



III CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2017

Puebla, Pue., del 28 al 30 de noviembre de 2017

RENDIMIENTO Y AHORRO DE AGUA Y FERTILIZANTES EN CULTIVOS HIDROPÓNICOS DE JITOMATE, PEPINO Y LECHUGA CON RECIRCULACIÓN DE LA SOLUCIÓN NUTRITIVA

Felipe Sánchez Del Castillo^{1*}; Esaú del Carmen Moreno Pérez¹.

¹Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 carretera México-Texcoco. C.P. 56230. Chapingo, Estado de México, México.

Correo electrónico: fsanchezdelcastillo@yahoo.com.mx - Teléfono: 5959570021 (*autor de correspondencia)

Resumen

Los sistemas hidropónicos con recirculación de la solución nutritiva, ahorran agua y fertilizantes, y disminuyen el impacto sobre el medio ambiente, pero por lo largo de los ciclos de cultivo en jitomate y pepino es difícil mantener el balance nutricional y controlar las enfermedades que atacan a la raíz, lo que causa un rendimiento menor respecto a sistemas donde dicha solución no se recircula. El objetivo de este estudio fue comparar la eficiencia de utilización de agua y nutrimentos y el rendimiento en el cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) pepino (*Cucumis sativus* L.) y lechuga (*Lactuca sativa* L.), entre sistemas hidropónicos con y sin recirculación usando ciclos de cultivo cortos, mediante el despunte temprano de las plantas y altas densidades de población. El diseño experimental fue bloques al azar con cinco repeticiones y cinco tratamientos para jitomate y pepino: Sistema de raíz flotante, camas con sustrato (tezontle) con y sin recirculación y bolsas con sustrato con y sin recirculación. Los rendimientos fueron mayores con el sistema de raíz flotante para los tres cultivos: en jitomate 16.7 kg m⁻² en un ciclo menor a cuatro meses, en pepino de 11.7 kg m⁻² en un ciclo de sólo dos meses y en lechuga se obtuvieron 25 piezas de más de 200 g en tan sólo 24 días. El ahorro de fertilizante y agua en los sistemas de recirculación con sustrato fue superior al 35 % respecto a los sistemas sin recirculación para los tres cultivos considerados.

Palabras clave adicionales: cultivo sin suelo, hidroponía, tezontle, despunte temprano.



Introducción

La agricultura protegida por los beneficios que ofrece (altos rendimientos y calidad, mayores niveles de sanidad e inocuidad de los productos obtenidos, seguridad en la producción con cierta independencia del clima, acceso a mejores mercados y, por lo tanto mayor potencial de alta rentabilidad económica), está creciendo en México. Actualmente están bajo cubierta más de 20,000 ha, de las cuales unas 12,000 son de invernaderos y 8000 de estructuras denominadas casa-sombra (Sánchez y Moreno 2017).

Debido a lo intensivo del manejo del suelo en los cultivos bajo invernadero, se favorece el establecimiento de patógenos en él después de algunos ciclos de cultivo (Takahashi, 1984). La compactación, la acumulación de sales, los desequilibrios nutricionales son otros factores que afectan el rendimiento por los cambios en las propiedades químicas y físicas (Liang *et al.*, 2006).

Una alternativa para atacar estos problemas es la hidroponía o cultivo sin suelo, en el cual las plantas crecen en una solución nutritiva, con o sin un sustrato como medio de soporte (Urrestarazu, 2000), lo cual permite desarrollar el sistema radical de las plantas en completa independencia del suelo. En estas condiciones la hidroponía le va ganando más terreno a la producción en suelo debido a que se logra mayor eficiencia y control del riego y la nutrición mineral, ausencia inicial de plagas, enfermedades y malezas, facilidad de esterilización de los sustratos, mayor rendimiento y calidad, y más sanidad e inocuidad, entre otras (Cánovas y Magán, 2003; Alarcón, 2006; Raviv y Lieth, 2008).

