



*"Enseñar la explotación de la
tierra, no la del hombre"*

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
INSTITUTO DE HORTICULTURA**

**EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN
NUTRITIVA, FRECUENCIA DE RIEGO Y VOLUMEN
DE SUSTRATO EN LA PRODUCCIÓN DE PEPINO**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el título de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN
HORTICULTURA**



PRESENTA:

JOSÉ LUIS NORIEGA NAVARRETE

DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES



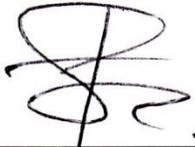
Chapingo, México. Junio de 2014

APROBACIÓN

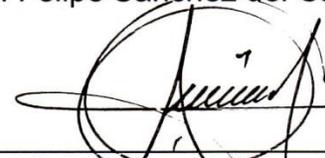
EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA, FRECUENCIA DE RIEGO Y VOLUMEN DE SUSTRATO EN LA PRODUCCIÓN DE PEPINO

Tesis realizada por **José Luis Noriega Navarrete**, bajo la dirección del Dr. Felipe Sánchez del Castillo y del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR: 

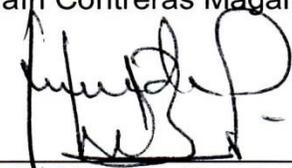
Dr. Felipe Sánchez del Castillo

ASESOR: 

Dr. Esaú del Carmen Moreno Pérez

ASESOR: 

Dr. Efraín Contreras Magaña

ASESOR: 

Dr. Joel Pineda Pineda

Chapingo, Estado de México, Junio de 2014.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico recibido durante mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por aceptarme como un miembro más de esta gran familia.

Al Instituto de Horticultura y Departamento de Fitotecnia, por las facilidades otorgadas durante mi estancia en esta casa de estudios.

Al Dr. Felipe Sánchez del Castillo, por haber aceptado la dirección de este trabajo y por compartir parte de su gran experiencia para la culminación del mismo.

Al Dr. Esaú Moreno Pérez, por sus acertadas observaciones y comentarios.

Al Dr. Efraín Contreras Magaña, por compartir sus conocimientos y experiencias y su gran pasión por la enseñanza de la agronomía.

Al Dr. Joel Pineda Pineda, por su acertada asesoría y entusiasmo para contribuir en las mejoras del presente estudio.

Al cuerpo académico del Posgrado en Horticultura, por transmitir su valiosos conocimientos en las ciencias agronómicas en las aulas, laboratorios y en campo.

Al todo el personal administrativo del Posgrado en Horticultura, por todo el apoyo recibido en la elaboración de trámites durante mi estadía.

Al Ing. Ignacio Salazar, por su apoyo durante los trabajos en el invernadero.

Al C. Javier Montaña (“El Güero”), muy especialmente por brindarme su más sincera amistad y por todo su apoyo durante el establecimiento y desarrollo de la fase experimental.

Al todo el personal técnico y laboratoristas del Laboratorio de Ecología, Laboratorio de Nutrición de Frutales del Departamento de Fitotecnia, así como al Laboratorio de Nutrición Vegetal del Departamento de Suelos, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A los amigos y colegas de la carrera de Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional Autónoma de México, por compartir la profesión más digna del mundo: la agricultura.

A los amigos y compañeros de la carrera de Horticultura Protegida, por todo el apoyo recibido.

A todos los miembros de la Maestría en Ciencias en Horticultura, en especial a la Ing. Estela Martínez, Ing. Martha Tovar, Biol. Sandra González, Ing. Alma Hernández, Ing. Gerardo Pablo, Ing. Carlos Martínez y al Ing. Aldo Beh, por todo su apoyo en la parte académica, y sobre todo compartir su amistad y hacer más livianos aquellos momentos difíciles.

DEDICATORIA

A mis padres, Juanita y José Luis,
Por todo su cariño e invaluable apoyo en la vida, y por ser un ejemplo a seguir.

A Belzay,
Por todo el apoyo y ayuda incondicional en cada momento.

A mis hermanas, Diana e Isabel,
Por su cariño apoyo siempre.

A mis sobrinos, Cristina y Andrés,
Por su interés en sus estudios.

A mis abuelos Inés (†) y Enrique (†),
A mi tía Martha (†),
Por cuidarme y estar siempre a mi lado.

DATOS BIOGRÁFICOS

Originario de la Ciudad de México, Distrito Federal, nació el 28 de Diciembre de 1979. Ingresó a la Universidad Nacional Autónoma de México en el año de 1995; en 1998 ingresó a la Facultad de Estudios Superiores (FES) Cuautitlan, donde obtuvo el título de Ingeniero Agrícola especialista en Agroecosistemas con la tesis titulada “Caracterización anatómica en hoja de plantas multiplicadas *in vitro*”. En el 2004 obtuvo la Medalla al Mérito Universitario Gabino Barreda, por haber obtenido el más alto promedio de calificación al término de sus estudios, y fue acreedor de la Medalla al Servicio Social “Dr. Gustavo Baz Prada” como prestador de servicio social más destacado en programas de impacto social. En 2005 ingresó a la empresa israelí Netafim México, SA de CV, donde se desarrolló en las áreas de sistemas de riego por goteo e invernaderos. En enero de 2012, ingresó al Instituto de Horticultura del Departamento de Fitotecnia, perteneciente a la Universidad Autónoma Chapingo, donde realizó sus estudios de Maestría en Ciencias en Horticultura.

CONTENIDO

| | |
|--|-------------------------------|
| CONTENIDO | VII |
| ÍNDICE DE CUADROS | IX |
| ÍNDICE DE FIGURAS | XII |
| RESUMEN | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| ABSTRACT | ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO. |
| I. INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS | 5 |
| 2.1. OBJETIVO GENERAL | 5 |
| 2.2. OBJETIVOS PARTICULARES | 5 |
| 2.3. HIPÓTESIS | 6 |
| III. REVISIÓN DE LITERATURA | 7 |
| 3.1. GENERALIDADES DEL PEPINO (<i>CUCUMIS SATIVUS</i> L.) | 7 |
| Antecedentes e importancia económica | 7 |
| Descripción botánica | 8 |
| Patrón de floración | 10 |
| Composición química del pepino | 11 |
| Requerimientos edafoclimáticos | 12 |
| 3.2. CULTIVO HIDROPÓNICO DE PEPINO | 14 |
| | vii |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.1. Hidroponía | 14 |
| 3.2.2. Solución nutritiva | 15 |
| 3.2.3. Sustratos para hidroponía | 16 |
| 3.2.4. Contenedores | 25 |
| 3.2.5. Sistemas de riego para pepino hidropónico | 29 |
| 3.3. DAÑOS FISIOLÓGICOS PRODUCIDOS POR ESTRÉS EN PEPINO | 31 |
| 3.3.1. Daños fisiológicos producidos por estrés salino | 32 |
| 3.3.2. Daños fisiológicos producidos por estrés hídrico | 34 |
| 3.3.3. Daños fisiológicos producidos por estrés debido a déficit nutrimental | 37 |
| IV. MATERIALES Y MÉTODOS | 38 |
| V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 50 |
| 5.1. Variables morfológicas | 50 |
| 5.2. Análisis nutrimental | 75 |
| 5.3. Componentes del rendimiento | 78 |
| VI. CONCLUSIONES | 85 |
| VII. LITERATURA CITADA | 86 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Composición química de la planta de pepino, con base a 100 g de peso fresco | 12 |
| Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de tezontle rojo empleado como sustrato hidropónico | 25 |
| Cuadro 3. Combinación de tratamientos de concentración de soluciones nutritivas, frecuencias de riego y volumen de sustrato para la producción de pepino hidropónico | 41 |
| Cuadro 4. Composición en mg por litro de la solución nutritiva concentrada al 100 % (alta), 75 % (media) y 50 % (baja) | 44 |
| Cuadro 5. Cuadrados medios y niveles de significancia para altura de planta y diámetro de tallo medidas a los 17 días después de trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato | 51 |
| Cuadro 6. Cuadrados medios y niveles de significancia para altura de planta, diámetro de tallo y área foliar medidas a los 30 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato | 52 |
| Cuadro 7. Cuadrados medios y niveles de significancia para diámetro de tallo y área foliar medidas a los 45 días después del trasplante en pepino | |

| | |
|--|----|
| hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato | 53 |
| Cuadro 8. Cuadrados medios y niveles de significancia para diámetro de tallo y área foliar medidas a los 80 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato | 54 |
| Cuadro 9. Cuadrados medios y niveles de significancia para los pesos secos de raíz, tallo, hoja, frutos y total a los 80 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato | 55 |
| Cuadro 10. Comparación de medias por efecto de la concentración de la solución nutritiva para altura de planta, diámetro de tallo y área foliar medidas a los 17, 30, 45, y 80 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato | 57 |
| Cuadro 11. Comparación de medias por efecto de la frecuencia de riego para altura de planta, diámetro de tallo y área foliar medidas a los 17, 30, 45, y 80 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato | 59 |
| Cuadro 12. Comparación de medias por efecto del volumen de sustrato para altura de planta, diámetro de tallo y área foliar medidas a los 17, 30, 45, y 80 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres | |

| | |
|---|----|
| concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato | 61 |
| Cuadro 13. Comparación de medias para pesos secos de raíz, tallo, hoja, de frutos y total a los 80 días después de trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato | 62 |
| Cuadro 14. Cuadrado medios y nivel de significancia para la extracción de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en hojas de pepino hidropónico cultivado en tezontle bajo tres concentraciones de solución nutritiva y tres frecuencias de riego | 75 |
| Cuadro 15. Comparación de medias para contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en hoja de pepino hidropónico cultivado en tezontle bajo tres concentraciones de solución nutritiva y tres frecuencias de riego | 77 |
| Cuadro 16. Cuadrados medios del rendimiento de fruto, número de fruto e índice de cosecha en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato | 78 |
| Cuadro 17. Comparación de medias del rendimiento de fruto, número de fruto e índice de cosecha en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato | 81 |

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en la altura de planta a los 17 días después del trasplante 65
- Figura 2. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en el diámetro de tallo a los 17 días después del trasplante 66
- Figura 3. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en la altura de planta a los 30 días después del trasplante 66
- Figura 4. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en el diámetro de tallo a los 30 días después del trasplante 66
- Figura 5. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en el diámetro de tallo a los 45 días después del trasplante 67
- Figura 6. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en la acumulación de peso seco en hojas a los 80 días después del trasplante 67

| | |
|---|----|
| Figura 7. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en la acumulación de peso seco total a los 80 días después del trasplante | 67 |
| Figura 8. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y el volumen de sustrato en la altura de planta a los 17 días después del trasplante | 69 |
| Figura 9. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y el volumen de sustrato en la altura de planta a los 30 días después del trasplante | 69 |
| Figura 10. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 30 días después del trasplante | 69 |
| Figura 11. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 45 días después del trasplante | 70 |
| Figura 12. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en la altura de planta a los 17 días después del trasplante | 71 |
| Figura 13. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 17 días después del trasplante | 71 |
| Figura 14. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en la altura de planta a los 30 días después del trasplante | 72 |

| | |
|--|----|
| Figura 15. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 30 días después del trasplante | 72 |
| Figura 16. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 45 días después del trasplante | 72 |
| Figura 17. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en el área foliar a los 45 días después del trasplante | 73 |
| Figura 18. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 80 días después del trasplante | 73 |
| Figura 19. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en la acumulación de peso seco en tallo a los 80 días después del trasplante | 73 |
| Figura 20. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en la acumulación de peso seco en hojas a los 80 días después del trasplante | 74 |
| Figura 21. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en rendimiento de fruto | 83 |
| Figura 22. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en el número de fruto | 83 |

RESUMEN

El objeto del presente estudio fue comparar el efecto de la combinación de una solución nutritiva base (N 200, P 50, K 240, Ca 290 y Mg 50 mg·L⁻¹) concentrada al 100, 75 y 50 %, con tres volúmenes de sustrato por planta (4, 8 y 12 L) y distintas frecuencias de riego al día (1, 3 y 7) pero con la misma lámina de riego diaria, sobre indicadores de crecimiento y rendimiento de pepino hidropónico cv. Paraíso. Se utilizó un diseño en bloques completos al azar y un arreglo de tratamientos en parcelas subdivididas con cuatro repeticiones, cuya unidad experimental estuvo conformada por seis plantas, despuntadas a un metro y medio de altura. No se encontraron diferencias significativas para los componentes del rendimiento, pero numéricamente el rendimiento más adecuado fue obtenido con una solución nutritiva concentrada al 75 %, que genera el mismo rendimiento de fruto (15.27 Kg·m²) que una normal al 100 %, pero implica un ahorro del 25 % en el consumo de fertilizantes; una frecuencia de tres riegos por día, con una producción de 16.05 Kg·m²; y con el uso de un volumen de 8 L de tezontle, con el cual fueron obtenidos 16.32 Kg·m² de pepino. Éstos resultados son consecuencia de un nivel óptimo de la concentración nutrimental en el sustrato con variaciones mínimas en la conductividad eléctrica por la aplicación de una alta frecuencia de riego, con lo cual se evitó la presencia de estrés hídrico en las plantas de pepino.

Palabras clave: *Cucumis sativus* L., estrés hídrico, conductividad eléctrica, tezontle.

ABSTRACT

The object of this study was to compare the effect of combining a nutrient solution (N 200, P 50, K 240, Ca 290 y Mg 50 mg·L⁻¹) concentrated at 100, 75 and 50 %, with three volumes of substrate per plant (4, 8 and 12 L) and diverse frequencies of watering per day (1, 3 and 7) but with the same irrigation quantity, on growth rates and yield from hydroponic cucumber cv. Paradise. A design in a randomized complete block and an arrangement of treatments in strip-split-plots with four replicates, whose experimental unit was formed by six plants, pruned it to a meter and a half tall was used. Significant differences were not found in yield components, but numerically the most appropriate yield was obtained with a nutrient solution concentrated at 75%, which generates the same yield (15.27 Kg·m²) that a normal solution 100%, but implies a saving of 25% in the consumption of fertilizers; altogether a frequency of three irrigations per day, with a production of 16.05 Kg·m²; and with the use of a volume of 8 L of volcanic rock, which were obtained 16.32 Kg·m². That as a result of an optimal level of concentration nutrient in the substrate with minimum electrical conductivity variations because of high frequencies of watering per day, thus avoided the presence of water stress in cucumber plants.

Key words: *Cucumis sativus* L., water stress, electrical conductivity, volcanic rock.

EFFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA, FRECUENCIA DE RIEGO Y VOLUMEN DE SUSTRATO EN LA PRODUCCIÓN DE PEPINO

I. INTRODUCCIÓN

El pepino (*Cucumis sativus* L.), consumido mayoritariamente en fresco, es una hortaliza de importancia económica para el mercado nacional. México encabeza la lista de países exportadores de este producto, con un valor de la producción traducido en una cifra superior a los 420 millones de dólares anuales (USDA, 2012). En el estado de Sinaloa se concentra la cuarta parte de la superficie sembrada, y su aportación en cuanto a rendimiento y valor de la producción de pepino oscila en el orden del 44 % del total nacional (SIAP, 2012).

En los últimos años, la agricultura protegida se ha constituido como un sistema de producción habitual para proteger aquellos cultivos vulnerables, principalmente las hortalizas, de los riesgos climatológicos, económicos y técnicos durante el ciclo de producción (Juárez *et al.*, 2011); y debido a los beneficios proporcionados por esta técnica, debería ser considerada como una alternativa sustentable de producción ante los efectos del cambio climático. En el caso particular de México, la SAGARPA reportó en el año 2012, una superficie aproximada de 20 mil hectáreas bajo estructuras de protección (invernaderos, mallas sombras y/o macrotúneles), con una tasa media de crecimiento anual señalada por Moreno *et al.* (2011) del orden del 34.5 %. El pepino,

ocupó el tercer lugar en importancia por la superficie sembrada bajo este concepto, representado una superficie aproximada del 10 % del total.

El régimen de producción de pepino bajo condiciones de agricultura protegida en México es similar a la situación observada en el cultivo del jitomate. En términos generales, en el Noroeste y Occidente del país se encuentran grandes productores, con alto poder adquisitivo, quienes con la ayuda de tecnología de punta, obtienen altos rendimientos y se encuentran enfocados primordialmente al mercado de exportación; por el contrario, en las regiones Centro y Sur, existen una gran cantidad de pequeños productores, de mediano y bajo poder adquisitivo, con un bajo nivel tecnológico, desorganizados, quienes provocan una sobreoferta de producto y carecen de canales específicos de comercialización (Carrillo, 2001; Gómez y Sánchez, 2003).

Debido a esta problemática, resulta imperante generar alternativas sustentables para pequeños productores del Centro y Sur del país, con el fin de mejorar sus condiciones de vida. Se plantea la producción de pepino bajo condiciones de hidroponía en invernadero como una opción viable adecuada, debido a su rápido crecimiento y alto rendimiento por unidad de superficie, con el empleo de tezontle como sustrato dada la abundancia y disponibilidad de este material y su bajo precio (Sánchez *et al.*, 1998).

Pese a las bondades del pepino, no se cuenta con paquete tecnológico definido para esta hortaliza, adecuado al contexto de los pequeños productores, siendo necesario considerar aspectos de su producción en invernadero, como los referentes al empleo de sustratos, al aporte hídrico y nutrimental y manejo agronómico, como despuntes y manejo de densidades de plantación (Ortiz *et al.*, 2009). Debido a ello, se pretende investigar y validar un paquete tecnológico adecuado,

diseñado específicamente para productores de las características de las regiones Centro y Sur del territorio nacional.

En primer término, se propone indagar sobre el volumen de tezontle necesario por planta para permitir el óptimo desarrollo de las raíces para la absorción de agua y nutrimentos, y así determinar el volumen adecuado, y por consecuencia, determinar el tamaño adecuado del contenedor.

En segundo lugar, se debe investigar acerca del suministro y la distribución del agua de riego durante el día, dado que el pepino es una hortaliza muy exigente en este sentido, derivado de una amplia lámina foliar, con una alta densidad estomática y protegida por una delgada película de cutícula. De acuerdo a lo anterior, también se plantea la pregunta de cuanto se puede reducir el volumen de sustrato, con la condición de incrementar la frecuencia de riegos.

Finalmente debe estudiarse aspectos de la nutrición mineral y de la salinidad, la cual se presenta como resultado del incremento en la cantidad de sales depositadas en el contenedor, cuando éstas son aportadas con el agua de riego en cantidades superiores a las absorbidas por las plantas o a las pérdidas por lixiviación. Una inadecuada distribución de sales y elementos minerales en la rizósfera, elevan el potencial osmótico de la solución nutritiva, alteran la conductividad eléctrica en el sustrato, causando problemas en el desarrollo normal de los cultivos (Sonneveld y Voogt, 2009). Se debe considerar que entre la aplicación de riegos, la solución nutritiva se modifica diferencialmente y provoca oscilaciones de salinidad entre riegos. Por ello, dependiendo de la frecuencia de éstos, se plantea el estudio de soluciones nutritivas más diluidas en conjunción con alta frecuencia de riego, de tal forma que las plantas de pepino absorban los nutrimentos en forma

más continua, evitando así los desbalances de la solución en el sustrato. Se esperaría que el empleo de soluciones más diluidas redujera el consumo de fertilizantes, y por lo tanto contribuyera a mejorar el ingreso económico de los productores (Ávila, 2001). Desde la perspectiva ambiental, se esperaría una menor contaminación del suelo por lixiviados o drenajes provenientes de los sistemas hidropónicos, minimizando así la salinización progresiva. (FAO, 2002).

De acuerdo a lo anterior, para contribuir al desarrollo de un paquete tecnológico de producción de pepino hidropónico adecuado a las condiciones de los productores en invernadero del Centro y Sur de México, se plantea la necesidad de estudiar los efectos del empleo de diferentes volúmenes de arena de tezontle en combinación con la aplicación de diferentes frecuencias de riego de riego durante el día y a diferentes concentraciones de solución nutritiva, sobre la cantidad de materia seca y el rendimiento de pepino.

II. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1. Objetivo General

Comparar el efecto de diferentes concentraciones de solución nutritiva, volúmenes de sustrato y número de riegos sobre el crecimiento, la producción de materia seca y el rendimiento de fruto de plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) hidropónico.

2.2. Objetivos Particulares

Determinar la concentración óptima de solución nutritiva sobre el crecimiento, la producción de materia seca y el rendimiento de fruto plantas de pepino hidropónico.

Determinar el volumen de sustrato óptimo en plantas de pepino hidropónico para optimizar el crecimiento, la producción de materia seca y el rendimiento de fruto.

Determinar la frecuencia de riegos más adecuada por día aplicados a plantas hidropónicas de pepino en función del volumen de sustrato y de la concentración de la solución nutritiva.

2.3. Hipótesis

Para una misma lámina de agua aplicada al día, una alta frecuencia de riego en combinación con un suficiente volumen de sustrato por planta permite disminuir la concentración de la solución nutritiva, sin efectos negativos en el crecimiento y en la producción y calidad del fruto de pepino.

Al combinar una alta frecuencia de riego con una solución nutritiva estándar, no se producen efectos negativos en el crecimiento ni en la producción y calidad de frutos de pepino, utilizando un volumen reducido de sustrato por planta.

Con un volumen de sustrato reducido se puede producir estrés hídrico y cambios drásticos en la conductividad eléctrica de la solución nutritiva en la rizósfera a un grado tal que afecten, tanto el crecimiento como el rendimiento de planta de pepino, a menos que la frecuencia de riego sea alta.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Generalidades del pepino (*Cucumis sativus* L.)

Antecedentes e importancia económica

El pepino (*Cucumis sativus* L.) es una planta originaria de las regiones del trópico húmedo de la India o del sureste de Asia, y ha sido cultivado desde hace más de 3,000 años; luego fue llevado a Europa propagándose en Grecia e Italia. Posteriormente fue introducido en Inglaterra en el Siglo XIV y finalmente llegó a América en el año de 1539 (Lower y Edwards, 1986; Decoteau, 2000).

Según George (1999), esta especie ha sido ampliamente cultivada a nivel mundial por sus frutos comestibles, los cuales son consumidos fundamentalmente en fresco para ensaladas, mientras que los frutos de tipo pequeño, mejor conocidos como pepinillos, son empleados para la elaboración de encurtido, aunque particularmente en algunas regiones de Asia. Las hojas jóvenes son consumidas en crudo o cocinadas, en forma similar a las espinacas. El pepino es cultivado tanto en campo abierto en regiones libres de heladas como en invernaderos en regiones templadas, bajo los principios de protección térmica; en este último caso, se emplean cultivares partenocárpicos, que no requieren de polinización.

De acuerdo con datos de Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), organismo dependiente de la Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (SAGARPA), durante al año 2012 la superficie cultivada de pepino en México fue superior a las 15 mil hectáreas, de las cuales, se obtuvo una producción total de 640,507

toneladas, con un rendimiento promedio de 41 toneladas por hectárea. Esto representó una ganancia económica por encima de los dos millones de pesos anuales, y cuyo destino en su mayoría es la exportación hacia los Estados Unidos.

