&lang=es)
- FERGUSON, J. H. A. 1960. A comparison of two planting system in orchards as regards the amount of radiation intercepted by the trees. *Neth. J Agric. Sci.* 8: 271-280.
- FERRY, R. L.; JANICK, J. 1970. Response of the tomato population pressure. *J. Am. Soc. Hortie. Sci.* 91: 47-60.

- FISHER, K. J. 1977. Competition effects between fruit trusses of the tomato plant. *Sci. Hortic.* 7: 37-42.
- GALLAGHER, J. N.; BISCOE, P. V. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. 1. *Agric. Sci.* 91: 47-60.
- GARDNER, P.F.; PEARCE, R.B.; MITCHEL, R.L. 1995. *Physiology of Crop Plants.* Iowa State University Press. Iowa, EUA. 327 p.
- GIJZEN, H. 1995. CO₂ uptake by the crop. Pp. 16-35. *In: Greenhouse Climate Control-An Integrated Approach.* Bakker. j. c.. G. P. A. Boot, H. Challa. and N. J. van de Braak (eds.). Wageningen Pers. Netherlands.
- HAND, D. W.; WARREN, W. J.; HANNAH, M. A. 1993. Light interception by a row crop and glasshouse peppers. *J. Hortie. Sci.* 68: 695-703.
- HARPER, L. A.; PALLAS, J. E.; BRUCE, R. R.; JONES, J. B. 1979. Greenhouse microclimate for tomatoes in the southeast. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 104(5): 659-663
- HERNANDEZ, H.; VÁZQUEZ, R. R. 2006. Calidad de fruto de ocho híbridos comerciales de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) tipo saladette hábito indeterminado. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Fitotecnia. Chapingo, México. 43 p.
- HEUVELINK, E. 1995a. Growth, development and yield of a tomato crop: periodic destructive measurements in a greenhouse. *Sci. Hortic.* 61: 77-99.

- HEUVELINK, E. 1995b. Effect of plant density on biomass allocation to the fruits in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill). *Sci. Hort.* 64: 193-201.
- HEUVELINK, E.; BUISKOOL, R. P. M. 1995. Influence of sink-source interaction on dry matter production in tomato. *Ann. Bot.* 75: 38] -389.
- HEUVELINK, E.; DAMEN, T. H. J.; DE RUTTER, J. R. 1996. Influence of irradiance. CO₂ concentration and leaf area index on tomato crop photosynthesis. *J. Exp. Bot.* (Submitted).
- HEWITT, J. D.; MARRUSH, M. 1986. Remobilization of nonstructural carbohydrates from vegetative tissues to fruits in tomato. *J. Am. Soc. Hortie. Sci.* 111(1): 142-145.
- HO, L. C. 1996. Tomato. pp. 709-728. *In: Photoassimilate Distribution in Plants and Crops.* Zamski. E .. and A. A. Schaffer (eds.). Source-Sink Relationships- Marcel Dekker. Inc. New York. USA.
- HO. L. C.; GRANGE, R. I. 1987. An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit. *Plant Cell Environment* 10: 57-162
- HO, L. C.; HEWITT, J. D. 1986. Fruit development. pp. 201-239. *In: The Tomato Crop.* Atherton. J. G .. and J. Rudich. (eds.). Chapman and Hall. New York, USA.
- HURD, R. G.; GAY, A. P.; MOUNTIFIELD, A. C. 1979. The effect of partial flower removal on the relation between root, shoot and fruit growth in the indeterminate tomato. *Ann. Appl. Biol.* 93: 77-89.

- IWAKI, H. 1958. The influence of density on the dry matter production of *Fagopyrum esculentum*. Jpn. J. Bot. 16: 210-226.
- JACKSON, J. E. 1980. Light interception and utilization by orchard systems. Hortic. Rev. 2: 208-267.
- JACKSON, J. E.; PALMER, J. W. 1972. Interception of light by model hedgerow orchards in relation to latitude, time of year and hedgerow configuration and orientation. 1. Appl. Ecol. 9: 341-357.
- JARVIS, R. W. 1998. Control de enfermedades en cultivos de invernadero. Mundi-Prensa. Madrid, España. 334 p.
- JOLLIET, O. 1993. Modelling of water uptake, transpiration and humidity in greenhouses, and of their effects on crops. Acta Hortic. 328: 69-78.
- JONES, J. B. JR. 1999. Tomato Plant Culture: In the field. greenhouse. and home garden. CRC Press LLC, Inc. Boca Raton. Florida. USA. 199 p.
- JORGE, S. M. ; SÁNCHEZ, DEL C. F. 2003. Densidades de población, arreglos de dosel y despunte en jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivado en hidroponía. Rev. Fitotec. Mex. 26: 257-262.
- KAPPEL, F.; FLORE, J. A. 1983. Effect of shade on photosynthesis, specific leaf weight, leaf chlorophyll content, and morphology of young peach trees. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 108: 541-544.
- KINET, J. M. 1977. Effect of defoliation and growth substances on the development of the inflorescence in tomato. Sci. Hortic. 6: 27-35.

- LAWLOR, D. W. 1993. Photosynthesis: molecular. physiological and environmental processes. Longman Scientific and Technical. Londres, Inglaterra. 318 p.
- LONGUENESSE, J. J.; GARY, C.; TEHAMITCHIAN, M. 1993. Modeling CO₂ exchanges of greenhouse crops a matter of scales and boundaries. Acta Hortic. 328: 33-47.
- LOOMIS, R. S.; WILLIAMS, W. A.; DUNCAN, W. G. 1967. Community Architecture and the Productivity of Terrestrial Plant Communities. Photosynthesis in Plant Life. pp. 291-306. *In: Harvesting the Sun..* San Pietro. A.. F. A. Greer, and T. J. Army (eds.). Academic Press. New York. USA. Haskins. C. Y Sullivan and C. H. M. Van Bavel (eds.). American Society of Agronomy/Crop Science Society of America. Madison. WI., USA.
- LOOMIS, R. S.; WILLIAMS, W. A. 1969. Productivity and the morphology of crop stands: Patherns with leaves. pp. 27-47. *In: Physillogical Aspects of Crop Yield.* Eastin. J. D .. F. A.
- LOUWERSE, W.; ZWEERDE, W. V. D. 1977. Photosynthesis transpiration and leaf morphology on *Phaseolus vulgaris* and *Zea mays* grown at different irradiances in artificial and sunlight. Photosynthetica 11: 11-21.
- LUDLOW, M. M.; NG, T. T. 1976. Photosynthetic light response curves of leaves from controlled environment facilities, glasshouses or outdoors. Photosynthetica 10: 457-462.

- MACIAS, M. A. 2003. Enclaves agrícolas modernos: el caso del jitomate mexicano en los mercados internacionales. *Región y Sociedad* 103-151 Vol. XV N° 26.
- MAJOR, D. J., JANZEN, H. H.; SADASIVAIAH, R. S. 1992. Morphological characteristics of wheat associated with high productivity. *Can. J. Plant Sci.* 72: 689-698.
- MARCELIS, L. F. M.; DE KONING, A. N. M. 1995. Biomass partitioning in plants. pp. 84-92. *In: Greenhouse Climate Control-An Integrated Approach.* Bakker, J. c., G. P. A. Boot, H. Challa. and N. J. van de Braak (eds.). Wageningen Pers. Netherlands.
- MCAVOY, R. J.; JANES, H. W.; GODFRIAUX, B. L.; SECKS M.; DUCHAI, D.; WITTMAN, W. K. 1989. The effect of total available photosynthetic photon flux on single truss tomato growth and production. *J. Hortic. Sci.* 64(3): 331-338.
- MÉNDEZ, G.T.; SANCHEZ DEL C.F. 2005. Doseles escaleriformes con hileras de plantas de jitomate orientadas en dirección este-oeste. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 11(1): 185-192.
- MIYAJI, K. I. 1984. *Glycine max* Merril. II. Productivity of leaves in relation to their longevity, plant density and sowing time. *New Phytol.* 97: 479-488.
- MOCK, J. J.; PEARCE, R.B. 1975. An ideotype of maize. *Euphytica* 24:613:623
- MONTEITH, J. L. 1980. Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agricultural and Forest Meteorology.* 68: 213-220.