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

En la mayoría de los sistemas hidropónicos establecidos se aplica el riego por goteo con una solución nutritiva que contiene fertilizantes disueltos con los nutrientes minerales esenciales para las plantas, en concentraciones óptimas para su crecimiento y desarrollo. Para que plantas de cultivo como jitomates, pepino, y lechugas crezcan sin limitaciones nutricionales, la solución nutritiva debe tener un pH entre 5.5 a 6.5, una conductividad eléctrica (CE) entre 1.5 y 3 dS m⁻¹, y los nutrimentos minerales deben estar disociados en forma iónica en las proporciones y concentraciones adecuadas según sus tasas de absorción y en condiciones que eviten precipitados y antagonismos (Adams, 2004). La planta modifica el consumo de nutrimentos en función de sus fases de crecimiento y desarrollo, condiciones climáticas, y características de la solución nutritiva como la CE, pH, temperatura y oxígeno disuelto (Terabayashi *et al.*, 2004; Jones, 2005; Sonneveld y Voogt, 2009).



Cuando la solución drenada no se reutiliza y se permite la infiltración en el sitio o se conduce fuera del invernadero, al sistema hidropónico se le conoce como abierto; por el contrario, si se recoge para volverse a usar en el cultivo, previa esterilización y ajuste de pH, CE y concentración de nutrimentos, se le llama sistema cerrado (Alarcón, 2006).

El agua es un recurso natural cada vez más limitado, por lo cual es necesario buscar sistemas de producción donde su uso sea más eficiente para la producción de alimentos. Asimismo, los fertilizantes son cada vez más caros y representan un porcentaje alto del costo de producción en sistemas hidropónicos (Huang, 2009). Así, los sistemas cerrados presentan ventajas respecto a los abiertos: ahorro de agua y fertilizantes, menor impacto ambiental menor al evitar que grandes cantidades de nitrógeno, fósforo y otros minerales contaminen ríos, lagos, mantos freáticos y mares (Pardossi *et al.*, 2009; Massa *et al.*, 2010; Nakano *et al.*, 2010).

Debido al encarecimiento de los fertilizantes que impacta los costos de producción e indirectamente a la rentabilidad económica, y al impacto negativo en el ambiente que implica su lixiviación en los sistemas abiertos (Giuffrida y Leonardi, 2009), en hidroponía se están buscando métodos de manejo más eficientes. Por ello los sistemas hidropónicos abiertos empiezan a ser sustituidos por los cerrados (Alarcón, 2006).

Sin embargo los sistemas cerrados también presentan desventajas que pueden afectar el rendimiento final y la rentabilidad económica; se pueden mencionar: incremento gradual de la CE de la solución nutritiva con el paso del tiempo, desbalance de la solución nutritiva y mayor riesgo de dispersar enfermedades que atacan a la raíz (Tüzel *et al.*, 2009; Van-Os, 2009; Massa *et al.*, 2010). El desbalance de la solución nutritiva se genera por la acumulación de los iones menos consumidos por la planta (SO_4^{2-} , Ca^{2+} y Mg^{2+}), lo que rompe el equilibrio de nutrimentos y en la mayoría de las veces incrementa la CE a niveles que afectan el crecimiento y rendimiento, sobre todo con la presencia de un contenido alto de Na^+ y Cl^- en el agua de riego, obligando a desechar con frecuencia la solución nutritiva (Savvas *et al.*, 2009).

En la práctica comercial con sistemas hidropónicos cerrados, entre más largo es el ciclo de cultivo, mayor es la posibilidad de que aparezcan enfermedades en la raíz y desequilibrios en la solución nutritiva, lo que eventualmente puede afectar el rendimiento respecto a sistemas sin recirculación. Por ello con frecuencia se reportan rendimientos menores en sistemas cerrados respecto a los abiertos en cultivos de ciclo muy largo como el jitomate, chile pimiento o pepino, en los que durante varios meses coexisten etapas de crecimiento vegetativo con reproductivo (Savvas *et al.*, 2009; Nakano *et al.*, 2010).