Descripción botánica

Es una planta herbácea de ciclo anual cuyo hábito de crecimiento es tipo rastrero de ciclo vegetativo corto. La raíz principal de origen seminal, es de tipo columnar típica, capaz de alcanzar profundidades de 1.20 m, aunque bajo los sistema hidropónico, ésta es de tipo fascicular, debido al mayor acceso a nutrientes en este sistema, con profundidades limitadas por la altura y tamaño del contenedor (Rodríguez, 1986; Valadéz, 1990). Guenkov (1974) indica que el sistema radical se encuentra desarrollado a una profundidad entre 0.25 y 0.30 m, y su crecimiento se encuentra influenciado por la aireación del suelo.

El tallo es ramificado, rastrero o trepador, angular y veloso, dependiendo de la variedad y condiciones ambientales, crece hasta una longitud de 0.7 a 2.5 m y en forma lateral de 1.5 a 2.1 m, debido a las yemas axilares. De él, opuesto a las hojas, nacen zarcillos simples que le son de utilidad a la planta para el tutorado vertical. Las hojas están constituidas por una lámina foliar simple, de forma palmeada, pentalobuladas, pubescentes, con la presencia de bordes aserrados y su tamaño depende de la variedad. Las células de la epidermis tienen cutícula delgada, por lo que la planta presenta poca resistencia a una excesiva transpiración (Guenkov, 1974; Adamson y Mass, 1981).

Las flores, son unisexuales, actinomorfas, de color amarillo y axilares. Las flores masculinas se desarrollan antes que las femeninas, y se forman en corimbos en las axilas de las hojas en grupo de tres a cinco flores, con pedúnculos delgados y vellosos; tienen el cáliz acampanado, con cinco dientes acuminados, en forma de punzón; corola adherente al cáliz, en forma de campana, venosa, arrugada y con cinco divisiones: el disco central es trígono, truncado, cubierto por los estambres, que pueden ser en número de tres o cinco (dos por dos adheridos y uno libre). Las flores femeninas, generalmente solitarias, tienen la corola y el cáliz como las masculinas, pero más grandes y de color más intenso; cuentan con tres filamentos estériles, un estilo y tres estigmas bífidos; el ovario es ínfero (flores epigineas), de forma alargada. Los granos de polen son largos, el estigma es receptivo durante el día pero su máxima capacidad es por la mañana (Lawrence, 1951; Guenkov, 1974; Maroto, 1983; Tamaro, 1987).

Todas las yemas son potencialmente bisexuales y con el tiempo la planta desarrolla en ellas un sexo en función del genotipo, la situación del botón floral y las influencias hormonales y ambientales. Cuando el fotoperiodo es largo, mayor a 12 horas luz, y con altas temperaturas se producen más flores masculinas; mientras que con el fotoperiodo corto aumenta el número de flores femeninas; la polinización es entomófila siendo las abejas los principales agentes polinizadores (Whitaker y Davis, 1962; Halfacre, 1979; Maroto, 1983; León, 1987).

En cuanto al fruto, éste se trata de un pepónide, indehisciente, de forma cilíndrica; el epicarpio es generalmente de color verde en diferentes tonalidades, liso o con abultamientos y en los primeros estadios de desarrollo puede preservar espinas blancas que posteriormente caen; el tamaño varía de acuerdo a la variedad, desde 5 hasta 40 cm de longitud; tiene lóculos bien pronunciados al exterior, siendo por lo general tres. Las semillas (de 30 a 40 semillas por gramo) son planas,

ovaladas, y de color amarillento, aguzadas en las extremidades (Guenkov, 1974; Maroto, 1983; León, 1987).

Patrón de floración

Las plantas de pepino comúnmente son monoicas, es decir que posee flores masculinas y femeninas en una misma planta, ambas productoras de néctar, de polinización cruzada. Asimismo, existen variedades que se caracterizan por poseer flores hermafroditas (Guenkov, 1974). Los frutos son producidos progresivamente en los nudos acrópetamente, su tamaño y forma están relacionados con la producción de semillas, así una pobre fecundación de los óvulos causa aborto, deformación y poco amarre de frutos (Swiader *et al.*, 1992).

Existen además variedades ginoicas, es decir plantas que han sido desarrolladas para proveer rápida y exclusivamente flores femeninas. Estas variedades requieren de una fuente de flores masculinas para que se lleve a cabo el proceso de polinización, por lo que las semillas comerciales se mezclan con alrededor de 10-15 % de semillas productoras de plantas monoicas (Delaplane y Mayer 2000; Swiader, *et al.*, 1992). En plantaciones con este tipo de variedades, las abejas son especialmente importantes para la polinización; así, el número de frutos abortados es bajo (Stanghellini *et al.*, 1998).

Existen líneas similares a las ginoicas donde predominan las flores femeninas, referidas comúnmente como cultivares “PF”. Estos híbridos no son completamente ginoicos pues producen algunas flores masculinas, aunque en mucho menor proporción que en las variedades monoicas,

esto varía fuertemente dependiendo del cultivar y de las condiciones ambientales (Swiader *et al.*, 1992).

Maroto (1983), Swiader *et al.*, (1992) y George (1999) mencionan que algunas variedades tienen la particularidad de producir frutos partenocárpicos es decir, sin fecundación. Esau (1985) define a la partenocarpia como la formación de frutos sin el desarrollo de semilla ni fecundación. Esta es una propiedad importante en la producción de cultivos bajo invernadero, ya que en estas condiciones es difícil disponer de los insectos necesarios para la polinización; asimismo, la partenocarpia es favorecida por factores adversos del ambiente que incidan de 10 a 15 días después de la germinación.

Composición química del pepino

El pepino se caracteriza por ser una hortaliza con un aporte calórico mínimo, debido al reducido contenido de carbohidratos y al elevado contenido de agua en los frutos, además de estar libres de grasas y contiene bajas concentraciones de sodio (Cuadro 1).

A lo largo de todas las estructuras de la planta, Zitter *et al.* (2004) señalan que se encuentran presentes otros compuestos naturales, denominados cucurbitacinas, las cuales son las encargadas de proteger a las plantas del ataque de insectos y otros animales herbívoros, incluido el hombre, las cuales confieren un sabor amargo al pepino, aunque generalmente en las especies cultivadas, se encuentran en bajas concentraciones.

Cuadro 1. Composición química de la planta de pepino, con base a 100 g de peso fresco

| ELEMENTO | CANTIDAD | UNIDAD |
|-----------------|-----------------|---------------|
| Energía | 12 - 13 | Kcal |
| Agua | 96.01 | g |
| Proteína | 0.5 – 0.57 | g |
| Grasa | 0.1 – 0.16 | g |
| Carbohidratos | 2.5 – 2.9 | g |
| Fibra | 0.6 – 0.7 | g |
| Cenizas | 0.28 | g |
| Calcio | 14 | mg |
| Fósforo | 17 – 21 | mg |
| Fierro | 0.16 – 0.3 | mg |
| Sodio | 2 | mg |
| Potasio | 149 | mg |
| Vitamina A | 45 | IU |
| Tiamina | 0.021 – 0.03 | mg |
| Rivoflavina | 0.011 – 0.02 | mg |
| Niacina | 0.104 – 0.3 | mg |
| Ácido ascórbico | 2.8 – 4.7 | mg |
| Vitamina B12 | 0.05 | mg |

Fuente: Elaboración propia, adaptado de Castaños (2000) y USDA (2012).

Requerimientos edafoclimáticos

El pepino es una hortaliza cultivada en el ciclo primavera - verano, aunque en la actualidad es factible de adquirirse durante todo el año gracias a los cultivos de invernadero (SIAP, 2012).

Con respecto a los requerimientos térmicos, Guenkov (1974) indica que es una hortaliza exigente en calor para su cultivo, y de acuerdo al balance adecuado de su cultivo depende la calidad y cantidad de fruto. Se reporta que la temperatura óptima para el crecimiento y desarrollo de las plantas oscila entre los 18 y 30 °C, puesto que a temperaturas menores de 14 °C cesa el crecimiento, helándose a una temperatura de -1 °C. En caso de que la temperatura supere los 30 °C, el balance nutrimental y de humedad se altera, disminuyendo la productividad de las plantas,

y en el caso de plantas dioicas, se incrementa el número de flores masculinas; cuando la temperatura es superior a los 40 °C, el crecimiento se detiene completamente. La oscilación térmica no debe sobrepasar los 8 °C. En el caso de la fase germinativa, las semillas tienen un requerimiento térmico óptimo entre los 20 y 25 °C diurno, y entre 18 y 22 °C nocturno, siendo necesario una temperatura mínima de 12 °C para germinar (Serrano, 1979; Resh, 2006).

Con referencia al fotoperiodo, Maroto (1983) señala que los días cortos y las temperaturas relativamente bajas favorecen la formación de flores femeninas, mientras que los días largos y las temperaturas altas propician la formación de flores masculinas. En cuanto a la intensidad lumínica, reporta que existen variedades capaces de soportar hasta 1900 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ de radiación fotosintéticamente activa (RFA) sin saturarse, aunque en general Guenkov (1974) reconoce al pepino como una planta que soporta con relativa facilidad cierta disminución en la intensidad lumínica, puesto que por el contrario, un exceso provoca destrucción de las clorofilas teniendo como resultado hojas amarillo – verdosas.

En lo referente al balance de humedad del suelo y del aire, el pepino es una planta muy exigente debido a que posee un sistema radicular débil y al mismo tiempo tienen una alta densidad estomática en las hojas, provocando tasas elevadas de transpiración. Para obtener un adecuado desarrollo y fructificación, la humedad del suelo debe oscilar entre el 70 y 80 % a capacidad de campo, en combinación con una humedad relativa del aire oscilante entre el 80 y el 90 %; la falta de humedad en el suelo produce frutos poco desarrollados y deformes, envejecimiento prematuro en las plantas y aumenta notablemente el porcentaje de frutos amargos (Guenkov, 1974; Mortensen, 1986). Debe evitarse la aplicación de un riego excesivo, puesto que se reduce

rápidamente el porcentaje de aire en el suelo y esto afecta al sistema radical, el cual es muy sensible a factores en el sustrato como el contenido de humedad, temperatura, porosidad, compresibilidad, suministro de oxígeno, nivel de toxinas y patógenos, y del aporte de nutrimentos (Wild, 1992).

En cuanto a los requerimientos edáficos, el pepino prospera favorablemente en suelos fértiles, de estructura arcillo - arenosa, para evitar excesos de agua pero a la vez buena retención de humedad, con un pH ligeramente ácido entre 6.5 y 7 (Guenkov, 1974).

3.2. Cultivo hidropónico de pepino

3.2.1. Hidroponía

De acuerdo Guzmán (2004), la expresión hidroponía proviene del griego *hydros* (ὕδωρ) o *hudos* que significa agua, y *ponos* (πονός), que significa trabajo o actividad, la cual, literalmente significa el trabajo o la actividad del agua. En términos actuales, se describe como una técnica o sistema de producción alternativo del cultivo de plantas, en el cual las raíces de las mismas son irrigadas con una solución de elementos minerales nutritivos esenciales disueltos en el agua de riego, mediante un soporte distinto del suelo, utilizando como sustrato un material inerte y estéril o incluso la solución nutritiva misma (Sánchez y Escalante, 1988).

La hidroponía tiene como objetivo primordial, colocar en un ambiente favorable a la raíz de los cultivos, para que ésta cumpla con sus funciones y proporcione en forma adecuada y oportuna los nutrimentos y fitohormonas requeridos por la parte aérea. Para ello, el sistema radical requiere contar con agua suficiente para formar los tejidos y mantener la corriente respiratoria; también requiere de los minerales esenciales en cantidades suficientes y balanceadas, de oxígeno suficiente para mantener la respiración celular, de una temperatura adecuada para el funcionamiento óptimo de la raíz; que el ambiente se encuentre libre de organismos fitopatógenos (plagas, inóculos de enfermedades o maleza), y que se encuentre libre de sales nocivas, elementos tóxicos o desbalances de pH o CE; también se requieren condiciones de oscuridad para evitar competencia por el desarrollo de algas; y finalmente, de espacio adecuado para crecer lo necesario (Sánchez y Escalante, 1988; Vázquez *et al.* 2003; Jones, 2005).

3.2.2. Solución nutritiva

Se debe entender como la disolución de aquellos elementos minerales en agua, con la cual son regadas las plantas, cuyo objetivo es proporcionar los nutrimentos requeridos por éstas en las proporciones adecuadas (Sánchez y Escalante, 1988; Resh, 2006). De hecho, la solución nutritiva influye sistemáticamente en el desarrollo de los cultivos hidropónicos, por lo cual, éstas deben realizarse mezclando los nutrimentos en las relaciones o proporciones relativas, de manera similar a las encontradas en las plantas. Existen dos relaciones fundamentales: la primera relación está constituida por las formas aniónicas: NO_3^- , H_2PO_4^- , HPO_4^{-2} , PO_4^{-3} y SO_4^{-2} , y en la segunda relación intervienen los cationes NH_4^+ , K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} .

La preparación de una solución nutritiva específica depende de tres condiciones: de la técnica hidropónica implementada, la frecuencia y asimilación de la solución nutritiva por las raíces, y de los requerimientos nutrimentales del cultivo (Jones, 2005)

Al momento de preparar las soluciones nutritivas, debe tomarse en cuenta el grado de solubilidad de los fertilizantes empleados como fuentes de nutrimentos. La solubilidad se define como la medida de la concentración de sal que permanece en solución cuando esta disuelta en el agua, siendo requisito para los sistemas hidropónicos el empleo de fuentes de fertilizantes altamente solubles (Resh, 2006). Adicional a éste punto, debe considerarse también el costo de los fertilizantes empleados al elaborar la solución nutritiva, en congruencia con Tejo (2002) quien señala la necesidad de desarrollar sistemas de producción rentables desde el punto de vista del empleo de fertilizantes. No obstante, se recomienda el empleo de aquellas fuentes con grado o calidad invernadero, pues si bien su costo es mayor sobre una calidad estándar, la solubilidad es igualmente mayor, y generan mayores beneficios para la planta, que se traducirán al final del ciclo de producción en beneficios económicos.

3.2.3. Sustratos para hidroponía

Los sustratos son definidos como cualquier material de consistencia sólida distinto del suelo, de génesis natural, de síntesis o residual, de naturaleza mineral u orgánica, que una vez colocado dentro de un contenedor, bien sea en forma pura o mezclada con otros sustratos, permite el anclaje del sistema radical de la planta, y se constituye en el soporte para la misma. Dicho

sustrato puede o no intervenir químicamente en el proceso de la nutrición de la planta (Díaz, 2004; Abad *et al.*, 2005; Pérez y Castro, 2011).

Los sustratos son clasificados de acuerdo a sus propiedades físicas, químicas y biológicas. El adecuado desarrollo de los cultivos depende, en cierta medida de las características propias del sustrato empleado, de tal forma que se desea que éstos proporcionen un alto porcentaje de porosidad, para permitir la retención de agua y que contengan la cantidad aire adecuada para la oxigenación de la raíz; una alta conductividad hidráulica o capilaridad, para que la raíz tenga mayor disponibilidad de la solución; inercia química, para tener un control eficiente de la nutrición mineral, que incluye una baja o nula capacidad de intercambio catiónico (CIC) y alta capacidad amortiguadora o buffer; estabilidad y duración a lo largo del tiempo; que sea estéril o de fácil esterilización, para evitar ser fuente de organismos fitopagénos y sustancias tóxicas; económico; que se encuentre disponible fácilmente en la localidad de producción; y finalmente que sean de bajo costo económico (Ansorena, 1994; Vázquez *et al.*, 2003; Adams, 2004).

Dado que resulta difícil encontrar un sustrato que cumpla en su totalidad con las características deseables anteriormente descritas, se debe elegir aquel que cubra con algunas de ellas, que sea abundante en la región y de bajo costo, pudiendo ser empleados en forma pura o bien en combinación de varios, hasta adquirir las cualidades idóneas para el desarrollo de la planta (Vázquez *et al.*, 2003). En el caso de pepino hidropónico, diversos autores concuerdan en que las propiedades del sustrato influyen directamente en el rendimiento (Maloupa *et al.*, 2001; Gómez *et al.*, 2006; Gül *et al.*, 2007; Gajc *et al.*, 2008; Piróg *et al.*, 2010; Naddaf *et al.*, 2011)

Propiedades físicas

Antes de realizar la elección del sustrato, es indispensable considerar las propiedades físicas de los sustratos, puesto que una vez colocado dentro del contenedor y establecido el cultivo, será imposible modificarlas, siendo éstas:

Granulometría. Abad *et al.* (2005) refieren éste término a la distribución del tamaño de partículas, expresada como índice de grosor, el cual está definido como el porcentaje acumulado (en masa y volumen) de partículas con diámetro superior a 1mm.

Porosidad. Se refiere a la cuantificación en volumen total del sustrato que no se encuentra ocupado por partículas sólidas, orgánicas o minerales; es decir, es el volumen ocupado por aire o agua en cierta proporción (Abad *et al.*, 2005; Burés, 1997). Existen dos tipos de porosidad: una externa, generada por el propio empaquetamiento¹ de las partículas; y otra interna, que puede ser abierta, que tienen conexión con el sistema de poros externos – percolantes - o bien cerrada, sin conexión con los poros externos – no percolantes -. Se encuentra expresado en porcentaje, producto del cociente entre el volumen de poros (V_p) y el volumen total que el medio ocupa en el contenedor (V_t). El valor óptimo respecto a este parámetro, debe ser superior al 85 %, aunque un valor superior al 45 % se considera aceptable (Ansorena, 1994).

La capacidad de aireación. Es la proporción del volumen del sustrato que contiene aire después de que ha sido saturado con agua y dejado drenar, generalmente a 10 cm de tensión de columna de agua. Está relacionado con la cantidad de macroporos, siendo éstos los espacios que deja el

¹ Se refiere al movimiento relativo de las partículas y a sus propiedades (composición, masa, densidad, compresibilidad, rugosidad, estructura interna, forma, características superficiales, isotropía y tamaño).

agua y por donde circula el oxígeno. De manera general, el nivel óptimo para un sustrato oscila entre el 20 % y 30 % en volumen (Abad *et al.*, 2005).

La retención de humedad. Es la diferencia en volumen de agua retenida por el sustrato después de haber sido saturado con agua y dejado drenar a 10 cm de tensión (mátrica), y el volumen de agua presente en dicho sustrato a una succión de 50 cm de columna de agua (c.a.) (Abad *et al.*, 2005). Esta correlacionada con el contenido de microporos, los cuales son los responsables de atrapar el agua y mantenerla adherida al sustrato, venciendo la fuerza gravitacional.

Existe una curva de liberación de agua, producto de la relación no lineal entre el potencial matricial (Ψ_m) con el contenido de agua del sustrato (Θ) basada en el establecimiento de tensiones entre 0 y 100 cm a los sustratos situados en embudos de Haines mediante un sistema de vasos comunicantes (Burés, 1997). Se pueden establecer cuatro niveles de agua en el sustrato:

- 1) El agua fácilmente disponible (AFD) hace referencia a la diferencia que existe entre, el volumen de agua retenida por el sustrato después de haber sido saturado con agua y que ha drenado a 10 cm de tensión matricial, y el volumen de agua presente en dicho sustrato a una succión de 50 cm de c.a. El nivel óptimo oscila del 20 al 30 % (Abad *et al.*, 2005). Constituye la humedad aprovechable para las plantas retenida en los poros, que puede ser extraída fácilmente por las raíces (Bastida, 2002).
- 2) El agua de reserva (AR) es la cantidad de agua (porcentaje en volumen) que libera un sustrato al pasar de 50 a 100 cm de c.a. El nivel óptimo se encuentra entre el 4 y 10 %

(Abad *et al.*, 2005). Bastida (2002) indica que es el agua que llegan a aprovechar las plantas, extrayéndola más difícilmente que la AFD.

- 3) El agua disponible (AD) se encuentra constituida por el AFD y el AR, es decir, el total de agua entre los 10 y 100 cm de tensión. El rango óptimo se establece entre 24 y 40 % del volumen que ocupa un sustrato en un contenedor (Bastida, 2002).
- 4) El agua difícilmente disponible (ADD) constituye el agua retenida, dentro de los microporos, tras aplicar una tensión de 100 cm. Esta fuerza es superior a la que pueden utilizar las raíces de las plantas para extraer el agua siendo por lo tanto, inaprovechable (Bastida, 2002).

El agua de gravedad o saturación. Es aquel porcentaje de agua que ocupa los macroporos de un sustrato en estado de inundación, que drena rápidamente por la acción de la gravedad (Aguilera y Martínez, 1996)

La densidad aparente (d_a). Se define como la materia seca contenida en un centímetro cúbico de medio de cultivo (Ansorena, 1994). Indica indirectamente la porosidad del sustrato y su facilidad del transporte y manejo, siendo los valores ideales entre 0.7 y 1.0 g·cm⁻³ (Pérez y Castro, 2011).

La densidad real (d_r). Es definida como el cociente entre la masa de las partículas del medio de cultivo y el volumen que ocupan, son considerar los poros y huecos; su valor es propio de cada material y no depende del grado de compactación ni del tamaño de partícula (Ansorena, 1994). Tiene un interés relativo, y oscila entre valores de 2.6 a 3 g·cm⁻³ (Pérez y Castro, 2011).

Propiedades químicas

Las propiedades químicas de los sustratos se especifican de acuerdo a la transferencia de materia entre el sustrato y la solución nutritiva que alimenta a las plantas a través de las raíces, por efecto de disolución e hidrólisis, interacción de cargas electrostáticas, y la degradación de la materia orgánica (Burés, 1997; Pérez y Castro, 2011). Dichas propiedades son:

La capacidad de intercambio catiónico (CIC). Es definida como la capacidad de un sustrato de adsorber e intercambiar iones, es decir es la suma de los cationes que puede ser adsorbidos por unidad de peso (o volumen) del sustrato, quedando así retenidos y disponibles para la planta, que no han sido lixiviados ni formado precipitados (Ansorena, 1994; Burés, 1997; Abad *et al.*, 2005).

La disponibilidad de nutrimentos. Se refiere a la cantidad y frecuencia de la fertilización, que depende de las características de cada sustrato (CIC) y del régimen de riego establecido (Abad *et al.*, 2005).

Salinidad. Se refiere a la concentración de las sales solubles presentes en la solución del sustrato. En una solución acuosa, se mide por su contenido en sales disueltas ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ o ppm) o por su capacidad para conducir la corriente eléctrica ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ o $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) (Ansorena, 1994; Burés, 1997; Abad *et al.*, 2005).

Según Sonneveld (2004), la salinidad en los cultivos sin suelo en invernadero es expresada como la CE de la solución nutritiva. Sin embargo, los cambios graduales desde las condiciones adecuadas para la nutrición de las plantas hasta las condiciones de estrés salino requieren de una delimitación precisa entre la concentración de nutrimentos y los índices de salinidad.