- NEDERHOFF, E. M. 1984. Light interception of a cucumber crop at different stages of growth. *Acta Hortic.* 148: 525-534.
- NEDERHOFF, E. M.; VEGTER, J. G. 1994. Photosynthesis of stands of tomato, cucumber and sweet pepper measured in greenhouse under various CO₂-concentrations. *Annals of Botany* 73: 353-361.
- NOBEL, P. S.; LONG, S. P. 1988. Estructura del dosel e intercepción de luz. pp. 34-41. *In: Técnicas en Fotosíntesis y Bioproductividad.* Scurlock, J. M., S. P. Long, D. O. Hall and J. Coobs (eds.). Colegio de Posgraduados. Chapingo. México.
- Nogueira, P. R. M. 2000. Radiación solar interceptada y crecimiento del pepino cultivado en NFI. Tesis doctoral. Universidad de Almería. Escuela Politécnica Superior. Almería. España. 112 p.
- NUEZ, F. 1999. El cultivo del tomate. Ediciones Mundi-Prensa. Quinta edición. Madrid, España. 793 p
- NUEZ, F. 2001. El cultivo del tomate. Ediciones Mundiprensa. Madrid, España. 793 p.
- NUEZ, F.; PROHENS, J. BLANCA, J.M. 2004. Relationship, origin, and implications of Galapagos tomatoes: implications for the conservation of natural populations. *Am. J. Bot.* 9: 86-99

- PAPADOPOULOS, A. P. 1985. Plant spacing effects of photosynthetically active radiation interception and utilization by greenhouse tomatoes. Ph. D. Thesis. University of Guelph. Ontario, Canada. 428 p.
- PAPADOPOULOS, A. P.; ORMROD, D. P. 1991. Plant spacing effects on growth and development of the greenhouse tomato. Can, J. Plant Sci. 71: 297-304.
- PAPADOPOULOS, A. P.; PARARAJASINGHAM, S. 1997. The influence of plant spacing on light interception and use in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill): A review. Sci. Hortic. 69(1-2): 1-29.
- PAPADOPOULOS, A. P.; ORMROD D. P. 1990. Plant spacing effects on yield of the greenhouse tomato. Can. J. Plant Sci. 70: 565-573.
- PAPADOPOULOS, A. P.; ORMROD, D. P. 1988. Plant spacing effects on light interception by greenhouse tomatoes. Can. J. Plant Sci. 68: 1197-1208
- PAPADOPOULOS, A. P.; ORMROD, D. P. 1988b. Plant spacing effects on photosynthesis and transpiration of the greenhouse tomato. Can. J. Plant Sci. 68: 1209-1218.
- PEARCE, B. D.; GRANGE, R. I.; HARDWICK, K. 1993. The growth of young tomato fruit. I. Effects of temperature and irradiance on fruit grown in controlled environments. J. Hortie. Sci. 68(1): 1-11.
- PEARCE, R. B.; BROWN, R. H.; BLASER R. E. 1965. Relationships between leaf area index. light interception and net photosynthesis in orchardgrass. Crop Sci. 5: 553-556

- PEAT, W. E. 1970. Relationships between photosynthesis and light intensity in the tomato. *Ann. Bot.* 34: 319-328.
- PENDLETON, J. W.; SMITH, G. E.; WINTER, S. R.; JOHNSTON, T. J. 1968. Field investigations of the relationships of leaf angle in corn (*Zea mays* L.) to grain yield and apparent photosynthesis. *Agronomy Journal* 60: 422-424.
- PICKEN, A. J. F. 1984. A review of pollination and fruit set in the tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *J. Hortic. Sci.* 59: 1-13.
- PICKEN, A. J. F.; HURD, R. G.; VINCE-PRUE, D. 1985. *Lycopersicon esculentum*. pp. 330-346. *In: CRC Handbook of Flowering*. Vol. II. Halevy A. H. (ed.). CRC Press, Inc. Boca Raton. Florida. USA.
- RESH, H. M. 2001. *Cultivos Hidropónicos*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España 558 p.
- RODRIGUEZ, B. R.; LAMBETH, V. N. 1975. Artificial lighting and spacing as photosynthetic and yield factors in winter greenhouse tomato culture. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 100(6): 694-697.
- RUIZ, V. J.; AQUINO, B.T. 1996. Control integrado de mosquita blanca en tomate y chile por métodos de bajo impacto ecológico. Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, p. 12.
- RUSELL, C. R.; MORRIS, D. A. 1983. Pattern of assimilate distribution and source-sink relationships in the young reproductive tomato plant (*Lycopersicon esculentum* Mill.) *Ann. Bot.* 52: 357-363.

- SAGER, J. C; EDWARDS, J, L. 1982. Light energy utilization efficiency for photosynthesis. Trans. ASAE 25: 1737-1746.
- SAGLAM, N.; YAZGAN, A. 1995. The effects of planting density and the number of trusses per plant on earliness, yield and quality of tomato grown unheated high plastic tunnel. Acta Horticulture. 242: 258-267.
- SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. 1994. Fisiología Vegetal. Grupo Editorial Iberoamérica. S. A. de C. V. México. D. F. 759 p.
- SÁNCHEZ DEL C. F. 2001. Fotosíntesis, respiración y biosíntesis. pp. III-I 47-III-170. *In*: Riego localizado y Ferti-irrigación. Memorias del VII Curso Internacional de Sistemas de Riego. Sánchez B., R.o S. Pérez N., 1. Reyes S. F. R. Hernández S. (eds.). Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- SÁNCHEZ, DEL C, F.; ESPINOSA, P. R.; ESCALANTE, E. R. 1991. Producción superintensiva de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en hidroponía bajo invernadero: Avances de Investigación. Revista Chapingo 78: 62-68.
- SÁNCHEZ, DEL C. F.; CORONA, S. T. 1994. Evaluación de cuatro variedades de jitomate bajo un sistema hidropónico a base de despuntes y altas densidades. Revista Chapingo, Serie Horticultura 1: 109-104.
- SÁNCHEZ, DEL C. F.; ESCALANTE, E. R. 1989. Hidroponía. Un Sistema de Producción. Tercera edición. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 194 p.

- SÁNCHEZ, DEL C. F.; ORTIZ, C.J.; MENDOZA, C.C.; GONZÁLEZ, H.V.; COLINAS, L.T. 1999. Características morfológicas asociadas con un arquetipo de jitomate apto para un ambiente no restrictivo. *Agrociencia* 33 (1): 21-29.
- SÁNCHEZ, DEL C.F.; PONCE, O.J. 1998. Densidades de población y niveles de despunte en jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) cultivado en hidroponía. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 4(2): 89-93.
- SAS. 1990. User's Guide. Versión 6. Edición cuarta, Vol. I y II. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. 851 p.
- SCURLOCK, J.M.O.; COOMBS, J.; HALL, D.O.; LONG, S.P. 1988 Técnicas en Fotosíntesis y bioproductividad. Editora Futura, S.A. 251 p.
- SEDGLEY, R. H. 1991. An appraisal of the Donald ideotype after 21 years. *Field Crops Res.* 26: 93-112.
- SHIBLES, R. M.; WEBER, C. R. 1966. Interception of solar radiation and dry matter production by various soybean planting patterns. *Crop Sci.* 6: 55-59.
- SHISHIDO, Y.; SCYAMA, N.; IMADA, S.; HORI, Y. 1989. Carbon budget in tomato plants as affected by night temperature evaluated by steady state feeding with $^{14}\text{CO}_2$. *Ann. Bot.* 63: 357-367.
- SIAP. 2006. Sistema de información agropecuaria y pesquera.
- SINCLAIR, T. R. 1991. Canopy carbon assimilation and crop radiation-use efficiency dependence on leaf nitrogen content. pp. 95-107. *In: Modeling*

crop photosynthesis-from biochemistry to canopy. Boote. K. 1.. and R. S. Loomis (eds). American Society of Agronomy. Madison. WI. USA.

SONNEWALD, U.; WILLMITZER, L. 1992. Molecular approaches to sink-source interactions. *Plant Physiology* 99:1276-1270.

STETA, G. M. 2003. Panorama de la Horticultura en México. Memorias. 4° Congreso Internacional. Producción de Hortalizas en Invernadero.