En la Universidad Autónoma Chapingo se ha estado trabajando en el desarrollo de sistemas de producción para acortar el ciclo de trasplante a fin de cosecha a un máximo de dos meses para el caso del pepino y de menos de cuatro meses para el caso de jitomate. El sistema se basa en hacer el semillero en charolas con cavidades y espacios más grandes para lograr trasplantes exitosos con plántulas de más edad que las que se manejan por sistemas convencionales; esto se combina con despuntes (eliminación de la yema terminal) tempranos de las plantas para dejar 1 m de altura en el caso del



pepino y una altura similar y tres racimos por planta en el caso del jitomate. Para compensar el menor rendimiento que se obtiene por planta, se siembra en densidades más altas (6 a 8 plantas m^{-2}), lo cual es posible por la menor área foliar que desarrolla cada planta con el despunte (Sánchez *et al.*, 2006; Ortiz *et al.*, 2009; Sánchez *et al.*, 2014a; Sánchez *et al.*, 2104b).

Para el caso de la lechuga utilizando plántulas de 30 días de edad se logra completar el ciclo de cultivo de trasplante a fin de cosecha entre 30 y 40 días, lo cual puede permitir de 8 a 10 ciclos por año con densidades de población de 12 a 18 plantas m^{-2} de invernadero (Moreno *et al.*, 2015).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la factibilidad de escapar a desequilibrios importantes de la solución nutritiva, como para obtener al menos el mismo rendimiento y calidad que en los sistemas sin recirculación. También se estudió, para sistemas con recirculación de la solución nutritiva, si es posible lograr un ahorro significativo en agua y fertilizantes tanto para producir lechugas de calidad durante todo el año, así como pepinos y jitomates con las modalidades de acortar el ciclo de cultivo de pepino a dos meses y el de jitomate a menos de cuatro meses desde trasplante a fin de cosecha y en alta densidad de población.

Con ello se pretende contribuir a optimizar un sistema de producción que aproveche los beneficios ecológicos y económicos de recircular la solución nutritiva sin arriesgar el rendimiento y calidad por los desequilibrios nutricionales, y sin recurrir a costosos y frecuentes análisis químicos para corregirlos, aspectos que hacen muy difícil el manejo de los sistemas con recirculación de la solución desde el punto de vista técnico.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en invernaderos de la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo, Estado de México. Manejada como tres experimentos independientes, uno para cada cultivo: jitomate, pepino y lechuga. En jitomate se usó el híbrido comercial 'Juan Pablo' tipo saladette de la compañía US Agriseeds, el cual presenta crecimiento indeterminado, con excelente vigor y sus frutos presentan hombros redondos y peso promedio de 130 a 135 g con extraordinaria firmeza (www.usagriseeds.com). Para pepino se utilizó el híbrido Alcazar de la empresa Enza Zaden, que es de tipo americano planta muy fuerte, vigorosa con frutos cilíndricos de un color verde muy oscuro y ligeramente con espinas y excelente vida de anaquel. En el experimento con lechuga se utilizó el cultivar Cortesana M1 de la empresa Hydroenvironment la cual es de tipo mantequilla con un color verde claro. Para el trasplante se usaron plántulas de jitomate de 35 días de edad y para pepino y lechuga de 30 días, en los tres casos provenientes de charolas de 200 cavidades, en las que se utilizó turba (peat moss) como sustrato.

Los tratamientos (sistemas de producción) que se compararon para jitomate y pepino fueron los siguientes Figuras 1 a 4:

1. Sistema de bolsas con arena de tezontle (partículas de 1 a 3 mm) y recirculación de la solución nutritiva drenada (bolsa con recirculación). Las bolsas



tenían una capacidad de 15 L, de color negro por dentro y blanco por fuera, se instalaron sobre canales de PVC (policloruro de vinilo) a fin de recolectar la solución drenada. Los canales se pusieron con una ligera pendiente para que el drenaje de las bolsas se dirigiera hacia una cubeta de 19 L donde cada día se medía su volumen, pH y CE. La solución nutritiva que se colectaba se conducía a un tinaco de 400 L.