De manera directa, Lara (2000) señala que la conductividad eléctrica (CE) de la solución nutritiva influye en la nutrición de las plantas: por ejemplo, cuando se presenta un valor de CE mayores a 6 dS m^{-1} , se induce un diferencial de absorción entre los nutrimentos y, por lo tanto, desbalance entre éstos; pero una CE menor que 2 dS m^{-1} , puede ser deficiente, sobre todo en los lugares o temporadas frías.

Abad *et al.* (2004) señalan como causales del incremento en la salinidad en un sustrato, las siguientes:

- a) La presencia de fertilizantes insolubles, en particular los de liberación lenta, cuando se mineralizan para producir nitratos o bien, cuando liberan sales mediante difusión, en una cantidad superior a las cantidades absorbidas o lixiviadas.
- b) Cuando la cantidad de sales aportadas con el agua de riego o la solución nutritiva es superior a las cantidades absorbidas por la planta o las pérdidas por lixiviación.
- c) Cuando el sustrato presenta una elevada CIC y al mismo tiempo, se descompone con el transcurso del cultivo, liberando nutrimentos.

El potencial de hidrógeno (pH). Las moléculas de agua tienden a disociarse en iones hidrógeno (H^+) e hidroxilo (OH^-). De esta forma, se denomina a una solución como ácida si la concentración de iones H^+ excede a la de OH^- y básica en caso contrario, siendo neutra cuando se encuentran en equilibrio (Burés, 1997). Ortiz-Villanueva y Ortiz (1990), señalan que es el criterio más ampliamente usado para juzgar si un suelo, sustrato o solución es ácido, cuando el pH oscila entre valores de 4 y 7 unidades, o bien, básico o alcalino, cuando el pH presenta valores

por encima de 7. Como lo indican Aguilera y Martínez (1996), el término pH es una forma conveniente de expresar la actividad del ión hidrógeno que existe en una solución acuosa.

El pH tiene influencia directa e indirecta sobre la disponibilidad de nutrientes, la absorción de éstos por las raíces de las plantas e indica el tipo de plantas que pueden desarrollarse mejor en un medio (Ortiz-Villanueva y Ortiz, 1990). En un sistema hidropónico con sustrato inerte, el pH de la solución nutritiva debe estar oscilar de 5.5 a 6.0, y de 6.0 a 6.5 para cultivos en suelo (Pérez y Castro, 2011).

Si el pH de la solución nutritiva es muy elevado debido a la alcalinidad del agua, se debe agregar un ácido como el sulfúrico (H_2SO_4), el fosfórico (H_3PO_4) o el nítrico (HNO_3) para alcanzar el valor de pH recomendado. En cambio, si es ácido, se pueden agregar bicarbonato de potasio ($KHCO_3$) o hidróxido de potasio (KOH) (Pérez y Castro, 2011).

La capacidad tampón o Buffer. Es la medición del poder amortiguador sobre cambios rápidos de pH provocados por la adición de fertilizantes de carácter ácido o básico al sustrato y se estima mediante las curvas de valoración del sustrato frente a los ácidos y las bases (Burés, 1997).

Tezontle

El tezontle, también conocido como arena o escoria volcánica, es un material procedente de las erupciones volcánicas, formado por fragmentos de la lava porosa y ligera, emitida y enfriada de golpe a temperaturas entre los 800 y 1000 °C, presenta partículas redondeados o irregulares con un tamaño entre de 2 a 50 mm; se encuentra constituido primordialmente por aluminio silicatos, y

en menor medida por hierro, manganeso, calcio y magnesio (Burés, 1997; Savvas and Passam, 2002; Raviv & Lieth, 2008). En México, es un material económico disponible en grandes depósitos, principalmente en el Eje Neovolcánico Transversal (Bastida, 2002).

Su principal uso es para balastre de caminos y en la construcción, y recientemente se ha incorporado como sustrato hidropónico en la horticultura. En este último caso, se emplean tres tipos de tezontle: uno de color negro, que se encuentra ligeramente erosionado; otro de color amarillo, producto de la erosión del negro; y finalmente el rojo, cuyo color es atribuible a la presencia hierro en forma férrica (Burés, 1997).

Vázquez *et al.* (2003) recomiendan el uso del tezontle rojo para cultivos hidropónicos, dado que posee una porosidad entre el 60 y 70 %, con alta porosidad interna, ofrece un buen drenaje y aireación, retiene suficientemente la humedad, no libera sustancias nutritivas ni tóxicas, alcaliniza ligeramente la solución nutritiva, tiene baja CIC, es económico y accesible (Cuadro 2). En complemento, Burés (1997) señala que la retención de humedad es inversamente proporcional al tamaño de partículas, es decir, las partículas pequeñas tienen alta retención de humedad, mientras que partículas grandes tienen baja retención de humedad.

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas de tezontle rojo empleado como sustrato hidropónico

| PROPIEDAD | RANGO | UNIDAD |
|-----------------------------------|--------------|--------------------------------|
| Densidad aparente | 0.682 - 1.27 | $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ |
| Densidad real | 2.14 - 2.65 | $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ |
| Espacio poroso total | 45 - 75 | % |
| Capacidad de aireación | 5 - 58.68 | % |
| Capacidad de retención de humedad | 27 - 40 | % |
| Agua fácilmente disponible | 2.86 - 6.55 | % |
| Agua de reserva | 1.63 - 2.25 | % |
| Agua difícilmente disponible | 7.89 - 14.31 | % |
| pH | 4.6 - 7.35 | |
| Conductividad eléctrica | 0.02 - 0.15 | $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ |
| Nitrógeno | 6 | $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ |
| Fósforo | 0.31 - 9 | $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ |
| Potasio | 2.74 - 52 | $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ |
| Calcio | 330 | $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ |
| Magnesio | 25 | $\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$ |
| Materia orgánica | 0 | % |

FUENTE: Adaptado de Martínez y García (1993) citado por Bastida (2002); Burés, (1997); Pineda *et al.*, (2008); Vargas *et al.* (2008); Vargas *et al.* (2014); Trejo *et al.* (2013).

3.2.4. Contenedores

Se entiende que son aquellos recipientes, de distintos tamaños, formas y materiales, en donde es contenido el sustrato sobre el cual son cultivadas las plantas (Sánchez y Escalante, 1988). Comercialmente, los tipos más empleadas son bolsas, macetas, sacos, tubos horizontales o verticales, canaletas, tinas o camas; los materiales de elaboración más comunes son aquellos derivados del petróleo, como polietileno (PE), poliestireno (PS), policloruro de vinilo (PVC); madera, cemento y materiales para la construcción, o metálicos. En cuanto a la forma del contenedor, ésta puede ser cilíndrica, cuadrada, rectangular, cónica truncada, etc. Con respecto al

tamaño del contenedor, se puede afirmar que es el parámetro con mayor variabilidad. Urrestarazu (2004) señala que los contenedores para una sola planta presentan los mayores inconvenientes en cuanto al incremento del costo de producción, pero dificultan la propagación de organismos fitopatógenos.

El tamaño del contenedor en interacción con las características del sustrato genera un ambiente que afecta el crecimiento de las raíces, brotes apicales y distribución y acumulación de biomasa; asimismo, influye en la fotosíntesis, contenido de clorofila en hojas, relación de agua en la planta, absorción de nutrientes, respiración, floración y rendimiento de las plantas (Cantliffe, 1993; Nesmith y Duval, 1998), también influye en la precocidad a la cosecha y el rendimiento final del cultivo (Walters *et al.*, 2005).

Por su parte, Sánchez y Escalante (1998), hacen referencia a la altura o profundidad del contenedor, y determinaron que ésta tiene un efecto marcado sobre el contenido en aire del sustrato: cuanto más alto es el contenedor, mayor es el contenido en aire. De esta forma, cuando se emplean contenedores poco profundos, son preferibles los sustratos de textura gruesa para mantener una aireación adecuada.

En el almácigo, el tamaño del contenedor afecta la germinación, emergencia, crecimiento y desarrollo de la plántula (Leskovar y Stoffella, 1995). Moreno *et al.* (2011) probaron en plántulas de pepino que se incrementó la longitud, el volumen y el peso seco de raíz, así como el área foliar y el diámetro de tallo al aumentar el volumen de la cavidad donde se desarrollaron las plántulas, con una mayor concentración de N y K en hojas.

Sánchez *et al.* (2012) encontraron en plántulas de jitomate que en cuanto al aumento en volumen del sustrato basado solamente en profundidad no resulta ser efectivo para promover efectos positivos en el vigor de la plántula ni en rendimiento final. En un trabajo previo, Haghuis (1990) comparó el efecto de dos sustrato (lana de roca y poliuretano) combinado con cuatro volúmenes de sustrato por contenedor (9.7, 7.2, 4.8 y 2.4 L · planta⁻¹) y sometidos a dos láminas de riego (75 ó 150 cm³ por riego) en dos cultivares de pepinos cultivados bajo condiciones de invernadero, durante el invierno y verano; en el primer experimento, no encontró diferencias significativas en el rendimiento de fruto; en cambio, durante el ciclo de verano, encontró que, sin importar el tipo de sustrato empleado, el menor volumen de contenedor redujo el rendimiento de fruto, y que a una mayor intensidad de riego, el rendimiento fue incrementado.

Por su parte, Gül *et al.* (2009) evaluaron el efecto de diferentes contenedores (bolsas de polietileno, macetas y camas) sobre el crecimiento (longitud de tallo y número de entrenudos) y el rendimiento y calidad de fruto en cuatro variedades de pepino, en dos ciclos consecutivos (otoño y primavera) encontraron que durante el primer ciclo no hubo diferencias significativas, pero durante la primavera los mejores resultados se presentaron en las plantas desarrolladas en camas, atribuido en gran medida al incremento de la temperatura de la zona radical de las plantas en los contenedores, la cual produjo efectos negativos en el cultivo en los contenedores con mayor limitación en volumen; además, el efecto positivo en el crecimiento de las plantas de pepino puede ser atribuido a una mayor capacidad de retención de humedad en las camas.

Benko *et al.* (2008), al investigar la influencia del tipo de sustrato (lana de roca, fibra de coco y arcilla expandida) y su volumen (2.5 y 3.75 L por planta) en el cultivo de tomate, durante dos años (2003 y 2004), encontraron que el primer año el volumen del sustrato no tuvo influencia

significativa en la disminución del rendimiento de fruto; sin embargo, en el segundo año, el volumen mayor tuvo un incremento de 9.5 % en el rendimiento de fruto, comparado con el de menor volumen.

Por otra parte, Ganea *et al.* (2002), al evaluar el efecto del volumen de sustrato (6, 8 y 12 L por planta) formado por una mezcla de peat moss y vermiculita en una relación volumétrica 1:1, encontraron un incremento del rendimiento del fruto del tomate bajo invernadero al aumentar el volumen del sustrato, de 6 a 8 L por planta. De forma similar, Snyder y Bauerle (1985), al evaluar el efecto de cinco volúmenes de sustrato en jitomate bajo invernadero en primavera, observaron que las plantas crecidas en bolas de plástico de 7 L produjeron menor rendimiento, frutos pequeños y menor calidad de fruto que las plantas desarrolladas en bolsas de 14, 21 y 35 L de capacidad y consecuente mayor cantidad de sustrato.

Sin embargo, Kemble *et al.* (1994), evaluaron en un cultivar de tomate de crecimiento determinado y en otro de crecimiento indeterminado, el efecto del tamaño del contenedor (3.3, 27, 37.1 y 80 cm³), durante las primeras 5 semanas después de la siembra sobre el crecimiento, desarrollo y producción. Observaron en ambos cultivares, que el número de días entre la siembra y la antesis se redujo al aumentar el tamaño del contenedor, aunque al final del ciclo no se observaron diferencias en el rendimiento de fruto.

3.2.5. Sistemas de riego para pepino hidropónico

El agua es el principal componente de la materia vegetal, pues representa entre un 80 y un 95% del peso fresco; además, proporciona el medio de translocación de gases, elementos minerales y otros solutos; se encarga de mantener la turgencia necesaria y la rigidez a los tejidos y órganos de las plantas hortícolas, variando las exigencias de la misma durante las diferentes etapas de desarrollo (Maroto, 2008); por ello puede ser considerada como uno de los factores limitantes en la producción agrícola.

Una característica sobresaliente de las hortalizas es su jugosidad, precocidad y frescura, cualidades obtenidas gracias a su elevado contenido de agua, en particular del pepino que supera el 96% de contenido de agua (Cuadro 1). Genkov (1974) señala que el pepino es una planta que cuenta con un gran sistema foliar, que gasta el agua de una manera excesiva mientras que su sistema radical es poco desarrollado y se encuentra situado superficialmente.

El agua, con los minerales disueltos, se mueve principalmente hacia arriba en las plantas a través de los vasos de xilema, gracias a los principios tenso-cohesivos-activos (Resh, 2006). Para conocer las necesidades de riego del pepino, se deben considerar las variables que intervienen directamente en el gasto de agua, como son la absorción directa por la planta, el drenaje de los cultivos en sustrato y la evaporación (Salas y Urrestarazu, 2004).

El riego en los sistemas hidropónicos se encuentra íntimamente asociado al suministro de nutrimentos a las plantas, es decir, se riega con la solución nutritiva. La duración y frecuencia depende de factores como variación en la temperatura, humedad relativa, intensidad lumínica,

tipo de sustrato, etapa fenológica del cultivo, así como de la especie e incluso de la variedad cultivada en particular (Vázquez *et al.*, 2003). Mao *et al.* (2003) demostraron que el rendimiento de fruto de pepino está estrechamente relacionado por el volumen de agua proporcionada durante todo el ciclo de cultivo.

Aun cuando no exista un acuerdo generalizado en cuanto a la cantidad de agua y el número de riego necesarios por día en los contenedores, los objetivos del riego, y propiamente dicho del fertirriego, son: suministrar la cantidad conveniente de cada fertilizante; garantizar el adecuado equilibrio nutrimental; proporcionar aireación para favorecer la respiración radical; mantener la temperatura óptima del sustrato; mantener las cantidades correctas de agua fácilmente disponible; y mantener la uniformidad de éstas condiciones (Salas y Urrestarazu, 2004). Sandoval (2008) señala que si el riego se hace utilizando hidroponía, el sustrato debe tener aproximadamente 25 % de retención de humedad, asegurando un abasto mínimo de tres riegos al día para tener un adecuado abastecimiento de agua y nutrimentos para la planta, aunque señala que un mayor número de riegos, sin disminuir el oxígeno en el sustrato, pueden aumentar la producción al reducir posibles daños por la falta de agua.

Pires *et al.* (2011), evaluaron tres volúmenes de sustrato de fibra de coco (5.0; 7.5 y 10.0 L por planta) y dos frecuencias de riego (uno y cinco riegos por día) sobre el crecimiento y el rendimiento de plantas de tomate bajo condiciones de invernadero; observaron que el área foliar y el peso seco se incrementaron con el aumento del volumen de sustrato (10 L), pero no el rendimiento y sus componentes. Adicionalmente, encontraron que las plantas cultivadas con 5 L y regadas una vez al día produjeron la mayor cantidad de frutos no comerciales debido a una mayor incidencia de pudrición basal por deficiencia de calcio; y las plantas cultivadas en 5 y 7.5

L con alta frecuencia de riego incrementaron su crecimiento vegetativo, conductancia estomática, asimilación y transpiración de CO₂ y rendimiento de fruto. Los autores concluyen que el rendimiento y calidad del fruto fueron favorecidos por la alta frecuencia de riego, independientemente del volumen del sustrato.

Por su parte, Wang *et al.* (2009) evaluaron en pepino hidropónico dos frecuencias de riego subterráneo (4 y 8 riegos por día) en combinación con tres coeficientes de cultivo -K_c- (0.6, 0.8 y 1.0); encontraron que tanto la evapotranspiración del cultivo así como el rendimiento de fruto se incrementaron al aumentar la cantidad de agua de riego, pero se afectó negativamente el contenido de azúcares solubles, vitamina C y aminoácidos; y demostraron que un aporte intermedio de agua (K_c = 0.8) en combinación con una alta frecuencia de riegos por día (8) se tiene una mayor eficiencia en el uso del agua. Del mismo modo, Zhang *et al.* (2011) compararon en pepino el efecto de tres K_c (0.6, 0.8 y 1.0) en combinación con tres niveles de fertilización nitrogenada (300, 450 y 600 Kg · ha⁻¹); encontraron resultados similares en cuanto a la intensidad del riego, y adicionalmente señalan incremento en el rendimiento de fruto al combinarla con una alta dosis de N.

3.3. Daños fisiológicos producidos por estrés en pepino

Se entiende al estrés biológico como cualquier alteración en las condiciones ambientales que puedan reducir o influir de manera adversa en el crecimiento o desarrollo de las plantas en sus funciones normales. Cuando las condiciones ambientales son tales que la planta responde de

manera máxima a algún factor, este factor no la estresa; sin embargo, cualquier cambio que provoque una respuesta de la planta menor que la óptima puede considerarse como estresante (Salisbury y Ross, 1994).

Sin embargo, Salisbury y Ross (1994) también señalan el concepto de elasticidad y plasticidad biológicas. La primera se refiere a los cambios en la función de un organismo que restituyen su nivel óptimo cuando las condiciones vuelven a ser óptimas, es decir, cuando el estrés biológico ha cesado. La segunda hace referencia cuando las funciones no vuelven a la normalidad.

3.3.1. Daños fisiológicos producidos por estrés salino

La salinidad se refiere a una alta concentración del total de sales, y está relacionada directamente con la presencia de Ca^{+2} , Mg^{+2} y SO_4^{-2} , Na^+ y Cl^- , siendo determinada por medio de la conductividad eléctrica, la cual se encuentra correlacionada con el potencial osmótico (Taiz y Zeiger, 2006).

El balance general de la planta se ve afectado por la salinidad, debido a que los solutos disueltos en la zona radicular causan un bajo potencial osmótico (más negativa) que reduce el potencial hídrico del suelo. Las plantas están continuamente absorbiendo agua por la raíz y la pierden por las hojas, siempre y cuando su potencial hídrico tenga un valor mayor que el del suelo (más negativo); cuando el potencial hídrico interno se iguala con el externo, ya no se absorbe agua y se deshidrata (Tadeo y Gómez, 2008).

El exceso de sales en el manejo del cultivo de pepino es el causante de diversos desórdenes en la fisiología y desarrollo del mismo, lo cual repercute directamente en la eficiencia energética y finalmente repercute de forma negativa en el rendimiento de fruto. McKersie y Leshem (1994) señalan que los efectos negativos de la presencia excesiva de sales en la solución del sustrato incrementa considerablemente el potencial osmótico de las células de la zona radical, reduciendo con ello el consumo de agua; se inhibe la plasticidad de expansión de la membrana y se altera la turgencia celular; asimismo, se altera el estado físico del agua por la presencia de aniones, afectando así la respuesta de los fosfolípidos de la membrana a cambios fisiológicos. La salinidad altera también el crecimiento y la diferenciación celular (Kaya *et al.*, 2001; Taiz y Zeiger, 2006).

Recientemente Xu *et al.* (2011) demostraron en plántulas de pepino transgénicas, modificadas para suprimir la expresión del gen CsNMPAK, comparadas con plántulas de pepino normales, ambas sometidas a una concentración de 50 mM de NaCl durante siete días; encontraron que éste gen interviene en la respuesta ante el estrés salino, puesto que las plántulas transgénicas tuvieron un crecimiento retardado, menor altura de planta, hojas pequeñas y menor peso fresco.

Además, el exceso de sales tiene un efecto fitotóxico sobre el cultivo (Nuez y Ruíz, 1996). Otros efectos producidos por el exceso de sales, son atribuidos específicamente al catión sodio (Na^+) y del anión cloruro (Cl^-), que en cuyo caso, sus efectos son visuales en niveles macroscópicos, manifestados como la quemadura de hojas y/o puntas, así como la presencia de áreas necróticas, lo cual afecta directamente a las plantas pues conduce a una disminución en la producción de fotosintatos (McKersie y Leshem, 1994).

Para contrarrestar el efecto del estrés salino, Dong *et al.* (2011) demostraron en plántulas de pepino de 18 días de edad, adicionadas con ácido salicílico, sometidas posteriormente a diferentes concentraciones de NaCl (50, 100 y 150 mM), que existieron cambios en la actividad enzimática, los cuales produjeron una acumulación de azúcares solubles no reductores en la planta. Esta condición funcionó como un mecanismo de regulación osmótica que facilitó la absorción y retención de agua en las células vegetales, confiriendo de esta manera a las plántulas una tolerancia al estrés salino provocado por el NaCl.

3.3.2. Daños fisiológicos producidos por estrés hídrico

El estado hídrico de la planta es una consecuencia del equilibrio entre la pérdida de agua por transpiración y el abastecimiento de la misma en el sustrato, compuesto tanto por la turgencia como por el potencial osmótico de la planta (Lerner, 1999).

Taiz y Zeiger (2006) definen al estrés hídrico como el contenido de agua de una célula o tejido que se encuentra por debajo del contenido de agua mostrado durante un estado completamente hidratado, sin embargo, la falta de agua, interfiere en una gran cantidad de procesos. Primeramente, se provoca la ruptura de la estructura de la membrana y con ello se conduce al desorden de los organelos internos, se destruye primordialmente la vacuola y se fractura el citoplasma, provocando lesiones internas. Dado que el agua se perfila en varias categorías biofísicas tanto al interior como al exterior de las membranas celulares, la falta de ésta puede

provocar efectos secundarios al deteriorarse algunas funciones enzimáticas, el proceso fotosintético, el intercambio catiónico y los procesos osmoregulatorios (McKersie y Leshem, 1994).

Particularmente cuando existe una mínima disponibilidad de agua, los iones minerales se encuentran en menor disponibilidad en la solución del sustrato para la planta, debido a que los espacios de agua son reemplazados por aire, haciendo que el paso de agua entre el sustrato y las raíces sea menos directo restringiéndose fuertemente la disponibilidad de agua en la mayoría de las plantas (Mooney *et al.*, 1991).

La fotosíntesis es uno de los procesos fisiológicos más sensibles a la falta de agua. Zhang *et al.* (2013) encontraron en plantas de pepino que, al disminuir la conductancia estomática, se reduce la tasa de asimilación de CO₂ para la carboxilación en respuesta al déficit de agua; también encontraron que las expresiones relativas de dos genes de la Rubisco (*rbcL* y *rbcS*) disminuyeron rápidamente al llegar al punto de deshidratación, lo cual contribuyó a limitar la tasa fotosintética.

De acuerdo con Lerner (1999), el estrés hídrico también altera los balances hormonales. Se ha demostrado que la concentración de ácido abscísico (ABA) se incrementa en la savia del xilema bajo condiciones de estrés hídrico en el sustrato, el cual provoca el cierre estomático. El ajuste osmótico y la homeostasis son reguladas bajo condiciones de estrés por la acción de las auxinas y el ABA.