UCAN, C. I.; SÁNCHEZ, DEL C. F.; CORONA, T.; CONTRERAS, M. E. 2005. Efecto del manejo de relaciones fuente-demanda sobre el tamaño de fruto de jitomate. *Fitotecnia Mexicana* 28 (1): 33-38

URRESTARAZU, M. 2004. Bases y sistemas de los cultivos sin suelo. P 3-47. En; M. Urrestarazu (ed.). Tratado de cultivo sin suelo. 3ª Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

VAN DE VOOREN, J.; WELLES, H. W. G.; HAYMAN, G. 1986. Glasshouse crop production. pp: 581-623. *In: The tomato crop*. Atherto. G., and J. Rudich (eds.). Chapman and Hall. London. England.

VÁZQUEZ, R. JC.; SÁNCHEZ, DEL C., F.; MORENO, P.; E. DEL C. 2007. Producción de jitomate en doseles escaleriformes bajo invernadero. *Rev. Chapingo S. Hortic.* 13 (1): 55-62

VERHAGEN, A. M. W.; WILSON, T. H.; BRITTEN, E. J. 1963. Plant production in relation foliage illumination. *Ann. Bot.* 27: 627-640.

- VERHEIJ E,W.; VERWER, F. 1971. Light interception and yield of peppers grown under glass in relation to plant spacing. *Acta Hortic.* 32: 149-158
- WARDLAW, I. F. 1990. The control of carbon partitioning in plants. *New Phytol.* 116: 341-381.
- WARREN WILSON, J.; HAND, D. W.; HANNAH, M. A. 1992. Light interception and photosynthetic efficiency in some glasshouse crops. 1. *Exp. Bot.* 43: 363-373.
- WATSON, D. J. 1958. Optimum leaf area index in kale and sugar beets. *Ann. Bot.* 11: 417-6.
- WATSON, D. J.; WITTS, K. J. 1959. The net assimilation rates of wild and cultivated beets. *Ann. Bot.* 23: 431-439.
- WILLIAMS, W. A.; LOOMIS, R. S.; LEPLEY, C. R. 1965. Vegetative growth of corn as affected by population density: I. Productivity in relation to interception of solar radiation. *Crop Sci.* 5: 211-215.
- WITTEWER, S. H. 1963. Photoperiod and flowering in the tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 83: 688-694. WOLF, S.;
- WOLF, S., J. RUDICH, J. 1988. The growth rates of fruits on different parts of the tomato plants and the effect of water stress on dry weight accumulation. *Scientia Horticulturae.* 34: 1-11.

ZAHARA, M.; TIMM H. 1973. Influence of plant density of growth, nutrient composition, yield and quality of mechanically harvested tomatoes. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 98(5): 513-516.

V.- EVALUACIÓN AGRONÓMICA Y FISIOTÉCNICA DE CUATRO SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN DOS HÍBRIDOS DE JITOMATE

5.1.- RESUMEN

Para evaluar, fisiotécnica y agronómicamente, cuatro sistemas de producción de jitomate utilizando dos híbridos, se comparó el crecimiento y rendimiento por planta y por unidad de superficie de cada uno de ellos. Las plantas fueron conducidas a un solo tallo y despuntadas dos hojas por encima del tercer racimo. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y arreglo factorial de tratamientos. Los sistemas de producción fueron: Dosel en forma de escalera formado por cuatro hileras de plantas de la misma edad ubicadas a distinta altura; dosel con ciclos de cultivo imbricados en forma de escalera; dosel uniforme formado por cuatro hileras de plantas y dosel uniforme formado por tres hileras de plantas, y los genotipos fueron: 'Sun Lider' y 'Pick Ripe 461'. Mediante muestreos realizados cada 30 días, se evaluaron diversos indicadores del crecimiento y al final del ciclo, el rendimiento y sus componentes primarios. El sistema de producción con dosel en forma de escalera de plantas a distinta altura, mantuvo altas tasas de asimilación neta a lo largo del ciclo de cultivo y presentó el rendimiento más alto (2.35 kg/planta ó 16.15 kg/m² útil, en un periodo de trasplante a cosecha de cuatro meses), así como el mayor PMF (140 g); en NFP el valor más alto fue para el sistema de imbricación (19.18 frutos). El genotipo 'Sun lider' con 2.25 kg/planta, superó a 'Pick ripe 461' (2.12 kg/planta).

PALABRAS CLAVE: *Lycopersicum esculentum*, despunte, dosel, productividad

AGRONOMIC AND PHYSIOTECHNICAL EVALUATION OF FOUR PRODUCTION SYSTEMS IN TWO TOMATO HYBRIDS

5.2. - ABSTRACT

To evaluate, physiotechnically and agronomically, four different production systems of tomato using two hybrids, the growth and yield per plant and area unit were compared. The plants were conducted to a single stem and trimmed two leaves above the third cluster. A randomized complete block experimental design with four replications was used with a factorial arrangement of treatments. The production systems were: Canopy with a stair shape formed by four rows of plants of the same age located to different height; canopy with crop cycles overlapped in a stairs shape; uniform canopy formed by four rows of plants and uniform canopy formed by three rows of plants, and genotypes were 'Sun Lider' and 'Pick Ripe'. Several growth indicators were evaluated every 30 days and, at the final of crop cycle, the yield and their primary components. The production system with stair shape canopy formed with plants at different height, maintained high assimilation net rates along the crop cycle and presented the highest yield (2.35 kg/plant or 16.15 kg/m² in a period of four months from transplant to final harvest, and the highest PMF (140 g); in NFP the highest value was for the overlapped system (19.18 fruits). The genotype 'Sun Lider' with 2.25 kg/plant, overcame 'Pick ripe 461' (2.12 kg / plant).

KEY WORDS: *Lycopersicum esculentum*, trimming, canopy, productivity.

5.3.- INTRODUCCIÓN

En México la necesidad de incrementar la producción agrícola en México, en un contexto de escasa superficie cultivable por productor, de falta de agua, de heladas, y serias limitaciones por topografía accidentada, erosión hídrica y eólica y salinidad de suelo, conduce a considerar como opción tecnológica el uso de sistemas de producción intensivos como el cultivo protegido y la hidroponía.

El sistema de producción de jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) en invernadero que se practica en países europeos y en América del Norte, consiste en usar genotipos de tipo bola de crecimiento indeterminado, con densidades de población de dos a tres plantas/m² que se dejan crecer a más de 3 m de altura, para cosechar de 15 a 25 racimos por planta en un ciclo de cultivo de 10 a 11 meses y un periodo de inicio a fin de cosecha de al menos cinco meses, pero con rendimientos que pueden sobrepasar 300 t ha⁻¹ año⁻¹ (Nuez, 2001; Resh, 2001). En este sistema el índice de área Foliar (IAF) aumenta continuamente y por ello la densidad de población se determina considerando que las plantas crecerán a la altura indicada. Lo extenso del ciclo de cultivo provoca una producción relativamente baja de biomasa por año, debido principalmente a que el IAF para una máxima interceptación de radiación fotosintéticamente activa (RFA) por el dosel, tarda mucho tiempo en establecerse (Sánchez *et al.*, 1999).

Charles-Edwards *et al.*, (1986) consideran que entre más pronto se logre establecer y se mantenga el IAF óptimo para lograr una máxima interceptación de RFA, mayor rendimiento por unidad de superficie puede lograrse.

Un sistema de producción alternativo, desarrollado en la Universidad Autónoma Chapingo que ya ha sido validado comercialmente por algunos productores, consiste en despuntar tempranamente las yemas terminales para dejar tres racimos por planta, lo que permite que tengan poca altura y área foliar, lo que hace posible establecerlas en densidades de población de hasta 7 plantas/m²; en este caso el rendimiento por planta es menor que cuando se manejan a muchos racimos, pero el rendimiento por unidad de superficie es compensado con la mayor densidad de población; además, al cosechar pocos racimos por planta, el ciclo de cultivo de trasplante a cosecha se acorta, lo que hace posible hasta tres o cuatro ciclos de cultivo por año y con ello obtener una productividad anual superior a la del sistema convencional (Sánchez y Ponce., 1998; Sánchez *et al.*, 1998). Este sistema se hace aún más eficiente con el uso de plántulas de mayor edad al momento del trasplante, ya que permite reducir aún más el periodo de trasplante a fin de cosecha (Sánchez *et al.*, 1999). Al reducirse el ciclo del cultivo también disminuyen los problemas fitosanitarios y se concentra la cosecha en un periodo más corto de tiempo, lo que permite programar la cosecha para ventanas de mercado cuando el precio es alto, dándole al productor un mayor beneficio económico.

No obstante las ventajas arriba mencionadas, se han encontrado algunos inconvenientes para este último sistema de producción. Por ejemplo, Ucán *et al.* (2005) reportan que cuando se usan contenedores (camas) en los que se establecen cuatro hileras de plantas despuntadas a tres racimos, las dos hileras centrales rinden de 20 a 30% menos que las plantas ubicadas en las hileras exteriores. Lo anterior se debe a un mayor sombreado de las plantas en las hileras

centrales, mientras que las hileras exteriores se ven favorecidas con mayor iluminación y mejor distribución de la luz en las hojas por el espacio de los pasillos que hay entre las camas.

Gardner *et al.* (1995) señalan que una distribución más uniforme de la radiación solar entre las hojas del dosel permite mayor producción de materia seca por día y eventualmente un mayor rendimiento por unidad de superficie y tiempo. Con el fin de mejorar la intercepción de luz de las hileras centrales respecto a las exteriores, Jarvis (1998) propone, para los cultivos en alta densidad, disminuir el número de hileras por cama, aunque se disminuya la distancia entre plantas contiguas.

Otro sistema con el que se puede lograr mayor uniformidad en la distribución de la radiación en las hojas del dosel, ha sido investigado recientemente (Méndez *et al.*, 2005; Vázquez *et al.*, 2007). Éste consiste en el establecimiento de contenedores organizados para colocar cuatro hileras de plantas a distinta altura formando doseles escalonados (dosel escaleriforme).

El uso de jitomates determinados no es común en invernaderos, pero para los sistemas propuestos de despunte para dejar tres racimos por planta puede ser más adecuado ya que presentan menos área foliar por planta, menor altura y, en consecuencia menos sombreado mutuo para las altas densidades que se manejan (Méndez *et al.*, (2005).

Con base en lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo comparar, fisiotécnica y agronómicamente, cuatro sistemas de producción y dos genotipos de plantas de jitomate en hidroponía bajo invernadero.

5.4.- MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del sitio experimental

El presente trabajo se llevó a cabo de junio a noviembre del 2007, en condiciones de invernadero e hidroponía. La fase de semillero se estableció en un invernadero de cristal y la fase de producción en un invernadero con estructura metálica y cubierta de polietileno, ambos ubicados en la Universidad Autónoma Chapingo, a 19° 29' de latitud norte, 98° 53' de longitud oeste y una altitud de 2250 msnm.

Material biológico

Se utilizaron los híbridos comerciales de jitomate 'Pick ripe 461' y 'Sun líder' ambos de hábito de crecimiento determinado y frutos tipo bola. Estos cultivares son apreciados en el mercado por sus frutos grandes, color uniforme, buen sabor, firmeza y relativa larga vida de anaquel.

Diseño del experimento

El experimento se estableció bajo un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones y ocho tratamientos en un arreglo factorial, siendo los factores de estudio los sistemas de producción (cuatro) y los genotipos de jitomate (dos).

Los sistemas de producción evaluados fueron los siguientes:

1. Doseo uniforme de cuatro hileras (testigo): consistió en unidades experimentales de 28 plantas en arreglo de cuatro hileras de plantas y una orientación norte-sur, con un espacio entre plantas y entre hileras de 30 cm, dejando pasillos de 50 cm entre cada juego de cuatro hileras, lo que resultó en una densidad de siete plantas

m² de invernadero). Las plántulas se trasplantaron a los 30 días después de la siembra (dds).

2. Dosele uniforme de tres hileras: consistió de unidades experimentales de 27 plantas en arreglo de tres hileras por cama con orientación de norte-sur. La distancia entre plantas fue 21.7 cm y 40 cm entre hileras, resultando también una densidad de 7 plantas m⁻². Las plántulas se trasplantaron a los 30 dds.

3. Sistema de imbricación: formada por la coexistencia de plantas de distinta edad, que consistió en un trasplante inicial en dos hileras con plántulas de 50 dds; la distancia entre hileras fue de 30 cm y entre plantas de 16.6 cm. Cuando las plantas cumplieron 100 dds, se procedió a trasplantar otras dos hileras de plántulas de 50 dds, una a cada costado de las hileras anteriores, a la misma distancia entre plantas e hileras formando así un dosele en forma de escalera por tratarse de plantas de distinta edad. Cuando las plantas centrales cumplieron 150 dds y se terminó la cosecha de tres racimos por planta, fueron eliminadas y las plantas de las hileras de los costados (de 100 días de edad) se recorrieron al centro, y se colocaron nuevamente dos hileras de plántulas de 50 dds en los costados. El procedimiento se repitió cada 50 días hasta el final del experimento. La densidad fue de 6 plantas/m² por cada ciclo de dos hileras.

4. Dosele escaleriforme: consistió en sembrar plántulas de 30 días de edad en cuatro hileras a diferente altura, usando como contenedores bolsas colocadas encima de un armazón metálico de forma escalonada. La distancia horizontal entre plantas y entre hileras fue de 30 cm y la diferencia de altura entre hileras de plantas contiguas fue de 30 cm. La orientación de las hileras fue con dirección este-oeste,

resultando una densidad de 7 plantas por m² de invernadero. Debido al despunte dos hojas arriba de la tercer inflorescencia el ciclo de cultivo fue de cuatro meses.

En todos los sistemas de producción las plantas fueron despuntadas (remoción de la yema terminal) dos hojas arriba de la tercer inflorescencia formada. Con este manejo cada ciclo de cultivo de trasplante a fin de cosecha duró aproximadamente cuatro meses.

Las variables evaluadas fueron:

1. Peso seco por planta (PSP). Se obtuvo al secar en una estufa a 70 °C hasta peso constante.
2. Peso seco por m² (PSM²).
3. Tasa de asimilación neta (TAN). Se calculó con los valores obtenidos de área foliar y peso seco de la planta, de los 30 a 60 días, 60 a 90 días y de 90 a 120 días. Se expresó en g/m² de hoja/día, de acuerdo con el algoritmo propuesto por Scurlock *et al.* (1988):

$$TAN = \left\{ \frac{(W_2 - W_1)}{(s_2 - s_1)} \right\} \left\{ \frac{(\ln s_2 - \ln s_1)}{(t_2 - t_1)} \right\},$$

Donde W₂ y W₁ son el peso seco de la planta entera (g) al final y al inicio de un periodo determinado, s₂ y s₁ son el área foliar total por planta (cm²) al final y al inicio del mismo periodo, ln es el logaritmo natural, y t₂ y t₁ son el tiempo final e inicial en el periodo dado.

4. Índice de área foliar (IAF), se obtuvo al dividir el área foliar total de una planta entre el área de superficie que ocupó.

5. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC) que resulta de multiplicar la TAN por el IAF (g/m² de suelo/día).

Todas estas variables se evaluaron a los 60, 90 y 120 dds.

Al final del ciclo se evaluaron:

6. Rendimiento total por planta (kg).

7. Número de frutos por planta.

8. Peso medio de fruto (g).

9. Número de frutos por m² por ciclo.

10. Rendimiento (kg/m²) por ciclo.

11. Índice de Cosecha (IC). se obtuvo al dividir el rendimiento agronómico (peso de fruto por planta) entre el rendimiento biológico (materia seca total) por planta.

Los datos obtenidos fueron sometidos a una prueba de análisis de varianza y comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) utilizando para su análisis, el programa computacional SAS, (SAS, 1990).

Conducción del experimento

La siembra de la semilla en el sistema de imbricación se llevó a cabo en macetas de 750 mL de capacidad a una densidad de 100 plántulas/m², rellenas con arena de tezontle rojo cernido para dar una granulometría de 1 a 2 mm de diámetro. Durante la primer semana se aplicaron cuatro riegos por día sin fertilizante y a partir de la aparición de las primeras hojas verdaderas, se aplicaron tres riegos

diarios con una solución nutritiva compuesta por las siguientes concentraciones de nutrimentos minerales en mg Litro⁻¹: N=250, P=50, K=250, Ca=280, Mg=50, Fe=2, Mn=0.5, B=0.5, Cu= 0.1 y Zn=0.1, como la sugieren Sánchez *et al.* (1992). En la conducción del semillero se utilizó un sistema de enfriamiento con panel evaporativo para mantener una temperatura de 25 a 30 °C y humedad relativa entre 65 y 85 %.