El déficit hídrico tiene severos efectos en el crecimiento de las plantas, en particular se manifiesta en la reducción del área foliar, debido a que las células se encogen y la presión de turgencia

contra las paredes celulares se relaja, reduciéndose así el volumen celular; por otra parte, la escasez de agua promueve la abscisión de hojas debido a un incremento en la síntesis de etileno. También al verse reducida el área foliar, hay una reducción en el consumo de carbono y energía, y en gran proporción los fotoasimilados son enviados en forma de reservas a la zona radical, lo cual reduce el crecimiento radicular, además de que en un suelo seco ésta pierde turgencia (Taiz y Zeiger, 2006).

Bajo condiciones prolongadas de escasez de agua, la planta tiene mecanismo para protegerse de la desecación, siendo uno de ellos el cierre de estomas, el cual puede ocurrir en forma hidropasiva o hidroactiva. En la primera, el cierre ocurre porque las células guarda localizadas en la epidermis de la hoja pierden turgencia como resultado directo de una pérdida de agua por evaporación hacia la atmósfera. En el segundo mecanismo, depende de procesos metabólicos en las células guarda: hay una reducción de solutos en la célula, se incrementa potencial osmótico, seguida de una pérdida de turgencia provocando el cierre estomático, siendo lo anterior resultado de la síntesis de ácido abscísico (Taiz y Zeiger, 2006)

En términos prácticos, Guenkov (1974) indica que la escasez de agua acelera el envejecimiento de las plantas, se disminuyen el rendimiento y se merma la calidad de la producción al no poder desarrollar su potencial genético. Una forma de mantener una producción adecuada en pepino es mantener una alta frecuencia de riegos (Nuez y Ruíz, 1996).

3.3.3. Daños fisiológicos producidos por estrés debido a déficit nutrimental

La disponibilidad de nutrimentos es una de los principales factores de productividad de las plantas en la agricultura. La capacidad de la planta para absorber éstos nutrimentos de la solución del suelo depende, en gran medida, de la actividad radical y de su potencial para absorberlos. Sin embargo, bajo condiciones de estrés, cuando un nutrimento limita su crecimiento, las plantas generan diversas adaptaciones que les permitan absorber el nutrimento limitante (Mooney *et al.*, 1991).

La combinación entre un abasto limitado de agua, reduce al mismo tiempo la disponibilidad de los nutrimentos, variando su concentración en el flujo del xilema como respuesta directa al estrés hídrico. Por ejemplo, la concentración de magnesio alcanza una baja concentración cuando el potencial hídrico se encuentra en -0.6 MPa, mientras que la concentración de potasio disminuye al reducirse el potencial hídrico en las hojas; en el caso del nitrógeno, comienza a reducir su disponibilidad una vez que la concentración de magnesio ha llegado a su límite mínimo (Mooney *et al.*, 1991).

Sin embargo, también cabe destacar que bajo ciertas circunstancias, un estrés moderado de nutrimentos reduce la susceptibilidad de las plantas a otros tipos de estrés. De este modo, las plantas de rápido crecimiento debido a la alta disponibilidad de nutrimentos, son generalmente más susceptibles a daños por frío y escasez de agua, producen menos metabolitos secundarios y, por ende, se encuentra más propensas al ataque de patógenos (Mooney *et al.*, 1991).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue realizado en el área de invernaderos del Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), en el municipio de Texcoco, Estado de México, localizada geográficamente a los 19° 29' 32" de latitud Norte y 98° 53' 21" de longitud Oeste, a una altitud de 2,250 msnm., caracterizado por un clima templado subhúmedo con lluvias en verano tipo (Cb(wo)(w)(i')g) según la clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García (García, 1987); con precipitación media anual de 636.5 mm y una temperatura media anual de 15.2 °C.

Se estableció un ciclo de cultivo durante la primavera 2013, para lo cual se empleó un invernadero tipo capilla a dos aguas, orientado en dirección este – oeste, (33 m de largo por 11.1 m de ancho), con altura de larguero perimetral de 2.5 m y una altura cenital de 5 m, con una superficie total de 366 m²; protegido por una cubierta de polietileno de 180 micrones de espesor con 80 % de transmitancia de luz, con ventilación lateral y frontal protegida contra insectos con malla antiáfidos de 25 x 40 hilos/ pulgada².

Se empleó el híbrido de pepino partenocárpico tipo americano de la variedad Paraíso, producido por la empresa Enza Zaden®, el cual es adaptable a condiciones de invernadero. De acuerdo con datos de la misma empresa, se trata de plantas de vigor fuerte, con una excelente cobertura foliar, de tipo semicerrado, cuya coloración de fruto es verde intenso con una longitud entre 22 y 24 cm. Presenta resistencia intermedia contra el oídio (*Podosphaera xanthii*), el virus del mosaico del pepino, el virus de las venas amarillas del pepino y el virus del amarillamiento y enanismo de las cucurbitáceas.

Para la producción de plántula, fueron empleadas charolas de poliestireno multiceladas de 60 cavidades, lavadas y desinfectadas en una solución de hipoclorito de sodio al 1 %, y llenadas con peat moss y perlita (1:1) sembrando una semilla por cavidad a una profundidad de un cm.

La siembra se efectuó el 21 de marzo, en un invernadero con las mismas condiciones que el usado para la producción. Una vez concluida la siembra, se apilaron las charolas y fueron cubiertas con plástico hasta la emergencia de las primeras plántulas al cabo de 48 horas; posteriormente fue retirado el plástico y una vez destapadas, fueron colocadas en bancales a 1 m de altura para facilitar su manejo agronómico.

Durante los días subsecuentes, fueron regadas con solución nutritiva al 50 % de su concentración normal, la cual corresponde a la composición de baja intensidad empleada (Cuadro 4) hasta la formación de las primeras tres hojas.

Como contenedores para la producción, se emplearon tres tamaños de bolsas negras de polietileno de 150 micras, para colocar en ellas tres diferentes volúmenes distintos de sustrato (4, 8 y 12 L). Para el volumen de 4 litros, se usaron bolsas de 30 x 30 x 19 x 22 cm de ancho x largo x altura x diámetro. En el caso del volumen de 8 L, bolsas de 35 x 35 x 22 x 25 cm de ancho x largo x altura x diámetro. Finalmente, para el volumen de 12 L, bolsas de 40 x 40 x 25 x 30 cm de ancho x largo x altura x diámetro.

Las bolsas fueron rellenas con tezontle, con un tamaño de partícula que osciló entre 2 y 5 mm, dando una porosidad total de 48.95 %; con un 24.42 % de aireación después de permitir el

drenaje del sustrato saturado y un 24.54 % de retención de humedad a capacidad de retención del contenedor.

El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar dispuestos en parcelas sub-subdivididas. En las parcelas grandes fueron probadas tres concentraciones de solución nutritiva (100, 75 y 50 %), cada una de las cuales tuvo asignada un tanque con capacidad de 450 L; en las parcelas medianas se fijaron tres frecuencias de riego (1, 3 y 7 riegos al día), de tal manera que la dosis de solución por día fuera la misma; las parcelas chicas estuvieron integradas por tres volúmenes de sustrato (4, 8 y 12 L), a las cuales se les colocó un emisor de riego para proporcionar un gasto de $2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$.

A partir de lo anterior, se conformaron 27 tratamientos (Cuadro 3) correspondientes a la combinación de estos sistemas de cultivo, manejando cuatro repeticiones para cada tratamiento. La unidad experimental tuvo un tamaño de 1.5 m^2 útiles, donde se establecieron 18 plantas distribuidas en 2 hileras, separadas a una distancia de 40 cm entre plantas y entre hileras, se usó una densidad de 6 plantas por m^2 .

El trasplante fue realizado el día 19 de abril de 2013 a los 29 días después de la siembra (dds). Al día siguiente, una vez que la plántula se aclimató, se iniciaron los tratamientos de frecuencias de riego y concentración de solución nutritiva. El volumen diario de riego fue aplicado considerando tanto las condiciones climáticas como la etapa fenológica del cultivo, procurando la producción de un drenaje de 20 a 30 % del volumen aplicado en cada riego.

Cuadro 3. Combinación de tratamientos de concentración de soluciones nutritivas, frecuencias de riego y volumen de sustrato para la producción de pepino hidropónico

| Tratamiento | Concentración de la Solución Nutritiva | Frecuencias de Riego Aplicado | Volumen de Sustrato |
|--------------------|---|--------------------------------------|----------------------------|
| | (%) | (No· día⁻¹) | (L) |
| 1 | 100 | 1 | 4 |
| 2 | 100 | 1 | 8 |
| 3 | 100 | 1 | 12 |
| 4 | 100 | 3 | 4 |
| 5 | 100 | 3 | 8 |
| 6 | 100 | 3 | 12 |
| 7 | 100 | 7 | 4 |
| 8 | 100 | 7 | 8 |
| 9 | 100 | 7 | 12 |
| 10 | 75 | 1 | 4 |
| 11 | 75 | 1 | 8 |
| 12 | 75 | 1 | 12 |
| 13 | 75 | 3 | 4 |
| 14 | 75 | 3 | 8 |
| 15 | 75 | 3 | 12 |
| 16 | 75 | 7 | 4 |
| 17 | 75 | 7 | 8 |
| 18 | 75 | 7 | 12 |
| 19 | 50 | 1 | 4 |
| 20 | 50 | 1 | 8 |
| 21 | 50 | 1 | 12 |
| 22 | 50 | 3 | 4 |
| 23 | 50 | 3 | 8 |
| 24 | 50 | 3 | 12 |
| 25 | 50 | 7 | 4 |
| 26 | 50 | 7 | 8 |
| 27 | 50 | 7 | 12 |

El tutorado de la plántula de pepino fue realizado a los 10 días después del trasplante (ddt). Para tal fin fue empleada rafia de color negro con tratamiento contra rayos ultravioleta (UV) y se colocó un tutor por planta. En la base de la planta, en la inserción de los cotiledones, fue colocado

un anillo plástico de 23 mm de diámetro en conjunto con rafia de polipropileno negra; posteriormente ésta fue enredada en el tallo de la planta y finalmente fue amarrada en el alambre de carga. Esta actividad se continuó a lo largo del ciclo de cultivo, de acuerdo con el crecimiento continuo de la planta, con el objetivo de conducirla y evitar daños mecánicos por ruptura.

La planta fue conducida a un solo tallo hasta un metro y medio de altura; una vez que alcanzó esta altura se hizo la poda de la yema terminal, para tener un ciclo corto (Sánchez *et al.*, 2006). Los brotes axilares fueron podados durante todo el ciclo de producción procurando que éstos no sobrepasaran los 5 cm de longitud.

Para el sistema de riego por goteo fueron colocados tres tanques de polietileno negro con una capacidad de 450 L cada uno, en los cuales se prepararon las tres soluciones nutritivas por aplicar en cada una de las parcelas grandes; a partir de cada uno de ellos, se condujo la solución nutritiva correspondiente, previamente preparada, por medio de una red de tubería de PVC RD-26 de 1”.

En el interior del invernadero, cada línea fue distribuida de acuerdo con la aleatorización del diseño experimental. A partir de cada línea principal, se colocó en cada hilera de plantas, representando las parcelas medianas, una válvula eléctrica para el paso del flujo de agua de ½” de 110 voltios de corriente alterna (VAC) con salida dentada 16 mm; se colocó una conexión tipo T de 16 mm, y a partir de ésta fueron colocadas las laterales de riego, consistentes en tubería de polietileno negro de 16 mm de diámetro y 1 mm de grosor, perforado a cada 0.40 m por medio de una pinza alicate perforadora, en donde fue colocado un gotero autocompensado con salida cilíndrica de la marca NannDaanJain® con un gasto de $4 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$, al cual se insertó un distribuidor plano de 5 mm de dos salidas, y se colocó en cada una de ellas un tramo de 50 cm de longitud de

microtubo de color negro de PVC de 8 mm de diámetro externo; se colocó al final de éste una estaca conductora de gotas, misma que fue colocada en cada bolsa, con el fin de aportar un gasto por planta de $2 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ en las parcelas chicas.

Cada válvula de riego fue conectada por separado a un temporizador digital de 8 eventos de la marca Steren® por medio de un cableado eléctrico de cobre calibre 12 de 3 hilos, el cual fue programado de acuerdo individualmente para cada conjunto de parcelas medianas, para encender la cantidad de veces requeridas (número de riegos) el tiempo necesario (duración de riego) de acuerdo a cada tratamiento.

Para los diferentes tratamientos, desde de la emergencia de plántulas y hasta trasplante, se aplicó una solución nutritiva base concentrada al 50 % (Cuadro 4), empleando como fuentes de fertilizantes nitrato de calcio $[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$, ácido fosfórico $[\text{H}_3\text{PO}_4]$, sulfato de potasio $[\text{K}_2\text{SO}_4]$, sulfato de magnesio $[\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}]$, sulfato de manganeso $[\text{MnSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}]$, sulfato ferroso $[\text{FeSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}]$, sulfato de cobre $[\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}]$, sulfato de zinc $[\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}]$ y tetraborato de sodio $[\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}]$.

Posterior al trasplante, se evaluaron tres concentraciones de una solución nutritiva base concentrada al 100 % y dos diluidas, una al 75 % y otra más al 50 % (Cuadro 4).

Cuadro 4. Composición de la solución nutritiva concentrada al 100 % (alta), 75 % (media) y 50 % (baja)

| ELEMENTO | COMPOSICIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA (mg · L ⁻¹) | | |
|---|--|-------|------|
| | ALTA | MEDIA | BAJA |
| Nitrógeno (NO ₃ ⁻) | 200 | 150 | 100 |
| Fósforo (PO ₄ ⁻³) | 50 | 37.5 | 25 |
| Potasio (K ⁺) | 240 | 180 | 125 |
| Magnesio (Mg ⁺²) | 50 | 37.5 | 25 |
| Calcio (Ca ⁺²) | 290 | 217.5 | 145 |
| Azufre (SO ₄ ⁻²) | 180 | 135 | 90 |
| Hierro (Fe ⁺²) | 3 | 2.25 | 1.5 |
| Manganeso (Mn ⁺²) | 1 | 0.75 | 0.5 |
| Boro (B) | 0.5 | 0.375 | 0.25 |
| Zinc (Zn ⁺²) | 0.2 | 0.15 | 0.1 |
| Cobre (Cu ⁺²) | 0.1 | 0.075 | 0.05 |

Para el manejo fitosanitario se utilizó el control químico como medida tanto preventiva como curativos contra las plagas y enfermedades que se presentaron durante el desarrollo del cultivo de pepino, cada que fue necesario.

En el caso de las plagas, para el control de la mosquita blanca (*Bemisia tabacci*) se emplearon los insecticidas Actara 25 WG (I.A. Thiametoxam) con una dosis de 600 g·ha⁻¹; para ninfas de *B. tabaci*, el insecticida New Leverage (I.A. Imidacloprid + Deltametrina) a razón de 1.5–2.0 L·ha⁻¹, y contra insectos adultos Helmfidor (I.A. Imidacloprid) dosificado en 0.75 – 1.25 L·ha⁻¹; y contra el ataque también de ninfas de la especie *Trialeurodes vaporariorum*, se realizaron aplicaciones de Oberon (I.A. Spiromesifen) con una dosis de 0.4 – 0.6 L·ha⁻¹. Para el control de pulgones

(*Aphis gossypii*), trips (*Thrips tabaci*) y mosquita blanca (*B. tabaci*) se empleó el insecticida Beleaf (I.A. Flonicamid) en una dosis de 200 – 300 g·ha⁻¹.

Respecto al control de enfermedades, para el control de la antracnosis (*Colletotricum gloeosporioides*), cenicilla (*Erysiphe cichoracearum*), moho gris (*Botrytis cinerea*) y pudrición gomosa (*Mycosphaerella citrulina*), se empleó Benomil (I.A. Benomilo) en una dosis de 300 – 350 g·ha⁻¹; contra mildiú (*Pseudoperonospora cubensis*), antracnosis (*Colletotricum lagenarium*) y tizón foliar (*Alternaria cucumerina*), se empleó Captan 50 PH (I.A. Captan) con una dosis de 2 – 3 kg·ha⁻¹; para cenicilla (*Podosphaera xanthi*) fue empleado el fungicida comercial Consist Max (I.A. Tebuconazole + Trifloxystrobin) a razón de 0.25 – 0.35 L·ha⁻¹; y finalmente Cabrio C (I.A. Boscalid + Pyraclostrobin) para el control de mildiú (*Pseudoperonospora cubensis*) dosificado en 0.7 – 0.8 kg·ha⁻¹.

La cosecha de pepino se realizó cuando éstos llegaron a la madurez comercial, determinado para ello tanto la longitud como el diámetro, ambos parámetros de acuerdo a las reglas comerciales. Para ello, se utilizaron unas tijeras de horticultor para el corte al ras del pedúnculo del fruto, evitando maltratar y golpear los frutos al momento de la recolección. Una vez cortados, fueron pesados en una balanza analítica, posteriormente se calculó el rendimiento de fruto por planta y metro cuadrado.

En el desarrollo de la investigación se evaluaron cuatro tipos de variables:

a) Variables morfológicas e indicadores del crecimiento

1. Diámetro de tallo (DT). Se midió en la parte media de la planta (mm), con ayuda de un vernier digital y fue el promedio de cuatro plantas por unidad experimental, medido a los 17 y 30 días después del trasplante (ddt).
2. Altura de planta (AP) (cm). Se realizó con una cinta métrica graduada; se midió en centímetros desde la base del tallo hasta el ápice de crecimiento del tallo principal, medida a los 17 y 30 ddt, siendo el promedio de cuatro plantas por unidad experimental
3. Área foliar por planta (AF, m²). Se registró el largo y ancho de cada hoja en centímetros con una regla graduada y por un método no destructivo relación peso – área fue determinado el índice de área foliar (Cardona, Araméndiz y Barrera, 2009). Con los datos del producto de largo por ancho y área por hoja, se generó un factor mediante regresión lineal, con este producto se estimó el área foliar en los demás muestreos (30, 45 y 80 ddt).
4. Peso seco total por planta (PStot), raíz (PSr), tallo (PSt), hojas (PSh) y frutos (PSf). Se utilizó una planta por unidad experimental, seleccionada al azar. Primeramente se extrajo del sustrato y fue seccionada por cada uno de los órganos, los cuales fueron colocados en bolsas de papel con perforaciones para favorecer la circulación de aire en el interior de la bolsa. Una vez colectadas, fueron llevadas al Laboratorio de Ecología del Departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, donde fueron sometidas a secado en una estufa a 70 °C hasta peso constante.

b) Análisis nutrimental

Se realizó la determinación de la concentración de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) en hoja. Los análisis nutrimentales fueron aplicados en los tratamientos con un volumen de sustrato de 8 L, con la finalidad de establecer los parámetros para un volumen de sustrato intermedio. Para ellos, se realizó un muestreo foliar en dos plantas por unidad experimental de la primera hoja madura durante la etapa previa la primera fructificación; el material colectado fue secado en una estufa de secado a 70 °C, hasta peso constante; posteriormente el material fue pulverizado en un molino de cuchilas marca Willey modelo 4 de 110 VAC. Para la determinación de los nutrimentos, se utilizaron 0.5 g de muestra seca, la cual fue sometida a una digestión húmeda con una mezcla diácida (ácido sulfúrico y ácido perclórico en una relación 4:1); se agregaron 4 mL y 2 mL de agua oxigenada al 30 %. Después de la digestión, se aforó a 50 mL con agua destilada (Alcántar y Sandoval, 1999).

La determinación del contenido de nitrógeno se realizó por el método de microkjendahl (Chapman y Pratt, 1973). El contenido de fósforo se determinó por el método de amarillo de vanadato - molibdato (Chapman y Pratt, 1973) leyendo la absorbancia a 420 nm en un espectrofotómetro Spectronic 20 de Bausch & Lomb. El contenido de potasio se determinó por el método de emisión de llama flamometría (Chapman y Pratt, 1973), para lo cual se utilizó un fotómetro de flama Corning 400. Las concentraciones de calcio y magnesio se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica, leyendo en un espectrofotómetro Pye Unicam SP9 de Phillips.

Para realizar la interpretación de los resultados del contenido nutrimental obtenidos a partir del análisis foliar, se emplearon como referencias los valores propuestos por Chapman y Pratt (1986), Casas y Casas (1999) así como por Rodríguez y Rodríguez (2002).

c) Componentes del rendimiento

Una vez que los frutos alcanzaron la longitud y diámetro comerciales, fueron cosechados y en ellos se cuantificó el número de frutos, frutos por planta y peso fresco por unidad.

5. Rendimiento de fruto por unidad de superficie en kg. Fue pesado por medio de una balanza analítica el peso en gramos de cada fruto por planta, desde la primera hasta la última cosecha, y posteriormente se realizó la sumatoria de todos los frutos individuales, transformando las unidades a Kg.
6. Número de frutos por unidad de superficie. En cada corte realizado, se contabilizó el número de frutos por plantas, realizando una sumatoria desde la primera cosecha hasta la última.
7. El índice de cosecha (IC) fue calculado de la siguiente fórmula que muestra que es directamente proporcional al rendimiento económico por planta (Rep) e inversamente proporcional a la biomasa por planta (Bp). Los datos fueron obtenidos del peso seco de frutos y peso seco total, ambos obtenidos a los 80 ddt.

$$IC = \frac{Rep}{Bp}$$

Se aplicó un análisis de varianza individual a las variables medidas mediante el procedimiento de los mínimos cuadrados para los modelos lineales generales (PROC GLM) del Statistical Analysis System (SAS, 2002) versión 9.0. En las variables cuyos cuadrados medios resultaron significativos, se aplicó la prueba de comparación múltiple de medias de Tukey, con una probabilidad $\alpha = 0.05$ %.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Variables morfológicas

5.1.1. Análisis de varianzas

Con referencia a las concentraciones de solución nutritiva, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la altura de planta en los dos muestreos realizados a los 17 y 30 ddt (Cuadro 5 y 6), en diámetro de tallo durante tres de los cuatro muestreos a los 30, 45 y 62 ddt (Cuadro 6, 7 y 8), y en el área foliar en el segundo muestreo realizado a los 44 ddt (Cuadro 7), aunque por el contrario no tuvo efectos en el peso seco de ninguno de los órganos de las plantas de pepino (Cuadro 9). Para el factor frecuencia de riego, la altura de planta presentó diferencias significativas únicamente a los 17 ddt (Cuadro 5), en el diámetro de tallo a los 45 y 80 ddt (Cuadro 7 y 8), en el caso del área foliar, no se presentaron diferencias estadísticas significativas (Cuadros 6 al 8) y solamente afectó significativamente al peso seco de raíz a los 80 ddt (Cuadro 9). En cuanto al volumen de sustrato, se observaron diferencias altamente significativas en todos los muestreos en altura de planta y diámetro de tallo, y en el caso del área foliar solamente en el segundo muestreo a los 45 ddt (Cuadros 5 al 8), y también tuvo efectos significativos en el peso seco de raíz, de tallo y hoja (Cuadro 9).

La interacción entre solución nutritiva y frecuencia de riego resultó significativa en los dos muestreos de altura de planta así como en los tres primeros muestreos del diámetro de tallo, y en el caso del área foliar, no se encontraron diferencias significativas (Cuadros 5 al 8). A los 80 ddt, se encontraron diferencias significativas en el peso seco de todos los órganos y planta, con excepción de la raíz y el fruto (Cuadro 9). Por su parte, la interacción entre la concentración de

la solución nutritiva y el volumen de sustrato fue significativa en la altura de planta y en el diámetro de tallo a los 30 y 45 ddt (Cuadros 5 al 8), y no tuvo efectos en el peso seco de ningún órgano (Cuadro 9). En lo que respecta a la interacción entre las frecuencias de riego y el volumen de sustrato, fue significativa en todos los muestreos de altura de planta y diámetro de tallo, y para el caso del área foliar a los 45 ddt (Cuadros 5 al 8), así como en el peso seco del tallo y hojas (Cuadro 9).

Cuadro 5. Cuadros medios y niveles de significancia para altura de planta y diámetro de tallo medidas a los 17 días después de trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato

| Fuentes de Variación | GL | Altura de Planta | Diámetro de Tallo |
|------------------------------|-----------|-------------------------|--------------------------|
| Bloques | 3 | 257.01* | 1.50 |
| Solución Nutritiva | 2 | 359.99* | 3.89 |
| Error a | 6 | 22.63* | 1.18** |
| Frecuencia Riego | 2 | 101.45* | 0.70 |
| Solución * Frecuencia | 4 | 208.79* | 2.63* |
| Error b | 18 | 23.81** | 0.77** |
| Volumen Sustrato | 2 | 108.50** | 3.45** |
| Solución * Sustrato | 4 | 20.33* | 0.27 |
| Frecuencia * Sustrato | 4 | 36.33** | 0.41* |
| Solución*Frecuencia*Sustrato | 8 | 8.06 | 0.33* |
| Error | 378 | 5.65 | 0.15 |
| r ² | | 0.63 | 0.50 |
| C.V. (%) | | 6.77 | 5.53 |
| Media general | | 35.12 | 6.98 |

* Significativo: $p \leq 0.05$ %, **Altamente Significativo $p \leq 0.01$ %, GL: Grados de libertad, r²: Coeficiente de determinación, C.V.: Coeficiente de variación.

En lo referente a la triple interacción entre la concentración de la solución nutritiva, frecuencia de riego y volumen de sustrato, resultó significativa a los 30 ddt en la altura de planta, en el caso del diámetro de tallo a los 17, 45 y 80 ddt, y en el área foliar únicamente a los 45 ddt durante el segundo muestreo (Cuadros 5 al 8). En el caso del peso seco, tampoco se encontraron diferencias estadísticas significativas (Cuadro 9).

Cuadro 6. Cuadros medios y niveles de significancia para altura de planta, diámetro de tallo y área foliar medidas a los 30 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato

| Fuentes de Variación | GL | Altura de Planta | Diámetro de Tallo | Área Foliar por Planta |
|------------------------------|----|------------------|-------------------|------------------------|
| Bloques | 3 | 403.55 | 3.19 | 0.0012 |
| Solución Nutritiva | 2 | 5993.37* | 22.64* | 0.0058 |
| Error a | 6 | 106.44* | 1.64** | 0.0019 |
| Frecuencia Riego | 2 | 271.41 | 1.36 | 0.0136 |
| Solución * Frecuencia | 4 | 513.01* | 4.99* | 0.0228 |
| Error b | 18 | 110.11** | 1.54** | 0.0014 |
| Volumen Sustrato | 2 | 1277.71** | 3.42** | 0.0017 |
| Solución * Sustrato | 4 | 391.11** | 1.18* | 0.0008 |
| Frecuencia * Sustrato | 4 | 496.81** | 0.83* | 0.0014 |
| Solución*Frecuencia*Sustrato | 8 | 122.89* | 0.29 | 0.0017 |
| Error | | 31.17 | 0.24 | 0.0015 |
| r ² | | 0.68 | 0.59 | 0.70 |
| C.V. (%) | | 5.57 | 5.67 | 20.49 |
| Media general | | 100.23 | 8.73 | 0.19 |

* Significativo: $p \leq 0.05$ %, **Altamente Significativo $p \leq 0.01$ %, GL: Grados de libertad, r²: Coeficiente de determinación, C.V.: Coeficiente de variación.

Cuadro 7. Cuadrados medios y niveles de significancia para diámetro de tallo y área foliar medidas a los 45 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato

| Fuentes de Variación | GL | Diámetro Tallo | Área Foliar por Planta |
|------------------------------|-----------|-----------------------|-------------------------------|
| Bloques | 3 | 5.06* | 0.0060 |
| Solución Nutritiva | 2 | 17.72* | 0.0379* |
| Error a | 6 | 0.39 | 0.0074 |
| Frecuencia Riego | 2 | 3.91* | 0.0029 |
| Solución * Frecuencia | 4 | 1.34* | 0.0118 |
| Error b | 18 | 0.45* | 0.0064 |
| Volumen Sustrato | 2 | 10.57** | 0.0986** |
| Solución * Sustrato | 4 | 0.60* | 0.0063 |
| Frecuencia * Sustrato | 4 | 0.76* | 0.0259* |
| Solución*Frecuencia*Sustrato | 8 | 0.57* | 0.0157* |
| Error | | 0.24 | 0.0044 |
| r ² | | 0.54 | 0.76 |
| C.V. (%) | | 5.14 | 13.78 |
| Media general | | 9.52 | 0.48 |

* Significativo: $p \leq 0.05$ %, **Altamente Significativo $p \leq 0.01$ %, GL: Grados de libertad, r²: Coeficiente de determinación, C.V.: Coeficiente de variación.

Cuadro 8. Cuadrados medios y niveles de significancia para diámetro de tallo y área foliar medidas a los 80 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato

| Fuentes de Variación | GL | Diámetro de Tallo | Área Foliar por Planta |
|------------------------------|----|-------------------|------------------------|
| Bloques | 3 | 2.15 | 0.0065 |
| Solución Nutritiva | 2 | 11.32* | 0.0108 |
| Error a | 6 | 0.79* | 0.0077 |
| Frecuencia Riego | 2 | 5.56* | 0.0027 |
| Solución * Frecuencia | 4 | 1.15 | 0.0096 |
| Error b | 18 | 0.80** | 0.0072 |
| Volumen Sustrato | 2 | 5.42** | 0.0136 |
| Solución * Sustrato | 4 | 0.25 | 0.0025 |
| Frecuencia * Sustrato | 4 | 1.20* | 0.0214 |
| Solución*Frecuencia*Sustrato | 8 | 0.66* | 0.0129 |
| Error | | 0.21 | 0.0090 |
| r ² | | 0.52 | 0.50 |
| C.V. (%) | | 4.76 | 15.53 |
| Media general | | 9.56 | 0.61 |

* Significativo: $p \leq 0.05$ %, **Altamente Significativo $p \leq 0.01$ %, GL: Grados de libertad, r²: Coeficiente de determinación, C.V.: Coeficiente de variación.

Cuadro 9. Cuadrados medios y niveles de significancia para los pesos secos de raíz, tallo, hoja, frutos y total a los 80 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato

| Fuentes de Variación | GL | Peso Seco | | | | |
|----------------------------------|----|-----------|---------|---------|---------|---------|
| | | Raíz | Tallo | Hoja | Fruto | Total |
| Bloques | 3 | 39.21* | 13.66 | 43.53 | 1639.12 | 1040.38 |
| Solución Nutritiva | 2 | 1.04 | 5.42 | 53.29 | 352.24 | 63.31 |
| Error a | 6 | 2.45 | 3.20 | 68.23 | 228.55 | 248.21 |
| Frecuencia de Riego | 2 | 28.39* | 2.52 | 3.36 | 170.77 | 275.66 |
| Solución * Frecuencia | 4 | 9.20 | 9.94 | 166.02* | 75.53 | 561.23* |
| Error b | 18 | 6.78* | 4.94 | 51.72 | 164.06 | 185.67 |
| Volumen de Sustrato | 2 | 31.24* | 54.49** | 509.39* | 113.99 | 510.64 |
| Solución * Sustrato | 4 | 1.14 | 1.61 | 41.88 | 137.24 | 190.97 |
| Frecuencia * Sustrato | 4 | 1.98 | 15.01* | 300.28* | 113.90 | 529.25 |
| Solución * Frecuencia * Sustrato | 8 | 0.62 | 3.35 | 59.20 | 132.60 | 166.84 |
| Error | 54 | 2.99 | 3.77 | 70.34 | 136.71 | 260.59 |
| r ² | | 0.73 | 0.66 | 0.57 | 0.61 | 0.53 |
| C.V. (%) | | 47.65 | 15.05 | 18.89 | 32.94 | 16.22 |
| Media general | | 3.63 | 12.90 | 44.40 | 35.50 | 99.54 |

* Significativo: $p \leq 0.05$ %, **Altamente Significativo $p \leq 0.01$ %, GL: Grados de libertad, r²: Coeficiente de determinación, C.V.: Coeficiente de variación.

5.1.2. Análisis de los factores principales

Con respecto a la concentración de la solución nutritiva, ésta tuvo efectos significativos en la altura de planta a los 17 y 30 ddt, siendo en la fase inicial el empleo de una concentración al 75 % la que mayor altura de planta y diámetro de tallo presentó. En el segundo muestreo a los 30 ddt,

la concentración completa (100 %) fue la que mayor altura de planta, diámetro de tallo y área foliar presentó, superando primeramente a la del 75 y 50 % respectivamente. Esta tendencia se mantuvo el tercer muestreo a los 45 ddt en el diámetro de tallo y el área foliar. Finalmente, en el cuarto muestro no hubo diferencias ni para para el diámetro de tallo ni para el área foliar lo cual se justifica por el hecho de que las plantas fueron despuntadas a una altura de 1.5, con lo cual se limitó el crecimiento del pepino y la producción de más hojas, y por ende, de mayor área foliar, como consecuencia directa de la estandarización del cultivo, sin embargo, se debe considerar que las plantas desarrolladas con una solución nutritiva concentrada al 100 %, alcanzaron más precozmente su máxima expresión en el área foliar (Cuadro 10).

Resultados similares a los encontrados en el presente estudio en pepino, fueron observados por Magdaleno *et al.* (2006) con la aplicación de la solución nutritiva universal de Steiner en concentraciones de 25, 50, 75 y 100 %, sobre el desarrollo de plántulas de tomate de cáscara producidas en contenedores e invernadero.

A partir de estos resultados, se infiere la existencia de una alta relación entre el empleo de una concentración relativamente alta de solución nutritiva con el incremento en la biomasa del cultivo, quizá como resultado de plantas mejor nutridas. Esto resulta acorde a lo indicado por Marschner (1995), quien señala que con frecuencia se observan problemas de suministro de los iones de los elementos minerales a la raíz debido a la disminución en concentración alrededor de la superficie de la rizósfera, denominado comúnmente como zona de agotamiento.

Cuadro 10. Comparación de medias por efecto de la concentración de la solución nutritiva para altura de planta, diámetro de tallo y área foliar medidas a los 17, 30, 45, y 80 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato

| Concentración de Solución Nutritiva (%) | Altura de Planta (cm) | Diámetro de Tallo (mm) | Área Foliar por Planta (m ²) |
|---|-----------------------|------------------------|--|
| | 17 ddt | 17 ddt | |
| 100 | 34.97 b ^t | 7.08 a | - |
| 75 | 36.78 a | 7.08 a | - |
| 50 | 33.63 b | 6.79 a | - |
| DMSH | 1.72 | 0.39 | - |
| | 30 ddt | 30 ddt | 30 ddt |
| 100 | 104.90 a | 9.04 a | 0.205 a |
| 75 | 102.92 a | 8.87 a | 0.180 a |
| 50 | 92.87 b | 8.28 b | 0.186 a |
| DMSH | 3.73 | 0.46 | 0.031 |
| | 45 ddt | 45 ddt | 45 ddt |
| 100 | - | 9.80 a | 0.517 a |
| 75 | - | 9.63 a | 0.471 ab |
| 50 | - | 9.13 b | 0.454 b |
| DMSH | - | 0.23 | 0.062 |
| | 80 ddt | 80 ddt | 80 ddt |
| 100 | - | 9.81 a | 0.629 a |
| 75 | - | 9.63 a | 0.605 a |
| 50 | - | 9.26 b | 0.596 a |
| DMSH | - | 0.32 | 0.064 |

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta (Tukey $\alpha = 0.05$). ^t Medias con la misma letra en las columnas no presentan diferencia significativa. ddt: Días después del trasplante.

Con respecto a las frecuencias de riego, a los 17 ddt, se observaron diferencias significativas en altura de planta aunque no para diámetro de tallo. La mayor altura de planta se obtuvo con la aplicación de siete riegos por día, siendo en promedio de 35.30 cm. A los 30 ddt se encontraron diferencias significativas en área foliar, siendo la aplicación de siete riegos promovió la mayor cantidad del dosel vegetal. A los 45 y 80 ddt, se encontró significancia para el diámetro de tallo con la aplicación de la más alta frecuencia de riego. Similar al efecto de la solución nutritiva, a los 80 ddt no se encontraron diferencias significativas para el área foliar, debido probablemente al despunte realizado a los 1.5 m de altura, aunque cabe resaltar que los tratamientos con siete riegos al día, alcanzaron primero el área foliar definitiva (Cuadro 11), y en el caso del peso seco de raíz, se encontraron efectos significativos, siendo el uso de siete riegos por día el tratamientos con el mayor valor, que en promedio fue de 4.64 g, y aunque afectó numéricamente el peso seco total, no se alcanzó diferencia estadística, posiblemente porque el peso seco de la raíz representa un porcentaje muy pequeño respecto al peso seco total de la planta (Cuadro 13).

Similar a los resultados obtenidos, Yoshida *et al.* (2011) observaron que la mayor cantidad de riegos al día, que implica la reducción de la cantidad de agua aplicada por riego, fue más efectiva para el crecimiento de las plantas independientemente del nivel de nutrientes.

Al respecto, Snyder y Bauerle (1985) señalan que las plantas de pepino, no responden directamente a las cantidad de riegos aplicados por día, sino más bien al potencial hídrico presente en el sustrato, aunque bien señalan que con la implementación de una alta frecuencia de riego, las diferencias entre valores del potencial entre las aplicaciones se amortiguan, y se mantienen en niveles adecuados que no producen estrés hídrico.

Cuadro 11. Comparación de medias por efecto de la frecuencia de riego para altura de planta, diámetro de tallo y área foliar medidas a los 17, 30, 45, y 80 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato

| Frecuencia de Riego | Altura de Planta (cm) | Diámetro de Tallo (mm) | Área Foliar por Planta (m ²) |
|---------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| | 17 ddt | 17 ddt | |
| 7 | 35.30 ab [†] | 6.99 a | - |
| 3 | 35.86 a | 7.08 a | - |
| 1 | 34.21 b | 6.91 a | - |
| DMSH | 1.47 | 0.26 | - |
| | 30 ddt | 30 ddt | 30 ddt |
| 7 | 101.49 a | 8.84 a | 0.204 a |
| 3 | 100.44 a | 8.65 a | 0.168 b |
| 1 | 96.76 a | 8.70 a | 0.198 a |
| DMSH | 3.16 | 0.37 | 0.022 |
| | 45 ddt | 45 ddt | 45 ddt |
| 7 | - | 9.69 a | 0.485 a |
| 3 | - | 9.49 b | 0.487 a |
| 1 | - | 9.37 b | 0.470 a |
| DMSH | - | 0.20 | 0.048 |
| | 62 ddt | 62 ddt | 80 ddt |
| 7 | - | 9.60 ab | 0.619 a |
| 3 | - | 9.74 a | 0.610 a |
| 1 | - | 9.35 b | 0.602 a |
| DMSH | - | 0.30 | 0.509 |

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta (Tukey $\alpha = 0.05$). [†] Medias con la misma letra en las columnas no presentan diferencia significativa. ddt: Días después del trasplante.

Lo anterior conduce a suponer que las plantas de pepino presentan menor estrés hídrico a medida que se incrementa la frecuencia de riego a lo largo del día, logrando mantener en condiciones de estabilidad la CE en el sustrato por medio del lavado de adecuado de sales en el medio, lo cual permite deducir que existe una adecuada absorción de nutrimentos en la rizósfera, los cuales se canalizan por medio de un tejido vascular bien desarrollado hacia los puntos de demanda.

Referente al volumen de sustrato, se encontraron diferencias significativas a los 17 ddt, con la mayor altura de planta (35.63 cm) y el mayor diámetro de tallo (7.08 mm), con el volumen de sustrato de 12 L. A los 30 ddt, los resultados fueron similares en altura de planta y diámetro de tallo, aunque en el área foliar no hubo diferencias significativas. A los 45 ddt, los resultados fueron similares para el diámetro de tallo, en cuanto al área foliar se refiere si hubo diferencias estadísticas, siendo la diferencia entre el mayor y menor volumen de sustrato del 20 %. Finalmente, a los 80 ddt se obtuvo un diámetro de tallo promedio de 9.74 mm y un área foliar promedio de 0.632 m², valores superiores en comparación con los del volumen de sustrato intermedio y aun con los del volumen reducido; en cuanto al área foliar por planta, la falta de significancia se atribuye al despunte de plantas al 1.5 m de altura, destacando que las plantas cultivadas en un volumen de 12 L de tezontle alcanzaron primeramente la mayor área foliar (Cuadro 12).

Cuadro 12. Comparación de medias por efecto del volumen de sustrato para altura de planta, diámetro de tallo y área foliar medidas a los 17, 30, 45, y 80 días después del trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato

| Volumen de Sustrato (L) | Altura de Planta (cm) | Diámetro de Tallo (mm) | Área Foliar por planta (m ²) |
|------------------------------|--------------------------|---------------------------|---|
| | 17 ddt | 17 ddt | |
| 12 | 35.63 a [†] | 7.08 a | - |
| 8 | 35.62 a | 7.08 a | - |
| 4 | 34.12 b | 6.79 b | - |
| DMSH | 0.66 | 0.11 | - |
| | 30 ddt | 30 ddt | 24 ddt |
| 12 | 102.38 a | 8.90 a | 0.195 a |
| 8 | 101.48 a | 8.69 b | 0.193 a |
| 4 | 96.83 b | 8.60 b | 0.182 a |
| DMSH | 1.55 | 0.14 | 0.022 |
| | 45 ddt | 45 ddt | 45 ddt |
| 12 | - | 9.78 a | 0.533 a |
| 8 | - | 9.53 b | 0.480 b |
| 4 | - | 9.24 c | 0.428 c |
| DMSH | - | 0.14 | 0.038 |
| | 80 ddt | 80 ddt | 80 ddt |
| 12 | - | 9.74 a | 0.632 a |
| 8 | - | 9.60 b | 0.604 a |
| 4 | - | 9.35 c | 0.594 a |
| DMSH | - | 0.13 | 0.054 |

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta (Tukey $\alpha = 0.05$). [†] Medias con la misma letra en las columnas no presentan diferencia significativa. ddt: Días después del trasplante.

También a los 80 ddt tuvo efectos significativos en el peso seco de la raíz, tallo y hojas (Cuadro 13). Se encontró que al utilizar un volumen de 12 L, se presentó la máxima acumulación de materia seca en dichos órganos, así como en la planta. En el caso del peso seco de frutos, no hubo diferencias significativas, pero esto último se debió en parte a que en pepino los frutos se cortan en un estado inmaduro y cuando alcanzan un tamaño comercial de 22 cm de longitud con un peso comercial alrededor de 340 g por fruto (Cuadro 13).

Cuadro 13. Comparación de medias para pesos secos de raíz, tallo, hoja, de frutos y total a los 80 días después de trasplante en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato

| Peso Seco | | | | | |
|---|---------------------|--------------|-------------|---------------|--------------|
| | Raíz | Tallo | Hoja | Frutos | Total |
| Concentración de la Solución Nutritiva | | | | | |
| 100 % | 3.75 a [†] | 12.94 a | 45.58 a | 34.04 a | 100.31 a |
| 75 % | 3.70 a | 12.50 a | 43.15 a | 38.63 a | 100.31 a |
| 50 % | 3.43 a | 13.57 a | 44.45 a | 33.84 a | 98.01 a |
| DMSH | 1.26 | 1.29 | 5.97 | 9.47 | 11.39 |
| Frecuencia de Riego | | | | | |
| 7 | 4.64 a | 13.03 a | 44.44 a | 38.68 a | 102.65 a |
| 3 | 3.28 ab | 12.60 a | 44.07 a | 34.91 a | 97.35 a |
| 1 | 2.96 b | 13.08 a | 44.68 a | 34.69 a | 98.63 a |
| DMSH | 1.57 | 1.34 | 4.33 | 8.26 | 8.20 |
| Volumen de Sustrato | | | | | |
| 12 L | 4.67 a | 14.08 a | 47.97 a | 34.58 a | 120.67 a |
| 8 L | 3.33 b | 13.01 a | 44.74 ab | 34.64 a | 100.60 a |
| 4 L | 2.88 b | 11.62 b | 40.48 b | 37.28 a | 95.36 a |
| DMSH | 0.98 | 1.10 | 4.76 | 5.71 | 9.17 |

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta (Tukey $\alpha = 0.05$). [†] Medias con la misma letra en las columnas no presentan diferencia significativa.

Estos resultados coinciden con lo planteado por Nesmith y Duval (1998) y Reghin *et al.*, (2006) en el sentido de que los caracteres fisiológicos y morfológicos de las plántulas son afectados por la restricción de espacio para el crecimiento radical. Lo anterior permite deducir que el volumen de sustrato influye en el crecimiento vegetativo de las plantas de pepino, debido posiblemente a que, al existir un mayor volumen, existe una mayor cantidad de solución disponible por planta y se puede mantener durante más tiempo en forma de reserva, lo cual propicia que en la rizósfera los nutrimentos se encuentren disponibles en cantidades y formas adecuadas durante más tiempo para poder ser absorbidos, lo cual disminuye el riesgo de presentar un estrés salino o nutrimental.

Los resultados encontrados en los caracteres morfológicos del pepino del presente estudio, fueron similares a los reportados por Pires *et al.* (2011), quienes encontraron una correlación positiva entre el incremento del área foliar debida al incremento del volumen de sustrato, aunque no hubo un incremento en el rendimiento de frutos; aunque contrastan con lo reportado por Gül *et al.* (2009), quienes no hallaron diferencias significativas por el efecto del volumen de sustrato sobre la longitud de tallo y el número de entrenudos, en un estudio realizado con cuatro variedades de pepino.

5.1.3. Análisis de las interacciones

Se encontró que la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y las frecuencias de riego fue significativa para la altura de planta y el diámetro de tallo a los 17, 30 y 45 ddt, pero no tuvo efectos en el área foliar por planta (Cuadros 5 al 8), y a los 80 ddt se encontraron diferencias significativas para el peso seco de hoja y el total (Cuadro 9). Para altura de planta y diámetro de

tallo, se observó que el comportamiento de éstas variables fue diferente para la concentración del 50 % en comparación al comportamiento observado con las concentraciones al 75 y 100 % (Figuras 1 a 7).