La fase de producción se desarrolló en un invernadero con cubierta de polietileno, ventanas laterales a todo lo largo por ambos costados, protegidas con malla anti-áfidos y cortinas enrollables. El piso se cubrió con tela negra permeable de polipropileno (ground cover). Los contenedores fueron bolsas de polietileno de color negro con capacidad de 10 litros, las cuales se rellenaron usando como sustrato tezontle rojo con partículas de 1 a 4 mm. En el sistema de riego se colocaron goteros con gasto de 4 Litros h⁻¹ con cuatro derivaciones, una por maceta, dando un gasto final individual de 1 Litro h⁻¹. Se proporcionaban cuatro riegos al día, con la solución antes mencionada, ajustando el tiempo de cada riego a las condiciones climáticas y a la edad de las plantas.

5.5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis de varianza indican que hubo diferencias significativas entre sistemas de producción y entre genotipos para la mayoría de las variables evaluadas; sin embargo, no hubo efecto de interacción significativa entre sistemas y variedades para ninguna de las variables.

Entre los 30 y 60 dds se tiene un periodo de crecimiento vegetativo intenso; al final del mismo se manifiesta la aparición macroscópica de botones florales. La prueba de comparación de medias (Tukey $P \leq 0.05$) mostró que la TAN y la TCC en ese periodo fueron estadísticamente menores para el sistema de imbricación, mientras que el IAF fue igual para todos los tratamientos (Cuadro 11). La menor TAN en el sistema de imbricación se explica porque el trasplante al lugar definitivo se realizó a los 50 dds, mientras que en los demás tratamientos fue a los 30 dds, pues al estar las plántulas por más tiempo en el semillero a mayor densidad que en el lugar definitivo, les afectó más la competencia por la RFA incidente que a las plántulas de los otros tratamientos trasplantadas a los 30 dds. Como no hubo diferencias en IAF entre tratamientos, la TCC (que es producto de la TAN por el IAF) también fue menor para el sistema de imbricación.

Como consecuencia de lo anterior, a los 60 dds, también el PSP y el PSM^2 fueron estadísticamente menores para el sistema de imbricación (Cuadro 11).

Entre genotipos, para el periodo de los 30 a los 60 dds, hubo diferencias en la TAN y en el IAF, encontrándose que Sun líder tuvo mayor TAN, pero menor IAF que Pick ripe (Cuadro 9).

Entre los 60 y 90 dds las plantas estaban en la etapa de floración y establecimiento de frutos; en este periodo la TAN fue igual en todos los tratamientos, pero el IAF a los 90 dds fue estadísticamente mayor en el sistema de dosel uniforme con tres hileras de plantas respecto al escaleriforme y el de imbricación; en consecuencia la TCC del periodo también tendió a ser mayor para este sistema (Cuadro 12) con diferencias estadísticas respecto al sistema de imbricación. Como resultado de lo anterior, el mayor PSP correspondió también a dicho sistema, y aunque no alcanzó a diferir estadísticamente de los sistemas de dosel uniforme en cuatro hileras y dosel escaleriforme, si lo hizo con respecto al sistema de imbricación tal como ocurrió con la TCC, lo que puede explicarse por los 20 días más de estancia en el semillero a alta densidad y 20 días menos de estancia en el lugar definitivo creciendo a una menor densidad. Por la misma razón el PSM² fue estadísticamente menor en el sistema de imbricación respecto a los otros tres; cabe señalar que a los 90 dds aún no se imbricaba el segundo ciclo de plantas en dicho tratamiento por lo que la densidad aún era de 9 plantas/m² útil, una planta menos que en los demás tratamientos.

Los sistemas de dosel uniforme de tres y cuatro hileras de plantas se manejaron la misma densidad de población, pero la disposición de las plantas en el primero (mayor espacio entre hileras y menor espacio entre plantas) pudo ser la causa de su mayor IAF y en consecuencia de su mayor TCC, respecto a los sistemas escaleriforme y el de imbricación. Resultados similares han sido reportados por Van de Vooren *et al.* (1986) en jitomates y por Jarvis (1998) para especies de cultivo de invernadero manejadas en camas. Dada la orientación norte-sur de las hileras de plantas y el sol haciendo su recorrido en dirección este-oeste el sistema

de dosel uniforme en tres hileras pudo tener una distribución más adecuada de la RFA incidente; como lo mencionan Gardner *et al.* (1995), una distribución más equitativa de la radiación solar entre las hojas del dosel, permite mayor producción de materia seca por día.

Entre genotipos en ningún caso se encontraron diferencias significativas (Cuadro 13). Entre los 90 y 120 dds se da el periodo de crecimiento más rápido de los frutos. En este periodo en el sistema escaleriforme se tuvo el valor más alto de TAN superando estadísticamente al sistema de imbricación en donde se tuvo el menor valor (Cuadro 13). El IAF medido a los 120 dds, fue estadísticamente mayor en este último sistema, lo cual se explica porque a partir de los 100 dds del primer ciclo se hizo la imbricación del segundo con plantas de 50 días de edad, quedando una densidad de 18 plantas/m² útil en este último tratamiento contra las 10 plantas/m² útil en los demás tratamientos. Entonces la mayor densidad del sistema de imbricación provocó mayor IAF, pero no condujo a una mayor TCC con respecto a los otros tratamientos, ya que el mayor sombreado mutuo condujo a una menor TAN tal y como lo señalan autores como Charles-Edwards *et al.* (1986) y Pollock y Farrar (1996).

El PSM² del sistema de imbricación superó estadísticamente al resto de los tratamientos pero el PSP fue el menor de todos, lo que se explica también por la mayor densidad de población y, en consecuencia, un mayor sombreado entre plantas, lo que coincide con Gardner *et al.* (1995) quienes señalan que con el aumento de la densidad dentro de ciertos límites se provocan la disminución de la

biomasa por planta por el mayor sombreado mutuo, pero se incrementa el peso por unidad de superficie al haber más plantas/m².

Entre genotipos sólo se encontró diferencias en el IAF donde el híbrido Pick ripe superó al Sun líder tal como ocurrió a los 60 dds.

Para las variables del rendimiento y sus componentes, se encontró que el rendimiento por planta fue estadísticamente superior para el sistema de dosel escaleriforme, respecto a los sistemas de dosel uniforme en tres o cuatro hileras (Cuadro 12), e igual respecto al de imbricación.

En el sistema escaleriforme este mayor rendimiento se explica por un mayor peso medio de frutos respecto a los demás tratamientos, ya que el número de frutos por planta en este sistema fue estadísticamente igual a los dos de dosel uniforme e inferior al de imbricación.

Este mayor número de frutos por planta se tuvo en el sistema de imbricación; esto se debió a un mayor número de flores por planta (datos no mostrados), lo cual se atribuye a las mejores condiciones ambientales en las que estuvieron las plántulas en el semillero. La iniciación floral de la primera inflorescencia en el jitomate tiene lugar aproximadamente a los 20 dds y, a partir de ese momento cada ocho días se inicia una nueva (Atherton y Harris, 1986). De acuerdo con Ponce *et al.* (2000) y otros autores (Russell y Morris, 1983; Dieleman y Heuvelink, 1992), la iniciación de las primeras inflorescencias tiene lugar en el semillero, y se puede aumentar el número de flores iniciadas mejorando las condiciones ambientales (luz, CO₂, temperatura, espacio para el crecimiento de la raíz) en ese periodo. Entonces el mayor número de flores por planta en el sistema de imbricación pudo deberse al

manejo de las plántulas en contenedores grandes y a una menor densidad de población (100 plantas/m²).

El mayor rendimiento por unidad de superficie en el sistema escaleriforme respecto a los demás se explica por un mayor IC producto de un mayor peso medio de fruto (Cuadro 14). Al tener las hileras de plantas a diferente altura en el sistema escaleriforme, la captación de radiación solar fue más homogénea en el dosel provocando una mayor producción de materia seca. Estos resultados concuerdan con lo señalado por Charles-Edwards *et al.* (1986) y Gardner *et al.* (1995), que indican que el rendimiento se puede aumentar incrementando la eficiencia fotosintética y/o la fotosíntesis del dosel, mediante una distribución más homogénea de la luz entre las hojas del dosel.