Con excepción del primer muestreo que mostró un comportamiento atípico, en el resto de las gráficas donde se observó la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riegos, se encontró que a medida que se incrementó la frecuencia de riegos por día, sin modificar la lámina total diaria de riego aplicada, tendió a aumentar tanto la altura de planta como el diámetro de tallo, al utilizar soluciones nutritivas con concentraciones del 100 y 75 %; sin embargo, con la concentración al 50 % tendió a aumentar en combinación con uno y tres riegos al día (aunque tuvo menor altura y diámetro de tallo en comparación con las otras dos concentraciones de las soluciones nutritivas más concentradas) y a disminuir cuando se aumentó la frecuencia a siete riegos por día (Figuras 1 a 5).

Para el peso seco de hojas y el total, se encontró que la solución nutritiva completa (100 %) acumuló la mayor cantidad de materia seca por encima de otras dos concentraciones e incrementó dicho contenido conforme se incrementó la frecuencia de riegos, aunque la concentración máxima se presentó al aplicar tres riegos por día. En el caso de la solución concentrada al 75 %, el incremento de materia seca fue gradual, y alcanzó el máximo promedio de contenido de materia seca con la aplicación de 7 riegos por día. Por el contrario, la solución nutritiva con baja concentración (50 %), mostró una tendencia a disminuir el contenido de materia seca al incrementar la frecuencia de riegos, esto debido quizá, como se explicó anteriormente para las variables morfológicas, a que la aplicación de más riegos con una solución nutritiva tan diluida favorece que parte de los nutrimentos de la rizósfera sean lavados y arrastrados por el drenaje

frecuente, disminuyendo su asimilación por la planta, mientras que con un solo riego al día, los nutrimentos quedan retenidos en la zona de la rizósfera por más tiempo y puedan ser mejormente aprovechados (Figuras 6 y 7).

Este comportamiento, como lo indican Badr y El-Yazied (2007), puede ser debido a que la reposición más frecuente de la solución nutritiva, en combinación con una mayor cantidad de nutrimentos disueltos en la misma solución, ocasiona que la rizósfera mantenga niveles mayores de nutrimentos, quedando en una concentración óptima en la zona de la raíz capaz de promover el crecimiento (Figuras 1 a 7).

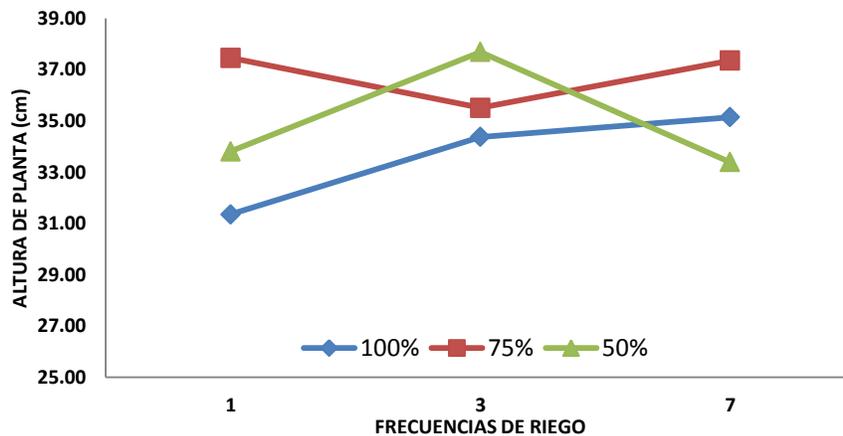


Figura 1. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en la altura de planta a los 17 días después del trasplante.

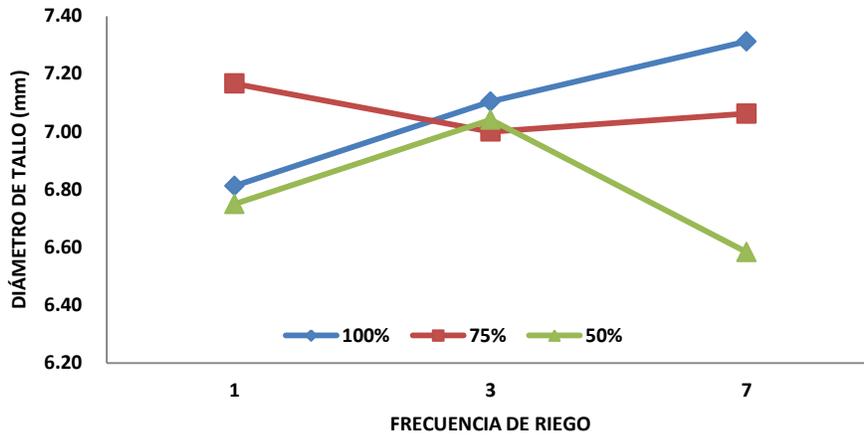


Figura 2. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en el diámetro de tallo a los 17 días después del trasplante.

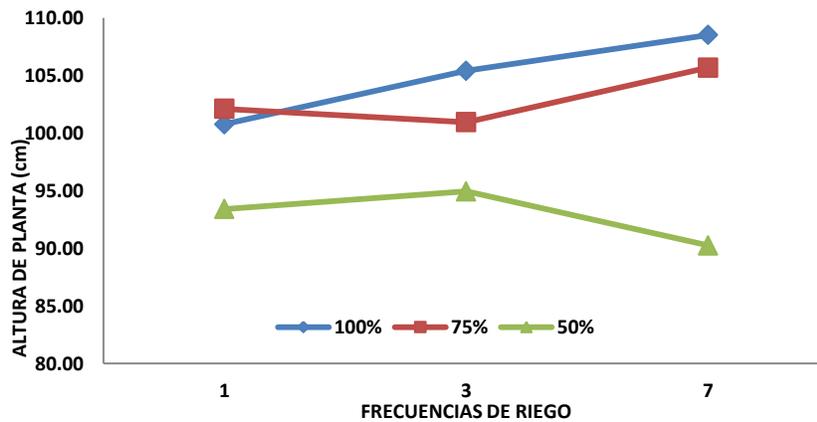


Figura 3. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en la altura de planta a los 30 días después del trasplante.

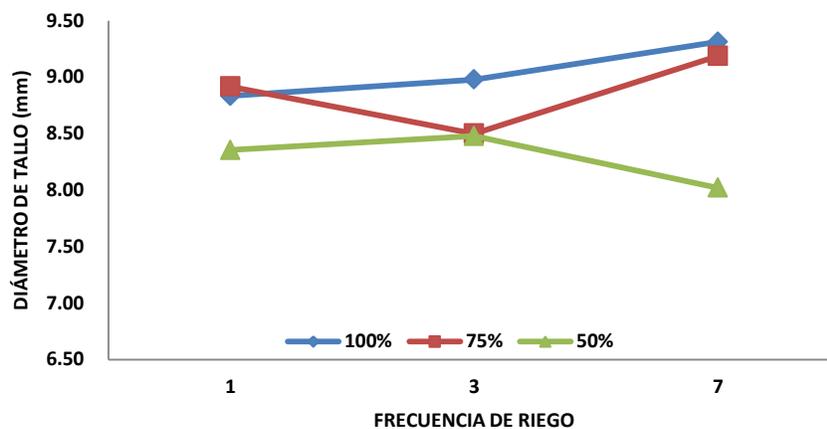


Figura 4. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en el diámetro de tallo a los 30 días después del trasplante.

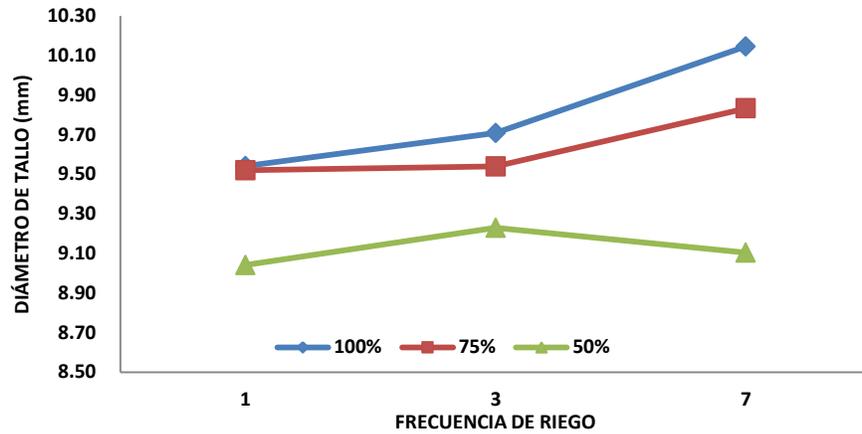


Figura 5. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en el diámetro de tallo a los 45 días después del trasplante.

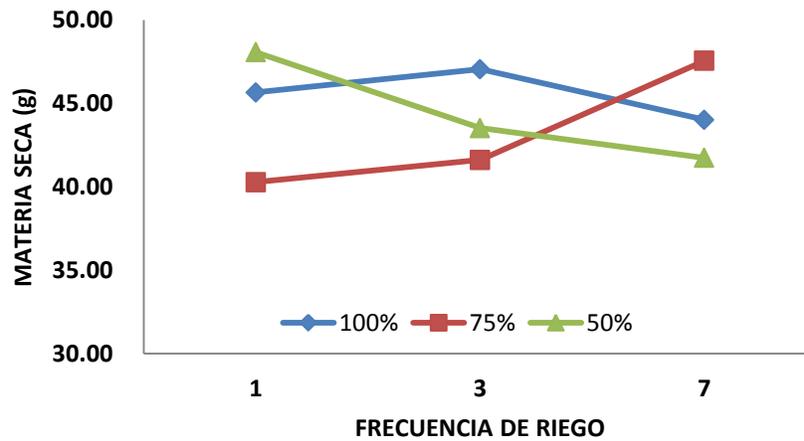


Figura 6. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en la acumulación de peso seco en hojas a los 80 días después del trasplante.

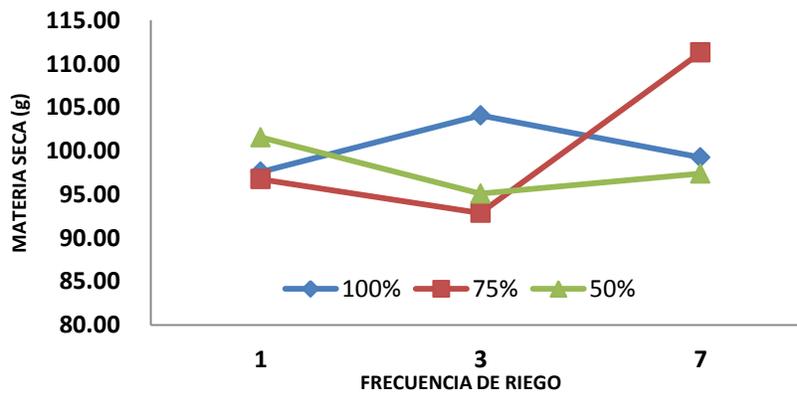


Figura 7. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en la acumulación de peso seco total a los 80 días después del trasplante.

Se encontró que hubo un efecto significativo para la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y el volumen de sustrato en cuanto a la variable altura de planta a los 17 y 30 ddt, y en el caso del diámetro de tallo a los 30 y 45 ddt (Cuadros 5 al 8) y no se observaron diferencias significativas para los valores de peso seco en ninguno de los órganos (Cuadro 9). En general, se observó que al aumentar la concentración de la solución nutritiva y el volumen de sustrato se incrementan los valores de los indicadores del crecimiento, quizá porque hubo mayor disponibilidad de nutrimentos ya que en la solución nutritiva existen prácticamente los nutrimentos considerados esenciales para las plantas (Castellanos y Ojodeagua, 2009) aunado a un mayor volumen de sustrato que propició mejores condiciones para el crecimiento de la raíz, con mayor espacio, más oxigenación, mayor cantidad de agua y nutrimentos retenidos, y la distribución y acumulación de materia seca (Pereira y Martínez, 1999).

Este comportamiento se explica porque las plantas de pepino, al ser regadas con soluciones nutritivas concentradas al 100 y 75 %, sin importar el volumen de sustrato, presentan estadísticamente la misma altura de planta y diámetro de tallo, pero al ser sometidas a una concentración de solución nutritiva del 50 %, ambas variables se ven afectadas negativamente, siendo el efecto más drástico cuando se combina el empleo de un volumen de 4 L de tezontle (Figuras 8 a 11). Es posible que en condiciones de estrés por una menor disponibilidad de agua y nutrimentos, debido a un volumen de sustrato limitado se haya limitado el crecimiento en la altura de planta y en el diámetro de tallo.

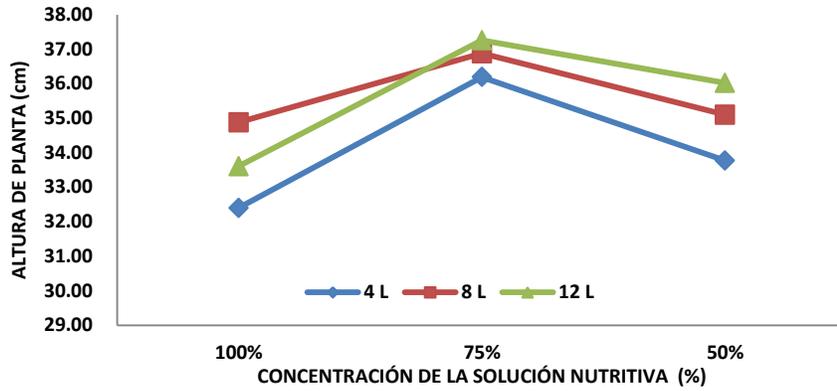


Figura 8. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y el volumen de sustrato en la altura de planta a los 17 días después del trasplante.

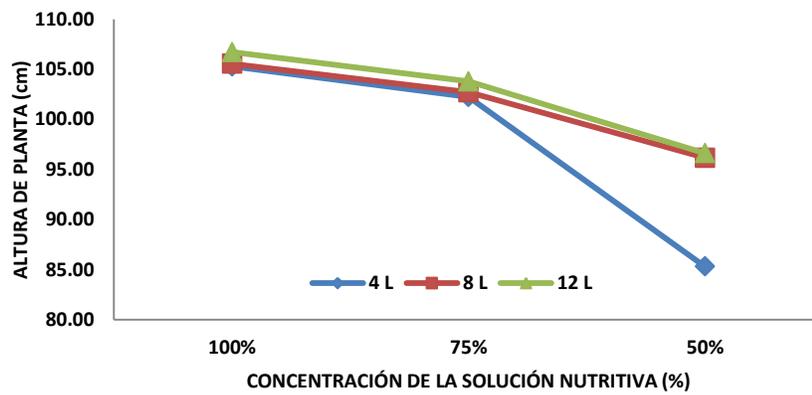


Figura 9. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y el volumen de sustrato en la altura de planta a los 30 días después del trasplante.

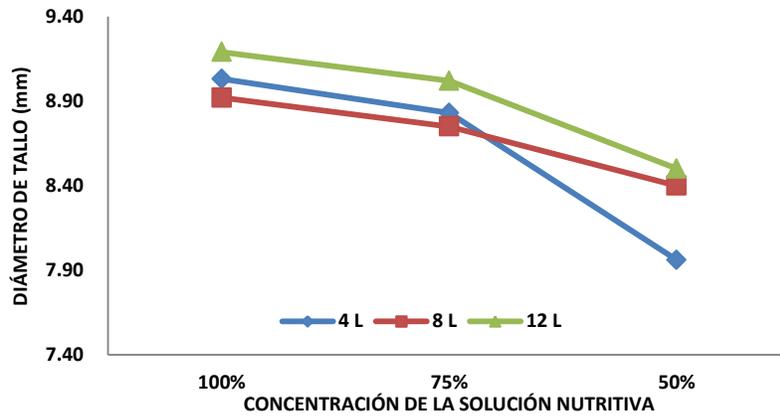


Figura 10. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 30 días después del trasplante.

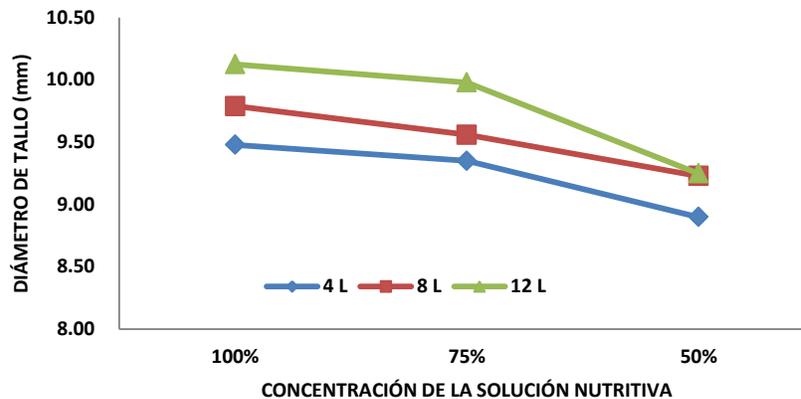


Figura 11. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 45 días después del trasplante.

La interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato fue estadísticamente significativa para todos los muestreos en altura de planta y diámetro de tallo, y para el área foliar a los 45 ddt (Cuadro 5 al 8) y a los 80 ddt también fue significativa para el peso seco de tallo y hojas (Cuadro 9). El comportamiento observado, indicó que un volumen de tezontle alto (12 L) y medio (8 L), generan plantas más vigorosas con mayor altura, diámetro de tallo, área foliar, peso seco en tallo y hojas, con tendencia a incrementarse ligeramente a medida que aumenta la cantidad de riegos por día. Por el contrario, en un volumen de tezontle limitado (4 L), combinado con bajas frecuencias de riego al día, las variables indicadas de crecimiento se ven afectadas negativamente (Figuras 12 a 20).

Con respecto al peso seco de tallo y hojas, las diferencias encontradas se explican porque los valores de estas variables disminuyeron sólo con la frecuencia de tres riegos por día, pero volvieron a aumentar con siete riegos (Figuras 22 y 23). Este comportamiento no parece tener una explicación fisiológica y probablemente se deba a un error de muestreo. En todo caso se sugiere hacer otro trabajo de investigación que lo corrobore (Figuras 19 y 20).

Independientemente del volumen de sustrato, al incrementar la frecuencia a siete riegos por día, existe una tendencia a incrementarse la altura de planta, el diámetro de tallo, peso seco de tallo y hojas, como resultado probablemente de una mejor distribución de agua en el tejido vascular a lo largo del día (Figuras 12 a 20).

Por lo tanto, se puede considerar que el mayor volumen de sustrato proporcionó a las plantas una capacidad de amortiguamiento, lo que les permitió disponer con mayor facilidad del agua con un mejor balance de nutrientes a lo largo del día.

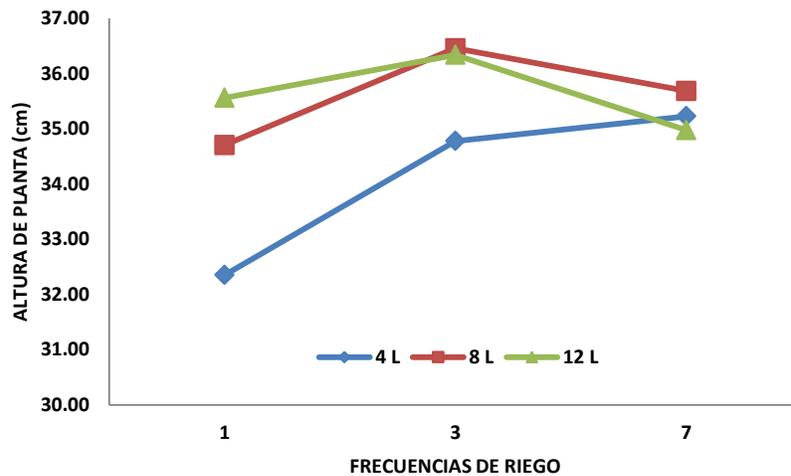


Figura 12. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en la altura de planta a los 17 días después del trasplante.

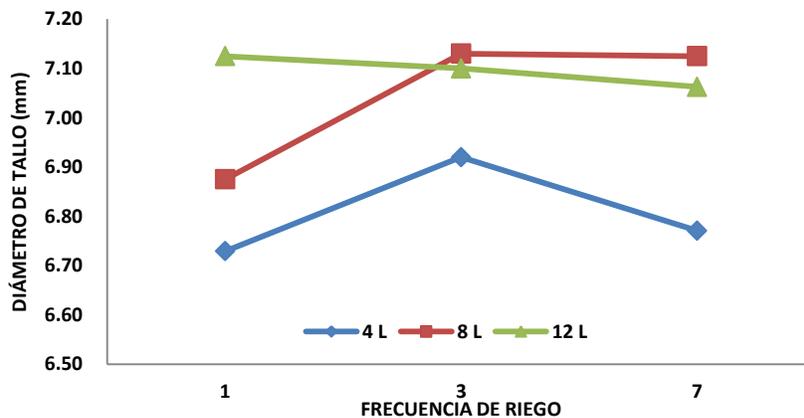


Figura 13. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 17 días después del trasplante.

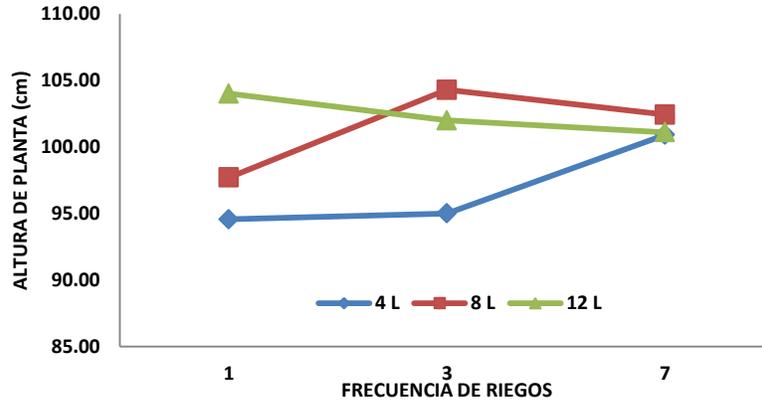


Figura 14. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en la altura de planta a los 30 días después del trasplante.

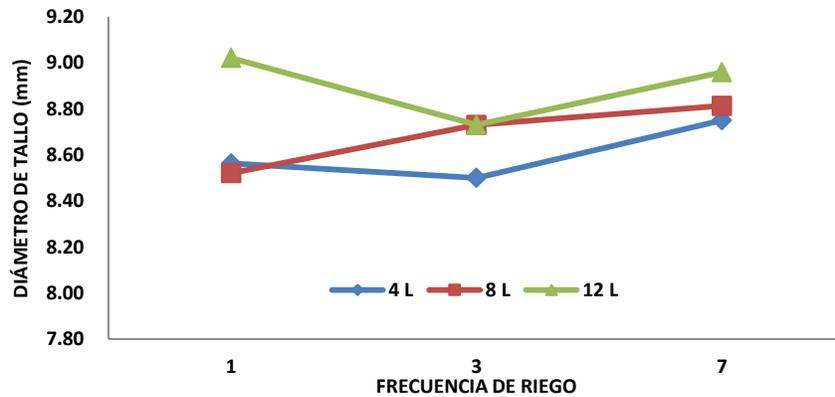


Figura 15. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 30 días después del trasplante.

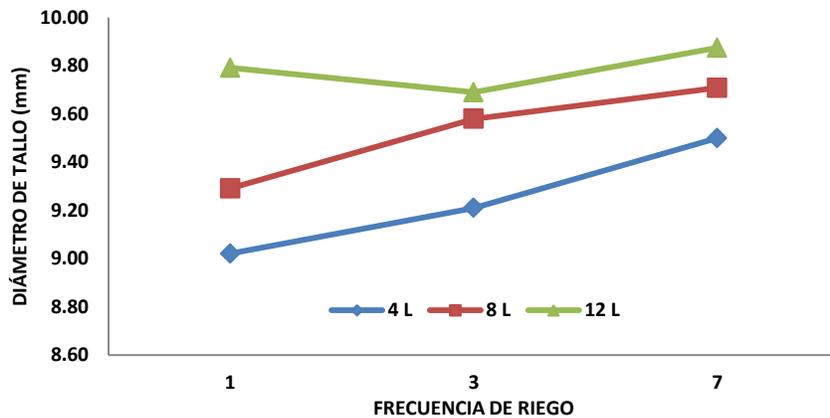


Figura 16. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 45 días después del trasplante.

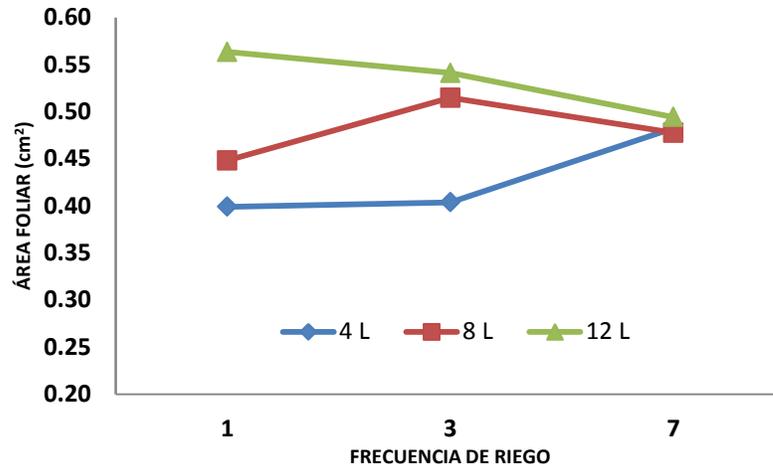


Figura 17. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en el área foliar a los 45 días después del trasplante.

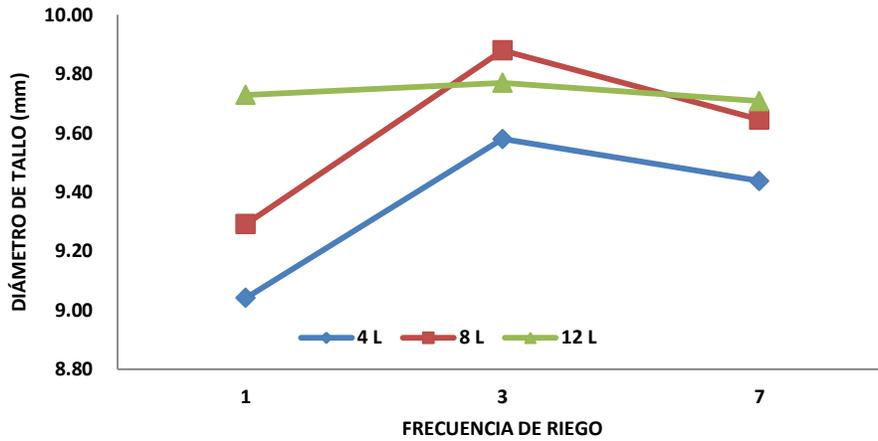


Figura 18. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en el diámetro de tallo a los 80 días después del trasplante.

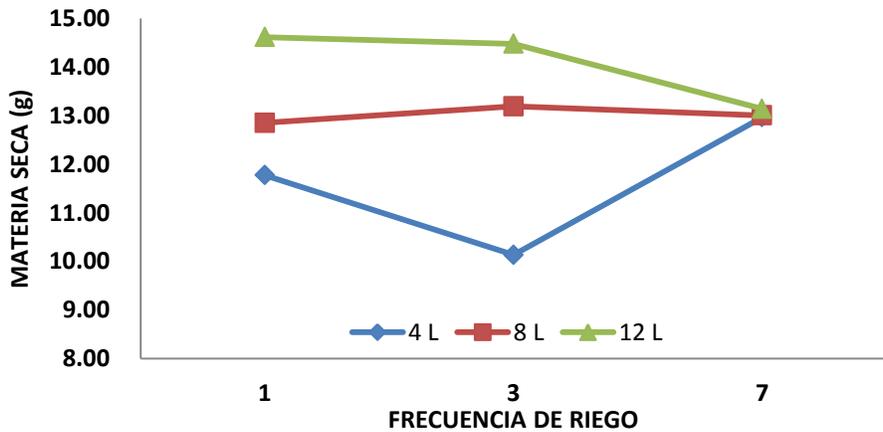


Figura 19. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en la acumulación de peso seco en tallo a los 80 días después del trasplante.

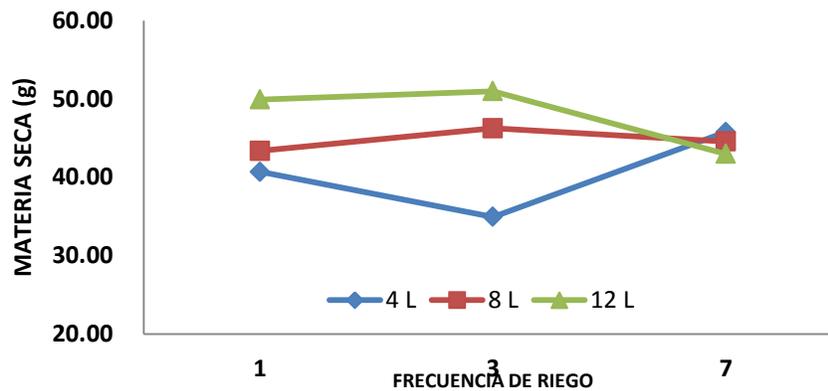


Figura 20. Representación gráfica de la interacción entre la frecuencia de riego y el volumen de sustrato en la acumulación de peso seco en hojas a los 80 días después del trasplante.

Estos resultados están acordes con lo reportado por Burés (1997), Riviere *et al.* (1990) citado por Salas y Urrestarazu (2004), y por Pires *et al.* (2011), quienes indican que las plantas de pepino desarrolladas en contenedores pequeños o sustratos con baja porosidad y poros grandes, pueden agotar rápidamente el agua disponible en el sustrato, con un aumento significativo de la CE, lo cual afecta directamente el crecimiento de la planta, recomendando como una formas para contrarrestar este efecto, incrementar de la frecuencia de riegos aplicada por día.

De forma similar, Pereira y Martínez (1999) encontraron que este esquema de resultados pueden ser explicados por la influencia de la restricción del sistema radical sobre el crecimiento de la parte aérea, debido a que poca exploración de la raíz reduce la disponibilidad de nutrientes, agua, oxígeno, niveles de citocininas y otros factores relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas.

5.2. Análisis nutrimental

5.2.1. Análisis de varianzas

En el tejido de las plantas, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de concentración de SN para el contenido de nitrógeno (N), fósforo (P) y magnesio (Mg), no así para el potasio (K) ni para el calcio (Ca). Con respecto a la interacción entre SN y FR, no se encontraron diferencias significativas (Cuadro 14).

Cuadro 14. Cuadrado medios y nivel de significancia para la extracción de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en hojas de pepino hidropónico cultivado en tezontle bajo tres concentraciones de solución nutritiva y tres frecuencias de riego

| Fuentes de Variación | GL | Nitrógeno | Fósforo | Potasio | Calcio | Magnesio |
|----------------------|----|-----------|---------|---------|--------|----------|
| Bloques | 3 | 0.10 | 0.011 | 0.52 | 3.10 | 0.09 |
| Solución | 2 | 2.37* | 0.025* | 0.06 | 0.63 | 0.31* |
| Frecuencia | 2 | 0.33 | 0.0016 | 0.10 | 1.34 | 0.07 |
| Solución*Frecuencia | 4 | 0.28 | 0.0063 | 0.55 | 2.18 | 0.72 |
| Error | 24 | 0.20 | 0.0033 | 0.47 | 1.38 | 0.03 |
| r ² | | 0.59 | 0.58 | 0.27 | 0.40 | 0.66 |
| C. V. (%) | | 15.99 | 14.85 | 29.53 | 35.61 | 14.00 |
| Media general | | 2.77 | 0.39 | 2.32 | 3.30 | 1.24 |

* Significativo: $p \leq 0.05$ %, G. L.=Grados de libertad, r^2 =Coeficiente de determinación, C.V.=Coeficiente de variación.

5.2.2. Análisis de los factores principales

Lambers *et al.* (2008) mencionan que el N, P y K son los principales nutrimentos que limitan el crecimiento de las plantas, y por consiguiente sus rendimientos, por lo cual, se asume que en ambientes favorables, se encontrarán en altas concentraciones en el tejido.

En cuanto a la solución nutritiva, se encontraron diferencias significativas en el contenido de N, P y Mg (Cuadro 14). Se encontró para el N que la máxima concentración se tuvo con la solución nutritiva completa (100 %), con un contenido de 3.12 % de N, lo cual lo ubica dentro de los valores óptimos de este elemento para el pepino, mientras que la concentración al 75 % con un valor de 2.92 %, lo ubicaría dentro de una concentración baja, y en el caso de la concentración de SN al 50 %, en niveles de deficiencia (Cuadro 15). Los resultados obtenidos resultan acordes a lo establecido por Moreno *et al.* (2011), quienes demostraron que una mayor concentración de N en hojas favorece el desarrollo de las variables morfológicas.

El efecto de la solución nutritiva en el contenido de P en el tejido foliar, tuvo un valor de 0.44 % para la concentración al 100 %, el cual se encuentra considerado como una concentración de P normal, mientras que las otras dos concentraciones de la solución nutritiva, tuvieron en promedio valores ligeramente más bajos de lo normal, pero considerados como aceptables (Cuadro 15). De manera análoga, los resultados obtenidos son acordes a lo observado por Silber *et al.* (2005), quienes observaron un incremento significativo en la absorción de fósforo en el cultivo de chile, determinando que dicho incremento se debe primordialmente a que el P proveído es aprovechado mejor al suministrarse en cantidades más bajas pero en riegos más frecuentes.

En el caso del Mg, los valores reportados para la concentración de solución nutritiva al 50 % tuvo el valor promedio más alto, con 1.34 %, seguida de la solución nutritiva concentrada al 75 %, ubicando a este elemento en un rango alto, al igual que la solución nutritiva concentrada al 100 %, lo cual indica que las concentraciones de Mg aportadas en la solución nutritiva se encuentran por encima de los valores óptimos para la planta, con lo que se puede considerar un consumo de lujo para este elemento (Cuadro 15).

Cuadro 15. Comparación de medias para contenido de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en hoja de pepino hidropónico cultivado en tezontle bajo tres concentraciones de solución nutritiva y tres frecuencias de riego

| | Nitrógeno | Fósforo | Potasio | Calcio | Magnesio |
|---|---------------------|----------------|----------------|---------------|-----------------|
| % en base a materia seca | | | | | |
| Concentración de la Solución Nutritiva (%) | | | | | |
| 100 | 3.12 a [†] | 0.44 a | 2.39 a | 3.44 a | 1.06 b |
| 75 | 2.92 a | 0.38 b | 2.28 a | 3.44 a | 1.33 a |
| 50 | 2.27 b | 0.35 b | 2.27 a | 3.04 a | 1.34 a |
| DMSH | 0.45 | 0.06 | 0.70 | 1.20 | 0.18 |
| Frecuencia de Riego | | | | | |
| 7 | 2.61 a | 0.38 a | 2.22 a | 3.53 a | 1.21 a |
| 3 | 2.76 a | 0.38 a | 2.39 a | 3.44 a | 1.34 a |
| 1 | 2.94 a | 0.40 a | 2.34 a | 2.92 a | 1.19 a |
| DMSH | 0.45 | 0.06 | 0.70 | 1.20 | 0.18 |

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta (Tukey $\alpha = 0.05$). [†] Medias con la misma letra en las columnas no presentan diferencia significativa.

5.3. Componentes del rendimiento

5.3.1. Análisis de varianzas

No se encontraron diferencias significativas para el rendimiento de fruto ni para número de frutos por planta en ninguno de los tres factores estudiados, con excepción del volumen de sustrato que tuvo diferencias significativas para el índice de cosecha (Cuadro 16). Debido a que los frutos se cosechaban cuando alcanzaban un tamaño comercial de 22 cm de longitud, el peso por fruto fue muy similar para todos los tratamientos (un promedio de 340 g por fruto).

Cuadro 16. Cuadrados medios del rendimiento de fruto, número de fruto e índice de cosecha en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato

| Fuentes de Variación | GL | Rendimiento de Fruto | Número de Frutos | Índice de Cosecha |
|-------------------------------|----|----------------------|------------------|-------------------|
| Bloques | 3 | 83.35 | 417.44 | 0.027 |
| Solución Nutritiva | 2 | 87.29 | 153.93 | 0.027 |
| Error a | 6 | 27.45* | 110.40 | 0.007 |
| Frecuencia de Riego | 2 | 18.06 | 185.45* | 0.010 |
| Solución *FR | 4 | 30.33* | 238.19* | 0.006 |
| Error b | 18 | 8.90 | 35.73 | 0.010 |
| Volumen de Sustrato | 2 | 4.33 | 55.12 | 0.024* |
| Solución * Sustrato | 4 | 1.74 | 3.94 | 0.006 |
| Frecuencia * Sustrato | 4 | 6.30 | 29.51 | 0.008 |
| Solución*Frecuencia* Sustrato | 8 | 4.00 | 28.35 | 0.005 |
| Error | 54 | 5.96 | 35.77 | 0.008 |
| r ² | | 0.76 | 0.71 | 0.56 |
| C.V. (%) | | 14.97 | 12.54 | 24.81 |
| Media general | | 16.30 | 47.71 | 0.36 |

* Significativo Tukey = 0.05 %, **Altamente Significativo Tukey = 0.01 %, GL=Grados de libertad, r²=Coeficiente de determinación, C.V.=Coeficiente de variación.

En cuanto a la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego, se presentaron diferencias significativas para rendimiento y número de frutos. Las demás interacciones no fueron significativas para las variables mencionadas. Las demás interacciones no fueron significativas (Cuadro 16).

5.3.2. Análisis de los factores

El volumen de sustrato afectó significativamente el índice de cosecha (Cuadro 16). El resultado obtenido indica que el menor volumen de tezontle, aunque estadísticamente no tuvo diferencias en el peso seco total, fue un 20 % menor que el peso seco del volumen de 12 L de tezontle, lo cual indica que para el índice de cosecha el volumen más eficiente fue el de 4 L, dado que con una menor cantidad de peso seco total y área foliar, las plantas de pepino produjeron la misma cantidad y rendimiento de frutos (Cuadro 17).

Si bien no se observaron diferencias significativas en los componentes del rendimiento, si se presentaron diferencias numéricas (Cuadro 16). Con respecto a la concentración de la solución nutritiva, numéricamente la menor concentración fue mayor para las variables del rendimiento y número de frutos. Es importante considerar que el estado general de la planta se debe en gran medida a un adecuado manejo de la nutrición vegetal; por cuestiones de manejo, pudiesen llegar a presentarse problemas nutricionales en el cultivo, por lo que para minimizar riesgos, se recomienda en dado caso emplear una solución nutritiva concentrada al 75 %, que por un lado represente un ahorro económico en el consumo de fertilizantes sobre una concentración completa, y a la vez no expone a las plantas a sufrir un déficit nutrimental (Cuadro 17).

Análogamente, en el caso de las frecuencias de riego, la implementación de un solo riego por día, conllevaría el riesgo, por un manejo inadecuado, de afectar el rendimiento al someter las plantas de pepino a un estrés hídrico, que puede provocar, en un corto tiempo, pérdidas totales del cultivo, dada su sensibilidad. Por tal motivo, se recomienda la implementación de tres a siete riegos por día, debido a que se obtienen los valores numéricos más altos para rendimiento y número de frutos, y que a la vez minimizan el impacto negativo de los cambios en la CE del sustrato (Cuadro 17).

Finalmente, en el caso del volumen de sustrato, si bien estadísticamente no hay diferencias entre un volumen de 4 L de tezontle con uno de 12 L, el menor volumen implica mayores cuidados en el manejo del cultivo, y dado la escasa capacidad de retención de nutrimentos, de amortiguamiento ante los cambios de la CE del medio y almacenamiento de agua, se recomienda el uso de un mayor volumen, mínimamente de 8 L, esto con la finalidad de reducir costos de producción y operación que se generan al implementar un volumen de sustrato mayor sin mermar el rendimiento (Cuadro 17).

Cuadro 17. Comparación de medias del rendimiento de fruto, número de fruto e índice de cosecha en pepino hidropónico cultivado bajo tres concentraciones de solución nutritiva, tres frecuencias de riego y tres volúmenes de sustrato

| | Rendimiento de Fruto (Kg · m⁻²) | Número de Frutos | Índice de Cosecha |
|---|---|-------------------------|--------------------------|
| Concentración de la Solución Nutritiva | | | |
| 100 % | 15.55 a [†] | 47.97 a | 0.33 a |
| 75 % | 15.27 a | 45.97 a | 0.38 a |
| 50 % | 18.10 a | 49.64 a | 0.35 a |
| DMSH | 3.79 | 7.60 | 0.06 |
| Frecuencia de Riego | | | |
| 7 | 17.11 a | 50.33 a | 0.37 a |
| 3 | 16.05 a | 46.36 b | 0.35 a |
| 1 | 15.76 a | 46.44 b | 0.34 a |
| DMSH | 1.78 | 3.40 | 0.06 |
| Volumen de Sustrato | | | |
| 12 L | 16.65 a | 48.92 a | 0.33 b |
| 8 L | 16.32 a | 47.78 a | 0.35 ab |
| 4 L | 15.95 a | 46.44 a | 0.38 a |
| DMSH | 1.39 | 3.40 | 0.05 |

DMSH: Diferencia mínima significativa honesta (Tukey $\alpha = 0.05$). [†] Medias con la misma letra en las columnas no presentan diferencia significativa.

5.3.3. Análisis de las interacciones.

Se encontraron diferencias significativas en el rendimiento y número de frutos por efecto de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego (Cuadro 16). Gráficamente, se aprecia que la interacción en el incremento en rendimiento y número de frutos que sufre el tratamiento al 75 % se presenta cuando la frecuencia es aumentada de 3 a 7 riegos por día, mientras que en la solución nutritiva concentrada al 100 y al 50 % no se presentó ese efecto y se mantienen prácticamente sin cambio con el aumento de las frecuencias., es decir que la solución nutritiva concentrada al 75 % es el único tratamiento que se comportó como se esperaba según la hipótesis planteada (Figuras 21 y 22). Se observó que al incrementar la frecuencia de riego se incrementó el rendimiento de fruto, acorde a lo encontrado por Hernández *et al.* (2005).

Los resultados de rendimiento obtenidos en el presente trabajo son similares a los reportados por Snyder y Bauerle (1985), y por Pires *et al.* (2011), en ambos casos para jitomate, quienes pese a haber observado diferencia en variables morfológicas como área foliar e indicadores del crecimiento como en el peso seco, en los componentes del rendimiento, como es el número de frutos, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. Coinciden también con lo encontrado en experimentos similares realizados por Haghuis (1990) en pepino, quien al comparar el efecto de volumen de sustrato y láminas de riego no encontró diferencias estadísticas significativas; y con los encontrado por Snyder y Bauerle (1985), Kemble *et al.* (1994) y por Sánchez *et al.* (2012).

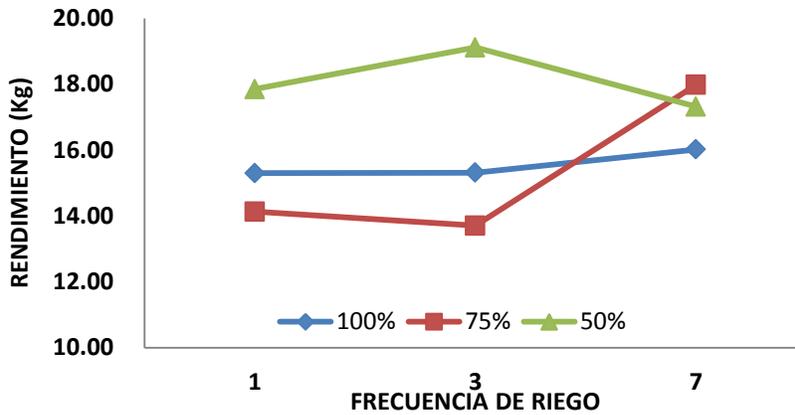


Figura 21. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en rendimiento de fruto.

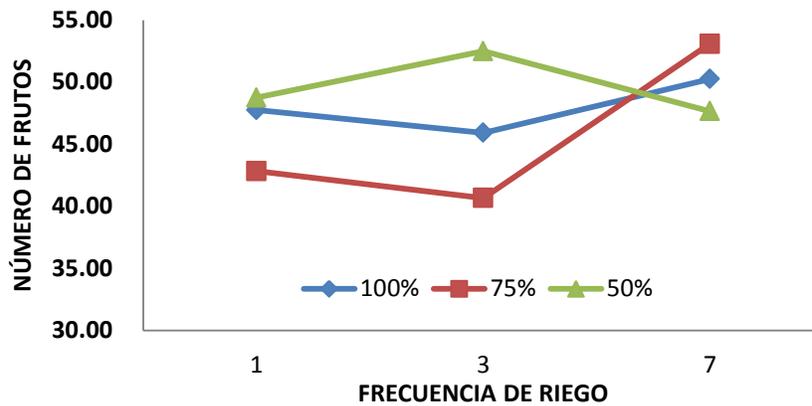


Figura 22. Representación gráfica de la interacción entre la concentración de la solución nutritiva y la frecuencia de riego en el número de fruto.

El rendimiento de pepino hidropónico encontrado en el presente trabajo, concuerda con lo reportado por Gómez y Sánchez (2003), quienes tampoco encontraron diferencias estadísticas significativas, empero, determinaron que una concentración de solución nutritiva al 66 % impacta positivamente en la reducción de los costos de producción de jitomate, con un adecuado margen de rentabilidad.