En los sistemas uniformes con la misma densidad de plantas (diez plantas/m² útil) con arreglos diferentes no hubo diferencia significativa entre manejar tres o cuatro hileras de plantas, ya que el sistema de tres hileras probablemente no mejoró la distribución de radiación solar incidente con el aumento del espacio entre hileras, al disminuir el espacio entre plantas.

Entre genotipos se encontraron tendencias a un mayor número de frutos por planta, peso de fruto y de número de frutos por m² en el híbrido Sun lider, respecto a Pick ripe 461, las cuales fueron suficientemente importantes para que el rendimiento por planta y por unidad de superficie fueran estadísticamente significativas a favor del primero, gracias a su mayor IC (Cuadro 14).

Dado que el sistema de imbricación puede permitir hasta siete ciclos de cultivo al año (un ciclo de producción cada 50 días) en contraste con tres ciclos al año de los

otros sistemas, su productividad anual podría ser muy superior. Por ello se hace necesario realizar experimentos con estos sistemas que comprendan un periodo de al menos un año completo.

Cabe señalar que la productividad anual del sistema de dosel escaleriforme y de los sistemas de dosel uniforme también se puede incrementar en un ciclo más por año acortando los ciclos de cultivo (lo que permitiría obtener más ciclos por año) mediante la técnica de hacer trasplantes de plántulas de mayor edad, tal y como se hizo para el sistema de imbricación.

5.6.- CONCLUSIONES

El sistema de producción de jitomate con dosel en forma de escalera a una densidad de 10 plantas m² útil, mantuvo altas tasas de asimilación neta a lo largo de su ciclo de cultivo, y al final de éste, un mayor índice de cosecha, un mayor tamaño de fruto y un mayor rendimiento por unidad de superficie que el resto de los sistemas evaluados.

El híbrido 'Sun líder' produjo mayor rendimiento por unidad de superficie que el 'Pick ripe 461'.

CUADRO 9. - Valores de F y significancia estadística de varios indicadores de crecimiento de plantas de jitomate para los distintos factores de estudio y las interacciones.

Factor de estudio	Tasa de asimilación neta	Tasa de crecimiento del cultivo	Índice de área foliar	Peso seco por planta	Peso seco por m ²
60 días después de la siembra					
Bloque	1.17	1.84	1.12	1.33	1.38
Sistema de producción	6.08**	8.37**	1.14	5.67**	12.06**
Cultivar	5.50*	0.22	8.19**	0.87	0.75
Sistema x cultivar	0.40	0.72	0.25	0.93	0.84
Coefficiente de variación	13.49	13.99	12.77	11.53	11.60
90 días después de la siembra					
Bloque	1.50	3.40*	2.60	1.43	1.29
Sistema de producción	1.56	5.79**	8.56**	3.61*	7.97**

Cultivar	4.03	0.04	4.87*	0.30	0.34
Sistema x cultivar	2.80	0.13	1.73	0.53	0.48
Coeficiente de variación	17.22	24.08	19.08	12.81	13.08
120 días después de la siembra					
Bloque	1.66	1.36	0.17	0.67	0.42
Sistema de producción	5.33**	0.16	44.59**	14.70**	17.75**
Cultivar	0.20	3.42	36.61**	0.77	1.49
Sistema x cultivar	0.17	0.12	2.03	0.26	0.65
Coeficiente de variación	42.82	50.47	14.53	10.79	9.79

*: Significativo con $p = 0.05$. **: $p = 0.01$.

CUADRO 10.- Valores de F y significancia estadística de variables relacionadas con el rendimiento en jitomate para los distintos factores de estudio y las interacciones.

Factor de estudio	Rendimiento por planta (g)	Frutos por planta	Peso medio de fruto (g)	Rendimiento por unidad de área	Frutos por unidad de área	Índice de cosecha
Bloque	1.30	0.83	2.34	1.25	0.81	0.80
Sistema de producción	5.58**	8.59**	13.69**	13.14**	0.36	19.78**
Cultivar	6.28**	1.87	1.93	6.24*	1.73	19.54**
Sistema x cultivar	0.21	0.94	2.22	0.23	0.92	2.19
Coeficiente de variación	6.34	7.25	5.22	6.41	7.41	6.49

*: Significativo con $p = 0.05$. **: $p = 0.01$.

CUADRO 11.- TAN y TCC entre 30 y 60 dds e IAF, PSP y PSM² a los 60 dds, de cuatro sistemas de producción y dos genotipos de jitomate.

	TAN (g/m ² /día)	IAF (m ² /m ²)	TCC (g/m ² /día)	PSP (g)	PSM ² (g/m ²)
Sistema de producción					
Escaleriforme	17.18 a ^z	2.23 a	37.51 a	46.51 a	311 a
Imbricación	13.18 b	2.23 a	29.21 b	39.00 b	235 b
Dosel con 3 hileras	16.80 a	2.47 a	41.41 a	48.24 a	323 a
Dosel con 4 hileras (Testigo)	16.79 a	2.30 a	8.65 a	48.30 a	323 a
DMS	3.00	0.41	7.44	7.39	48.89
Genotipo					
Sun líder	16.88 a	2.16 b	36.27 a	46.38 a	303 a
Pick ripe	15.09 b	2.46 a	37.12 a	44.65 a	293 a
DMS	1.59	0.21	3.93	3.91	25.8

^zMedias con la misma letra, dentro de cada columna, son iguales (Tukey $P \leq 0.05$); DMS: Diferencia mínima significativa; TAN: Tasa de asimilación neta; IAF: Índice de área foliar; TCC: Tasa de crecimiento de cultivo; PSP: Peso seco por planta; PSM²: peso seco por metro cuadrado; dds: días después de la siembra.

CUADRO 12.- TAN y TCC entre 60 y 90 dds e IAF, PSP y PSM² a los 90 dds de cuatro sistemas de producción y dos genotipos de jitomate.

Medición a los 90 dds	TAN (g/m ² /día)	IAF (m ² /m ²)	TCC (g/m ² /día)	PSP (g)	PSM ² (g/m ²)
Sistema de producción					
Escaleriforme	14.87 a ^z	2.37 b	34.57 ab	148.50 ab	994.95 a
Imbricación	12.46 a	2.17 b	27.13 b	130.32 b	785.84 b
Dosel con 3 hileras	13.43 a	3.36 a	44.73 a	160.62 a	1076.18 a
Dosel con 4 hileras (Testigo)	13.04 a	2.64 ab	34.65 ab	149.23ab	999.86 a
DMS	3.29	0.76	13.36	27.03	180.34
Genotipo					
Sun líder	14.27 a	2.44 a	34.97 a	148.46 a	973.80 a
Pick ripe	12.63 a	2.83 a	35.57 a	145.87 a	954.65 a
DMS	1.74	0.40	7.06	14.30	95.41

^zMedias con la misma letra, dentro de cada columna, son iguales (Tukey $P \leq 0.05$); DMS: Diferencia mínima significativa; TAN: Tasa de asimilación neta; IAF: Índice de área foliar; TCC: Tasa de crecimiento de cultivo; PSP: Peso seco por planta; PSM²: peso seco por metro cuadrado; dds: días después de la siembra.

CUADRO 13. TAN y TCC entre 90 y 120 dds e IAF, PSP y PSM² a los 120 dds de cuatro sistemas de producción y dos genotipos de jitomate.

Medición a los 120 dds	TAN (g/m ² /día)	IAF (m ² /m ²)	TCC (g/m ² /día)	PSP (g)	PSM ² (g/m ²)
Sistema de producción					
Escaleriforme	11.76 a ^z	1.88 c	22.04 a	223.51 a	1497.45 b
Imbricación	4.61 b	3.94 a	18.60 a	162.47 b	1959.42 a
Dosel con 3 hileras	8.30ab	2.40 b	20.34 a	227.11 a	1521.57 b
Dosel con 4 hileras	8.99 ab	2.30 bc	20.97 a	217.79 a	1459.13 b
DMS	5.17	0.50	14.57	30.29	209.37
Genotipo					
Sun líder	8.70 a	2.22 b	17.10 a	211.20 a	1575.40 a
Pick ripe	8.13 a	3.04 a	23.87 a	204.23 a	1643.42 a
DMS	2.73	0.26	7.71	16.02	110.76

^zMedias con la misma letra, dentro de cada columna, son iguales (Tukey $P \leq 0.05$); DMS: Diferencia mínima significativa; TAN: Tasa de asimilación neta; IAF: Índice de área foliar; TCC: Tasa de crecimiento de cultivo; PSP: Peso seco por planta; PSM²: peso seco por metro cuadrado; dds: días después de la siembra.

CUADRO 14.- Efecto del sistema de producción y del genotipo de jitomate en el rendimiento y variables relacionadas

Tratamiento	RTP (Kg)	NFP	PMF (g)	NFM ²	RM ² (Kg m ²)	IC
Sistema de producción						
Escaleriforme	2.35 a ^z	16.8 b	140 a	115 a	16.15 a	0.74 a
Imbricación (50 días)	2.27 ab	19.1a	119 c	115 a	13.72 b	0.63 c
Dosel con 3 hileras	2.11 b	16.2 b	130 b	112 a	14.10 b	0.67 bc
Dosel con 4 hileras (Testigo)	2.12 b	16.8 b	126 bc	115 a	14.48 b	0.70 ab
DMS	0.19	1.74	9.0	11.8	1.28	0.06
Genotipo						
Sun lider	2.27 a	17.5 a	130 a	116 a	15.12 a	0.72 a
Pick ripe	2.15 b	16.9 a	127 a	112 a	14.27 b	0.65 b
DMS	0.10	0.9	5.0	6.2	0.68	0.03

^zMedias con la misma letra, dentro de cada columna, son iguales (Tukey $P \leq 0.05$); DMS: Diferencia mínima significativa; RTP: rendimiento total por planta; NFP: número de frutos por planta; PMF: peso medio de los frutos; NFM²: número de frutos por m² útil por ciclo; RM²: rendimiento por m² útil por ciclo; IC: índice de cosecha.

VI.- DISCUSIÓN GENERAL

En el presente trabajo de investigación se planteó que una distribución más uniforme de la radiación solar entre todas las hojas del dosel puede lograr una mayor producción de materia seca por día y, eventualmente un mayor rendimiento por unidad de superficie y tiempo y que, por lo tanto, mediante el manejo de podas, despuntes tempranos, y disposiciones de las plantas a diferentes alturas, es posible incrementar el rendimiento por planta.

En trabajos anteriores (Vázquez, Sánchez y Moreno, 2007) han demostrado que la producción de jitomate en el esquema de doseles conformados en forma de escalera con despuntes tempranos bajo invernadero, se pueden incrementar los rendimientos por unidad de superficie y tiempo. Con las investigaciones realizadas y expuestas en el presente documento, se intenta incrementar aún más el rendimiento por unidad de superficie, implementando sistemas de producción de ciclos más cortos, con disposiciones y genotipos de plantas que puedan hacer más eficiente la distribución de la radiación solar para un mismo IAF. En algunos de estos sistemas se intenta combinar hileras de plantas de distintas edades a fin de lograr lo anterior a la vez que es posible lograr la cosecha de más racimos por año al hacer más eficiente el manejo del tiempo.

En el primer experimento planteado, donde se utilizó el cultivar 'Charleston', que es de hábito indeterminado, se compararon seis sistemas de producción basados en el manejo de plantaciones con distintas distribuciones de plantas en espacio y tiempo. Los resultados más sobresalientes fueron:

A los 90 y 120 dds el tratamiento 4, que consistió en la imbricación de dos ciclos de cultivo con dos hileras de plantas trasplantadas cada 50 días al lado de otras dos hileras de plantas 50 días mayores (Figura 6), fue el que mostró mayor altura de planta, menor área foliar y menor peso seco, síntomas indicativos de una mayor competencia entre plantas en relación a los otros tratamientos. Hay que considerar que este tratamiento tuvo la densidad más alta (9 plantas m^{-2} considerando sólo las dos hileras centrales y 18 plantas m^{-2} cuando se colocaron las dos hileras de los costados). Lo contrario ocurrió con el tratamiento 3, que consistió en la formación de un dosel en forma de escalera con hileras de plantas de la misma edad, pero ubicadas a distinta altura (Figura 5), lo que es indicativo de una mejor distribución de la radiación solar incidente en el dosel con esta disposición de plantas.

En cuanto al rendimiento y sus componentes destacó el sistema de dosel escaleriforme formado por hileras de plantas de la misma edad colocadas a diferente altura ya que con él se obtuvo el mayor rendimiento por unidad de superficie por ciclo (19.15 $kg\ m^{-2}$) y el mayor peso promedio por fruto (166 g), en ambos casos con diferencia significativa respecto a los demás sistemas.

La diferencia en rendimiento y peso de fruto de este tratamiento respecto a los de doseles uniformes se explica por una distribución de la radiación solar más uniforme, que conduce a una mayor producción de fotoasimilados por planta (Charles-Edwards *et al.*, 1986; Gardner *et al.* 1995). Los otros sistemas de imbricación probados (tratamientos 4, 5 y 6) tuvieron menos rendimiento por unidad de superficie por manejarse con menos plantas por unidad de área por ciclo. El peso medio de fruto también fue menor en los sistemas de imbricación respecto al

escaleriforme como consecuencia del efecto de sombra ocasionado por los ciclos imbricados. Sin embargo el rendimiento potencial por unidad de superficie por año con estos sistemas de imbricación, sobre todo el de los tratamientos 4 y 5, puede superar al sistema escaleriforme debido a que permiten obtener más ciclos en el mismo tiempo (3 ciclos por año en el tratamiento 3 contra 5.5, 11 y 8 ciclos por año en los tratamientos 4, 5 y 6, respectivamente). En función de lo anterior parece interesante continuar la investigación para optimizar estos sistemas de imbricación.

En el caso del tratamiento 3, el rendimiento potencial anual se puede aumentar a cerca de $800 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ si se logra aumentar de 3 a 4 el número de ciclos por año, lo cual es posible manejando los semilleros con contenedores de mayor capacidad y haciendo los trasplantes con plántulas de 50 días de edad (Ponce *et al.*, 2000; Contreras, 2007), tal y como se hizo con los tratamientos de imbricación. Para el caso de los sistemas uniformes, también es posible, con el mismo método, aumentar a cuatro el número de ciclos por año, con lo que se lograrían rendimientos de casi $70 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

En función de esta argumentación se sugiere continuar esta línea de investigación realizando experimentos con estos sistemas que contemplen todos los ciclos de un año.

Al comparar el rendimiento por hileras de los tratamientos uniformes respecto al escaleriforme (Cuadro 7), se observó que las cuatro hileras de plantas rindieron estadísticamente lo mismo en este último sistema, en tanto que con los doseles uniformes las hileras centrales rindieron estadísticamente menos que las exteriores. En dicho Cuadro se observa que el rendimiento de cada una de las

cuatro hileras del dosel escaleriforme fue, al menos, numéricamente superior al de los doseles uniformes.

Todo lo anterior apoya la hipótesis planteada de que al lograr una distribución más equitativa de radiación solar entre todas las hojas de un dosel, para un índice de área foliar determinado, se obtiene mayor producción de materia seca y mayor rendimiento por unidad de superficie y tiempo.

En función de los resultados obtenidos en el primer experimento, en el segundo se compararon, fisiotécnicamente y agronómicamente, cuatro de los sistemas de producción de plantas de jitomate; los dos testigos de dosel uniforme (Figuras 3 y 4), el sistema de dosel escaleriforme formado con cuatro hileras de plantas de la misma edad colocadas a diferente altura (Figura 5) y el sistema de imbricación con trasplantes de plantas de 50 días de edad cada 50 días con dos hileras de la misma edad en cada ciclo (Figura 6), pero ahora probando cultivares determinados (Pick Ripe 461 y Sun Lider), con la idea de que su menor densidad de follaje los puede hacer soportar mejor la presión de densidad de estos sistemas que los cultivares de hábito indeterminado.