Dado los resultados obtenidos, se puede establecer que un volumen de 4 L de tezontle es suficiente para soportar la producción de pepino hidropónico sin mermar su rendimiento. También se demuestra que se puede bajar la concentración de la solución nutritiva entre un 25 y un 50 % sin efectos adversos en el rendimiento o calidad de fruto.

Con la reducción en volumen de sustrato y de la concentración de la solución nutritiva combinadas, se pueden lograr ahorros muy significativos en los costos de producción que pudieran incrementar la rentabilidad económica de los productores que siguieran un sistema de producción similar. Sin embargo hay que considerar que se estaría trabajando en un límite mínimo donde cualquier error podría impactar de manera importante el proceso de producción.

Por ello la recomendación más prudente que, en base a los resultados de este trabajo se podría hacer, es de utilizar contenedores con 8 L de sustrato y una concentración de la solución del 75 % que haría más fácil el manejo técnico, a la vez que se lograrían ahorros significativos en sustrato y fertilizantes, respecto a los sistemas convencionales de producción de pepino en hidroponía que usan contenedores con más de 12 L de sustrato y soluciones nutritivas al 100 %.

VI. CONCLUSIONES

La concentración del 75 % de solución nutritiva (N 150, P 37.5, K 180, Ca 217.5 y Mg 37.5 mg·L⁻¹), es la más adecuada para la producción de pepino hidropónico ya que genera el mismo rendimiento que la normal al 100 (N 200, P 50, K 240, Ca 290 y Mg 50 mg·L⁻¹) pero implica un 25 % de ahorro en fertilizantes.

La frecuencia de tres riegos por día resultó suficiente para la producción de pepino independientemente del volumen de sustrato y de la concentración de la solución nutritiva.

Con un volumen limitado de sustrato de 4 litros en combinación con una baja frecuencia de riego se afectó negativamente el rendimiento de fruto de plantas de pepino.

No hubo diferencias en rendimiento con el uso de distintos volúmenes de sustrato, pero el de 8 L es quizá el más adecuado para la producción de plantas de pepino hidropónico pues produce la misma cantidad de materia seca y rendimiento de fruto que con volúmenes de 4 y 12 L, pero con 4 L el manejo técnico del sistema es más delicado, y aún hay un ahorro significativo en el costo del sustrato con respecto al uso de contenedores de 12 L.

VII. LITERATURA CITADA

- Abad B., M., P. Noguera M. y C. Carrión B. 2005. Sustratos para el cultivo sin suelo y fertirrigación, pp. 299-354. *In: Fertirrigación*. Cadahia, C. (ed). Ediciones Mundi Prensa. Barcelona, España.
- Adams, P. 2004. Aspectos del manejo de los diferentes sustratos, su comparación, elección y factores medioambientales a considerar, pp. 239-262. *In: Tratado de Cultivos sin Suelo*. Urrestarazu G., M. (ed.). 3ª edición. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, España.
- Adamson, R. M. and E. F. Mass. 1981. Soilless culture of seedless greenhouse cucumbers and sequence cropping. Ministerio de Servicios y Suplementos. Canadá. 20 p.
- Aguilera C, M. y R. Martínez E. 1996. Relaciones Agua – Suelo – Planta – Atmósfera. 4ª edición. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México. 256 p.
- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de Análisis Químico de Tejido Vegetal. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C. México. 156 p.
- Ansorena M., J. 1994. Sustratos. Ediciones Mundi Prensa. España. 172 p.
- Ávila, J. A. 2001. El mercado de los fertilizantes en México, Situación actual y perspectivas. Problemas del Desarrollo. Instituto de Investigaciones Económicas (IIEc) – Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 32(127): 189 – 207.
- Badr, M. A. and A. A. A. El-Yazied. 2007. Effect of fertigation frequency from subsurface drip irrigation on tomato yield grown on sandy soil. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 3(1): 279 – 285.
- Bastida T., A. 2002. Sustratos Hidropónicos. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México. 72 p.

- Benko, B., J. Borosic., B. Novak, N. Tothand and I. Zutic. 2008. Tomato yield dependent on substrate type and volumen. *Acta Horticulturae*. 779: 455 – 459.
- Burés, S. 1997. *Sustratos*. Ediciones Agrotécnicas. Madrid, España. 342 p.
- Cantliffe, D. J. 1993. Pre-and postharvest practices for improved vegetable transplant quality. *HortTechnology* 3: 415-417.
- Cardona, C., H. Araméndiz y C. Barrera. 2009. Modelo para estimación de área foliar en berenjena (*Solanum melongena* L) basado en muestreo no destructivo. *Temas Agrarios* 14(2): 14 – 22.
- Carrillo H., M. M. 2001. *El Sector Agropecuario Mexicano. Antecedentes Recientes y Perspectivas*. Instituto Politécnico Nacional (IPN). México. México, D.F. 243 p.
- Casas C. A. y E. Casas B. 1999. *Análisis de Suelo – Agua - Planta y su Aplicación en la Nutrición de Cultivos Hortícolas en la Zona Peninsular*. 2ª edición. Caja Rural de Almería. España. 249 p.
- Castaños, C. M. 2000. *Horticultura. Manejo Simplificado*. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México, 527 p.
- Castellanos, J. Z. y J. L. Ojodeagua. 2009. Formulación de la solución nutritiva, pp. 131 – 156. *In: Manual de Producción de Tomate en Invernadero*. Castellanos, J. Z. INTAGRI. México.
- Chapman, H. D. and P. E. Pratt. 1973. *Métodos de análisis de suelos, plantas y agua*. Traducido al español por Contin, A. Editorial Trillas. México, D.F. 195 p.
- Decoteau, D.R., 2000. *Vegetable Crops*. Upper Rever Company. New Jersey, USA. 464 p.
- Delaplane, K. S. and D. F. Mayer. 2000. *Crop Pollination by Bees*. CABI Publishing. New York, USA. 344 p.
- Díaz S., F. R. 2004. *Selección de sustratos para la producción de hortalizas en invernadero*.

- Memorias del IV Simposio Nacional de Horticultura. Invernaderos: Diseño, Manejo y Producción. Torreón, Coah. México. pp. 44 – 68.
- Dong, C. J., X. L. Wang and Q. M. Shang. 2011. Salicylic acid regulates sugar metabolism that confers tolerance to salinity stress in cucumber seedlings. *Scientia Horticulturae*. 129(4): 629 – 636.
- Esau, K. 1985. *Anatomía Vegetal*. Traducido al español por Pons R., J. 3ª edición. Omega. Barcelona, España. 779 p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2002. *El Cultivo Protegido en Clima Mediterráneo*. Roma. 2002. 323 p.
- Gajc, J., D. Bujalski and A. Chrzarnowska. 2008. Effect of a substrate on yielding and quality of greenhouse cucumber fruits. *J. Elementol*. 13(2): 205 – 210.
- Ganea, R., D. Indrea, A. S. Apahidean, M. Apahidean, D. Maniutiu, D. Ficior and I. Paven. 2002. Effect of composition and volume of substrate on yield and fruit quality of under glass grown tomatoes. *Buletinul Universitatii de Stiinte Agricole si Medicina Veterinara Cluj-Napoca. Seria Horticultura* 57: 150 – 153.
- García, E. 1987. *Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen (Para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Offset Larios. México. 217 p.
- George, R. 1999. *Vegetable Seed Production*. 2nd ed. CABI Publishing. Cambridge, U.K. 328 p.
- Gómez H., D. y F. Sánchez C. 2003. Soluciones diluidas para la producción de jitomate a un racimo. *Terra Latinoamericana* 21(1): 57 – 63.
- Gómez L., M. D., J. P. Fernández T. y A. Baille. 2006. Cucumber fruit quality harvest affected by soilless system, crop age and preharvest climatic conditions during two consecutive seasons. 2006. *Scientia Horticulturae*. 110(1): 68 – 78.

- Guenkov, G. 1974. Fundamentos de la Horticultura Cubana. Instituto Cubano del Libro. La Habana, Cuba. 355 p.
- Gül, A., F. Kidoğlu and D. Anaç. 2007. Effect of nutrient sources on cucumber production in different substrates. *Scientia Horticulturae*. 113(2): 216 – 220.
- Gül, A., Y. Tüzel, O. Tuncay, F. Kidoğlu, I. H. Tüzel, D. Anaç, B. Okur and R.Z. Eltez. 2009. Effect of container type and cultivar on growth of cucumber plants in a closed hydroponic system. *Acta Horticulturae*. 807: 571 -576.
- Guzmán D., G. 2004. Hidroponía en Casa. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. 25 p.
- Haghuis, P. 1990. Substrate. Reduction of mat volumen for cucumber is posible. *Journal Groeten en Fruit*. 46: 32 – 33.
- Halfacre, R. G. 1979. Horticulture. McGraw-Hill. Nueva York, U.S.A. 722 p.
- Hernández S., Q., F. Sánchez C., A. Peña L., D. Montalvo H. 2005. Sustratos y frecuencias de riego para la producción de jitomate en hileras a diferente altura. *Terra Latinoamericana*. 23(3): 341 – 349.
- Jones, J. B. 2005. Hydroponics. A Practical Guide for the Soilless Grower. 2nd edition. CRC Press. USA. 423 p.
- Juárez L., P., R. Bugarín M., R. Castro B., A. L. Sánchez M., E. Cruz C., C. R. Juárez R., G. Alejo S. y R. Balois M. 2011. Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente* 3(8): 21 – 27.
- Kaya C., H. Kirnak and D. Higgs. 2001. Effects of supplementary potassium and phosphorus on physiological development and mineral nutrition of cucumber and pepper cultivars grown at high salinity (NaCl). *Journal of Plant Nutrition*. 24(9): 1457 – 1461.

- Kemble, J. M., J. M. Davis, R. G. Gardner and D. C. Sanders. 1994. Root cell volume affects growth of compact-growth-habit tomato transplants. *HortScience* 4(29): 261 – 262.
- Lambers, H., T. L. Pons and F. S. Chapin III. 2008. *Plant Physiological Ecology*. 2nd ed., Springer Science. New York, USA. 623 p.
- Lara, H. A. 2000. Manejo de la solución nutritiva en la producción de tomate en hidroponía. *Terra*. 17(3): 221-229.
- Lawrence, G. H. M. 1951. *Taxonomy of Flowering Plants*. The Macmillan Co. Nueva York, E.U.A. 823 p.
- León, J. 1987. *Botánica de los cultivos tropicales*. Segunda ed. Instituto Panamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José, Costa Rica. 393 p.
- Lerner, H.R. 1999. *Plant Responses to Enviromental Stresses*. Marcel Dekker Inc. U.S.A. 730 p.
- Leskovar, D. I. and P. J. Stoffella, 1995. Vegetable seedling root systems: morphology, development and importance. *HortScience* 30(6): 1153-1159.
- Lower, R. L. and M. D. Edwards. 1986. Cucumber breeding. *In: Breeding Vegetable Crops*. Bassett M. J (Ed). AVI Publishing Company INC. Westport, Conneticut, USA. 584 p.
- Magdaleno V., J. J., A. Peña L., R. Castro B., A. M. Castillo G., A. Galvis S., F. Ramírez P., B. Hernández H. 2006. Efecto de las soluciones nutritivas sobre el desarrollo de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo Serie Horticultura* 12(2): 223-229.
- Maloupa, E., A. Abou, M. Prasad and Ch. Kavafakis. 2001. Response of cucumber and tomato plants to different substrates mixtures of pumice in substrate culture. *Acta Hort*. 559: 593 – 600.

- Mao, X., M. Liu, X. Wang, C. Liu, Z. Hou and J. Shi. 2003. Effects of deficit irrigation on yield and water use of greenhouse grown cucumber in the North China Plain. *Agricultural Water Management*. 61: 219 – 228.
- Maroto B., J. V. 1983. *Horticultura Herbácea Especial*. Mundi-Prensa. Madrid, España. 702 p.
- Marschner, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2nd ed. Academic Press Limited. London, Great Britain. 889 p.
- McKersie, B. and Y. Leshem. 1994. *Stress and stress coping in cultivated plants*. Kluwer Academic Publisher. Neatherlands. 256 p.
- Mooney, H., W. Winner and E. Pell. 1991. *Response of Plants to Multiple Stresses*. Academic Press Inc. San Diego, Ca. USA. 422 p.
- Moreno P., E., F. Sánchez C., L. L. González M., C.A. Pérez M. y N. Magaña L. 2011. Efectos del volumen de sustrato y niveles de N-P-K en el crecimiento de plántulas de pepino. *Terra Latinoamericana* 29(1): 57-63.
- Moreno R., A., J. Aguilar D. y A. Luévano G. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios* 15(29): 763 – 774.
- Mortensen, E. 1986. *Horticultura Tropical*. Centro Regional de Ayuda Técnica para el Desarrollo Internacional. México. 182 p.
- Naddaf, O. A., I. Livieratos, A. Stamatakis, I. Tsirogiannis, G. Gizas and D. Savvas. 2011. Hydraulic characteristics of composted pig manure, perlite and mixtures of them and their impact on cucumber grown on bags. *Scientia Horticulturae*. 129(1): 135 – 141.
- Nesmith, D. S. and J. R. Duval. 1998. The effect of container size. *HortTechnology* 8(4): 495-498.
- Nuez V., F. y J. J. Ruíz M. 1996. *El Pepino Dulce y su Cultivo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma. 142 p.

- Ortiz. C., J., F. Sánchez C., M. C. Mendoza C. y A. Torres G. 2009. Características deseables de plantas de pepino crecidas en invernadero e hidroponía en altas densidades de población. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 32(4): 289 – 294.
- Ortiz-Villanueva, B. y C. A. Ortiz S. 1990. *Edafología*. 7ª edición. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México. 394 p.
- Pereira, P. R. G. e H. E. P. Martínez. 1999. Produção de mudas para o cultivo de hortaliças em solo e hidroponia. *Informe Agropecuário* 20: 24 - 31.
- Pérez G., M. y R. Castro B. 2011. *Jitomate en invernadero*. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México. 132 p.
- Pineda P., J., A. M. Castillo G., J. A. Morales C., M. T. Colinas L., L. A. Valdez A. y E. Avitia G. 2008. Efluentes y sustratos en el desarrollo de nochebuena. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 14(2): 131-137.
- Pires, R. C. M., P. R. Furlani, R. V. Ribeiro, D. B. Junior, E. Sakai, A. L. Lourencao and A. T. Neto. 2011. Irrigation frequency and substrate volume effects in the growth and yield of tomato plants under greenhouse conditions. *Scientia Agricola* 68(4): 400 – 405.
- Piróg, J., G. Bykowsky and W. Krzesinski. 2010. Effect of substrate type and method of fertigation control on yield size and fruit quality of greenhouse cucumber. *Acta Scientiarum Polonorum*. 9(4): 99 – 109.
- Raviv, M., J. H. Lieth. 2008. *Soilles Culture: Theory and Practice*. Elsevier. United States of America. 587 p.
- Reghin, M. Y., R. F. Otto, J. R. Olinik e C.F. S. Jacoby. 2006. Produção de cebola sobre palhada a partir de mudas obtidas em bandejas com diferentes números de células. *Horticultura Brasileira*. 24(4): 414 – 420.

- Resh, H. 2006. Cultivos hidropónicos. 5ª edición. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España. 558 p.
- Rodríguez, C. E. 1986. El cultivo del Pepino (*Cucumis sativus*, L.) bajo el sistema de grava con subirrigación. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México. 86 p.
- Rodríguez F., H. y J. Rodríguez A. 2002. Métodos de Análisis de Suelos y Plantas. Criterios de Interpretación. Trillas. México. 196 p.
- Salas S., M. C. y M. Urrestarazu G. 2004. Métodos de riego y fertirrigación en cultivo sin suelo, pp. 161-237. *In*: Tratado de Cultivos sin Suelo. Urrestarazu G., M. (ed.). 3ª edición. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, España.
- Salisbury, F. B. y C. W. Ross. 1994. Fisiología Vegetal. Traducido al español por González V., V. Grupo Editorial Iberoamérica. 759 p.
- Sánchez C., F. y E. R. Escalante R. 1988. Hidroponía. 3ª edición. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México 194 p.
- Sánchez C., F., J. Ortiz C., M. C Mendoza C., V. A. González H. y J. Bustamante O. 1998. Parámetros fisiológicos y agronómicos de jitomate en dos sistemas nuevos de producción. *Fitotecnia. Mexicana*. 21: 1-13.
- Sánchez C., F., E. C. Moreno P., E. Contreras M. y E. V. González. 2006. Reducción del ciclo de crecimiento en pepino europeo mediante trasplante tardío. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 29(2): 87 – 90.
- Sánchez C., F., E.C. Moreno P., A. Morales M., A. Peña L. y M. T. Colinas L. 2012. Densidad de plantación y volumen de sustrato en plántulas de jitomate (*Lycopersicon lycopersicon* Mill.). *Agrociencia*. 46(3): 255 – 266.

- Sandoval V., M. 2008. Cultivo de jitomate en invernadero en México, con énfasis en nutrición, pp. 11- 33. *In*: Jitomate. Tecnología para su Producción en invernadero. Bautista M., N., C. Chavarrín P. y F. Valenzuela E. 2ª edición. Colegio de Posgraduados (CP). México.
- Savvas, D. and H. Passam. 2002. Hydroponic Production of Vegetables and Ornamentals. Embryo Publicatios. Athens, Greece. 463 p.
- Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2012. Agricultura protegida 2012. En <http://www.sagarpa.gob.mx>. Fecha de consulta: 12 de noviembre 2012.
- Serrano, C. Z. 1979. Cultivo de Hortalizas en invernaderos. AEDOS. España. 360 p.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2012. En <http://www.siap.gob.mx>. Fecha de consulta: 15 de octubre de 2013.
- Silber, A., M. Bruner, E. Kenig, G. Reshef, H. Zohar, I. Posalski, H. Yehezkel, D. Shmuel, S. Cohen, M. Dinar, E. Matan, I. Dinkin, Y. Cohen, L. Karni, B. Aloni and S. Assouline. 2005. High fertigation frequency and phosphorus level: Effects on summer-grown bell pepper growth and blossom-end rot incidence. *Plant and Soil*. 270(1): 135 – 146.
- Snyder, G. R. and W. L. Bauerle. 1985. Watering frequency and media volume affect growth, water status, yield, and quality of greenhouse tomatoes. *HortScience*. 20(2): 205-207.
- Sonneveld, C. 2004. La nutrición mineral y la salinidad en los cultivos sin suelo: su manejo, pp. 305-367. *In*: Tratado de Cultivos sin Suelo. Urrestarazu G., M. (ed.). 3ª edición. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, España.
- Sonneveld, C. and W. Voogt. 2009. *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*. Springer. New York. 431 p.
- Stanghellini, M. S.; J. T. Ambrose and J. R. Schultheis. 1998. Seed production in watermelon: a comparison between two commercially available pollinators. *Hort Science*. 33(1): 28-30.

- Swiader, J. M.; G. W. Ware and J. P McCollum. 1992. Producing Vegetable Crops. Interstate Publisher Inc. Danville, Illinois, USA. 626 p.
- Tadeo, F. y A. Gómez C. 2008. Fisiología de las plantas y el estrés, pp. 577- 597. *In:* Fundamentos de Fisiología Vegetal. Azcon B., J y M. Talon (eds.). 2ª edición. Mc Graw-Hill. Madrid, España.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2006. Plant Physiology. 4th ed. Sinahuer Associates Inc. Sunderland, MA, USA. 764 p.
- Tamaro, D. 1987. Manual de Horticultura. Traducido al español por Caballero, A. Ediciones G. Gili. México. 932 p.
- Tejo, P. 2002. Panorama de la agricultura de América Latina y el Caribe, 1990-2000. United Nations Publications. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) – Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 219 p.
- Trejo T., L. I., M. Ramírez M., F. C. Gómez M., J. C. García A., G. A. Baca C. y O. Tejeda S. 2013. Evaluación física y química de tezontle y su uso en la producción de tulipán. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5: 863-876.
- Urrestarazu G., M. 2004. Bases y sistemas de los cultivos sin suelo, pp. 3-47. *In:* Tratado de Cultivos sin Suelo. Urrestarazu G., M. (ed.). 3ª edición. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, España.
- United States Department of Agriculture. (USDA). 2012. En www.ers.usda.gov Fecha de consulta: 12 de noviembre 2012.
- Valadéz, L. A. 1990. Producción de Hortalizas. LIMUSA. México, D.F. 298 p.
- Vargas C., J. M., A. M. Castillo G., J. Pineda P., J. A. Ramírez A. y E. Avitia G. 2014. Extracción nutrimental de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en mezclas de tezontle con aserrín nuevo y reciclado. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. 20(1): 71 – 88.

- Vargas T., P., J. Z. Castellanos R., J. J. Muñoz R., P. Sánchez G., L. Tijerina C., R. M. López R., C. Martínez S. y J. L. Ojodeagua A. 2008. Efecto del tamaño de partícula sobre algunas propiedades físicas del tezontle de Guanajuato, México. *Agricultura Técnica en México* 34(3): 323 – 331p.
- Vázquez, I., F. Sánchez C. e I. Miranda V. 2003. Producción de jitomate en hidroponía bajo invernadero. Universidad Autónoma Chapingo (UACH) – Departamento de Preparatoria Agrícola. México. 90 p.
- Wang, Z., Z. Liu, Z. Zhang and X. Liu. 2009. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in solar greenhouse based on 20 cm standard pan evaporation in Northeast China. *Scientia Horticulturae*. 123(1): 51-57.
- Walters, S. A., R., H. A. Riddle and M. E. Schmidt (2005). Container cell volume and transplant age influences muskmelon development and yield. *Journal of Vegetable Science* 11(1): 47-55.
- Whitaker, T. W. and G. N. Davis. 1962. Cucurbits. Interscience Publishers Inc. New York. 189 p.
- Wild, A. 1992. Condiciones del Suelo y Desarrollo de las Plantas según Russell. Mundi Prensa. Madrid, España. 1025 p.
- Xu, H., X. Sun, X. Wang, Q. Shi, X. Yang and F. Yang. 2011. Involvement of a cucumber MAPK gene (*CsNMAPK*) in positive regulation of ROS scavengence and osmotic adjustment under salt stress. *Scientia Horticulturae*. 127(4): 488 –493.
- Yoshida, C., Y. Iwasaki, A. Makino and H. Ikeda. 2011. Effects of irrigation management on the growth and fruit yield of tomato under drip fertigation. *Horticultural Research (Japan)* 3(10): 325 – 331.

- Zhang, H., D. Chi, Q. Wan, J. Fang and X. Fang. 2011. Yield and quality response of cucumber to irrigation and nitrogen fertilization under subsurface drip irrigation in solar greenhouse. *Agricultural Sciences in China*. 10(6): 921 – 930.
- Zhang, L., L. Zhang, J. Sung, Z. Zhang, H. Ren and X. Su. 2013. Rubisco gene expression and photosynthetic characteristics of cucumber seedling in response to water deficit. *Scientia Horticulturae* 161: 81 – 87.
- Zitter, T. A., D. L. Hopkins and C. E. Thomas. 2004. *Plagas y enfermedades de las cucurbitáceas*. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, España. 88 p.