Las pruebas de comparación de medias (Tukey $P \leq 0.05$) mostraron que en el último muestreo (90 a 120 dds) el sistema escaleriforme se tuvo el valor más alto de TAN sugiriendo una distribución más uniforme de la radiación solar interceptada por el dosel respecto a los otros sistemas (Cuadro 11).

El peso seco por unidad de superficie del sistema de imbricación superó estadísticamente al resto de los tratamientos pero el peso seco por planta fue el menor de todos (Cuadro 11), lo que se explica también por la mayor densidad de

población provocada por dos ciclos de cultivo coexistiendo al mismo tiempo y, en consecuencia, un mayor grado de sombreado entre plantas, lo que coincide con Gardner *et al.* (1995) quienes señalan que el aumento de la densidad, dentro de ciertos límites, provoca la disminución de la biomasa por planta por el mayor sombreado mutuo, pero se incrementa el peso por unidad de superficie al haber más plantas m^{-2} .

El mayor rendimiento por unidad de superficie en el sistema escaleriforme respecto a los demás (Cuadro 12), se explica por un mayor IC, producto de un mayor peso medio de fruto. Al tener las hileras de plantas a diferente altura en el sistema escaleriforme, la captación de radiación solar fue más homogénea en el dosel provocando una mayor producción de materia seca.

Entre genotipos se encontraron tendencias a un mayor número de frutos por planta, peso de fruto y de número de frutos por m^2 en el híbrido Sun Líder, respecto a Pick ripe 461, las cuales fueron suficientemente importantes para que el rendimiento por planta y por unidad de superficie fueran estadísticamente significativas a favor del primero, gracias a su mayor índice de cosecha.

Dado que con el sistema de imbricación, donde se va dando un ciclo de producción cada 50 días a partir de los 90 días en que se termina el primero, se pueden obtener 5.5 ciclos por año, el rendimiento potencial anual puede ser alto, del orden de $75 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, si las condiciones de manejo permiten obtener rendimientos similares al obtenido en el primer ciclo.

Sin embargo hay que señalar a favor de los sistemas uniformes y escaleriforme, que si se manejaran con la misma edad de trasplante que el sistema de

imbricación, se podrían obtener ciclos completos de cultivo cada tres meses en vez de cada cuatro, con lo que el número de ciclos al año puede ser de cuatro, lo que significa rendimientos anuales del orden de $57 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para los sistemas uniformes y de $65 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el escaleriforme.

Respecto a los cultivares sólo cabe señalar que hubo una pequeña, aunque significativa diferencia en rendimiento a favor del cultivar Sun Líder atribuida a un mayor índice de cosecha.

VII.- CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el presente estudio, en relación a los sistemas de producción en jitomate tanto para plantas de crecimiento indeterminado como determinado, se concluye lo siguiente:

1. La disposición de plantas en cuatro hileras orientadas en dirección este-oeste con despunte a tres racimos para formar un dosel escalonado con una densidad de 7 plantas m^{-2} de invernadero, produjo un mayor rendimiento por unidad de superficie por ciclo que el resto de los tratamientos en ambos experimentos y ello fue debido a un mayor peso de fruto.
2. Los sistemas de imbricación (ciclos de 50 días y ciclos de 25 días) aunque tuvieron el rendimiento más bajo por ciclo pueden otorgar un mayor rendimiento anual, debido a que se pueden obtener 5.5 y 11 ciclos por año contra un máximo de cuatro en los sistemas uniformes y escaleriforme.
3. Al no observar diferencias estadísticas entre los sistemas uniformes de tres y cuatro hileras, se concluye que es mejor producir con el sistema de tres hileras debido a las ventajas que presenta entre ellas la de utilizar menor cantidad de riego (Dos cintillas en el sistema de tres hileras y tres cintillas en el sistema de cuatro hileras) al momento de cosechar es más práctico hacerlo en el sistema de tres hileras respecto al de cuatro hileras.
4. Dentro de los cultivares determinados Sun Líder resultó superior en rendimiento a Pick ripe 461 debido a su mayor índice de cosecha.

VIII.- LITERATURA CITADA

ATHERTON, J.G.; HARRIS, G.P. 1986. Flowering. In: The Tomato Crop. Atherton, J. G. and J. Rudich (editores). Chapman and Hall. Londres, Inglaterra. pp. 167-200.

CHARLES-EDWARDS, D. A.; DOLEY, D.; RIMMINGTON, G. M. 1986. Modelling plant growth and development. Academic Press. Sydney. Australia. 235 p.

CONTRERAS, M. E. 2007. Efecto del ambiente de crecimiento de plántulas de jitomate sobre el número de flores y producción de fruto. Tesis de Doctorado. Colección de Postgraduados. Montecillos, Texcoco, Estado de México . 120 p.

DIELEMAN, J.A.; HEUVELINK, J.A. 1992. Factors affecting the number of leaves preceding the first inflorescence in the tomato. Journal of Horticultural Science 67(1): 1-10.

GARDNER, P.F.; PEARCE, R.B.; MITCHEL, R.L. 1995. Physiology of Crop Plants. Iowa State University Press. Iowa, EUA. 327 p.

JARVIS, R. W. 1998. Control de enfermedades en cultivos de invernadero. Mundi-Prensa. Madrid, España. 334 p.

MÉNDEZ, G.T.; SANCHEZ DEL C.F. 2005. Doseles escaleriformes con hileras de plantas de jitomate orientadas en dirección este-oeste. Revista Chapingo. Serie Horticultura 11(1): 185-192.

- NUEZ, F. 2001. El cultivo del tomate. Ediciones Mundiprensa. Madrid, España. 793 p.
- POLLOCK, C.J.; FARRAR, J.F. 1996. Source-Sink Relations: The role of sucrose. pp 261-279 In: Photosynthesis and the Environment. Advances in Photosynthesis Vol. 5.N R Baker (eds.). Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- PONCE, O.J.; SÁNCHEZ DEL C.F. CONTRERAS, M.E. CORONA, S.T. 2000. Efecto de modificaciones al ambiente en la floración y fructificación de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Fitotecnia Mexicana Vol. 23(1): 87-97.
- RESH, H. M. 2001. Cultivos Hidropónicos. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España 558 p.
- RUSELL, C. R.; MORRIS, D. A. 1983. Pattern of assimilate distribution and source-sink relationships in the young reproductive tomato plant (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Ann. Bot. 52: 357-363.
- SÁNCHEZ, DEL C. F.; ORTIZ, C.J.; MENDOZA, C.C.; GONZÁLEZ, H.V.; COLINAS, L.T. 1999. Características morfológicas asociadas con un arquetipo de jitomate apto para un ambiente no restrictivo. Agrocienca 33 (1): 21-29.
- SÁNCHEZ, DEL C.F.; ESPINOZA, P.R.; ESCALANTE, E.R. 1992. Producción superintensiva de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en hidroponía bajo invernadero. Avances de investigación. Revista Chapingo 78: 62-68.

- SÁNCHEZ, DEL C.F.; ORTIZ, C.J.; MENDOZA, C.C.; GONZÁLEZ, H.V.; BUSTAMANTE, O.J. 1998. Physiological and agronomical parameters of tomato in two new production systems. *Fitotecnia Mexicana* 21(1): 1-3.
- SÁNCHEZ, DEL C.F.; PONCE, O.J. 1998. Densidades de población y niveles de despunte en jitomate (*Lycopersicum esculentum* Mill.) cultivado en hidroponía. *Revista Chapingo. Serie Horticultura* 4(2): 89-93.
- SAS. 1990. User's Guide. Versión 6. Edición cuarta, Vol. I y II. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA. 851 p.
- UCAN, C. I.; SÁNCHEZ, DEL C. F.; CORONA, T.; CONTRERAS, M. E. 2005. Efecto del manejo de relaciones fuente-demanda sobre el tamaño de fruto de jitomate. *Fitotecnia Mexicana* 28 (1): 33-38
- VAN DE VOOREN, J.; WELLES, H. W. G.; HAYMAN, G. 1986. Glasshouse crop production. pp: 581-623. *In: The tomato crop*. Atherto. G., and J. Rudich (eds.). Chapman and Hall. London. England.
- VÁZQUEZ, R. JC.; SÁNCHEZ, DEL C., F.; MORENO, P.; E. DEL C. 2007. Producción de jitomate en doseles escaleriformes bajo invernadero. *Rev. Chapingo S. Hortic.* 13 (1): 55-62