2. Sistema de bolsas con arena de tezontle sin recirculación de la solución nutritiva drenada (bolsa sin recirculación). El sistema era similar al tratamiento anterior, excepto que la solución drenada, después de medirle su volumen, pH y CE, se desechaba.

3. Camas con arena de tezontle y recirculación de la solución nutritiva drenada (cama con recirculación). Se construyeron camas con polietileno negro calibre 1000 en el fondo y con tablas de madera en los costados, con dimensiones de 1.9 m de largo por 0.9 m de ancho y 0.3 m de altura. El plástico negro sobresalió de las camas 30 cm hacia el pasillo para formar un canal para recuperar la solución del drenaje. Para rellenar la cama se depositó una capa de 5 cm de grava de tezontle (partículas de 4 a 8 cm) en el fondo y así facilitar el drenaje, y encima otra capa de 25 cm de arena de tezontle rojo (partículas de 1 a 3 mm) como sustrato. Se acolchó la superficie con un polietileno bicolor, blanco la parte superior y negro la parte inferior. Para recuperar el drenaje se perforó el plástico en la parte baja de la cama y se condujo por gravedad a cubetas de 19 L. A la solución drenada se le midió diariamente su volumen, pH y CE. La solución nutritiva que se colectaba se conducía a un tinaco de 400 L.

4. Camas con arena de tezontle sin recirculación de la solución nutritiva drenada (cama sin recirculación). El sistema era similar al tratamiento anterior, excepto que se desechaba la solución drenada, después de medirle su volumen, pH y CE.

5. Sistema de raíz flotante o hidroponía profunda. Se construyeron camas de madera (1.9 m de largo por 0.9 m de ancho y 0.3 m de profundidad), cuyo interior se cubrió con plástico negro calibre 1000. Las camas se llenaron con 400 L de solución nutritiva y se cubrieron con una placa de unicel (poliestireno expandido) que flotaba sobre ella. En el momento del trasplante las plántulas, con su cepellón, se pusieron dentro de vasos de plástico de 50 ml a los cuales se les retiró la base inferior con el propósito de sostener la plántula y que sólo las raíces quedaran sumergidas. La solución nutritiva se oxigenó continuamente con dos bombas de aire marca Resum®, AC-9602 (México). En este tratamiento el agua que las plantas transpiraban se restablecía todos los días al final del día, y diariamente se medía el pH y en su caso se ajustaba a un valor entre 5.5 y 6.5. También diariamente se registraba el valor de la CE. Para el cultivo de lechuga sólo se compararon los tratamientos 3, 4 y 5.

En los experimentos de pepino y jitomate se usó un diseño experimental de bloques completos al azar con cinco tratamientos y cinco repeticiones. La unidad experimental fue de 1.7 m² útiles (1.9 x 0.9 m), donde se establecieron 18 plantas distribuidas en tres hileras, separadas 30 cm entre plantas y entre hileras, con lo que se tuvo una densidad de 6 plantas m⁻² de invernadero considerando pasillos de 50 cm de ancho. Con

lechuga fueron tres tratamientos y cinco repeticiones con el mismo tamaño de unidad experimental y una densidad de 25 plantas m^{-2} (Figuras 5 y 6).

Cada tratamiento de cama y bolsa sin recirculación era abastecida con solución nutritiva por su propio tinaco de 1000 L mientras que los tratamientos de cama y bolsa abierta compartían un solo tinaco. Para cada tratamiento se usó una bomba de $\frac{1}{2}$ HP (Dica® modelo BPHP.50), un temporizador STEREN® modelo TEMP-08E, un filtro de anillos (Irritec®) de 120 mesh, un medidor de flujo marca Dorot® de 19 mm de diámetro, tubería de 1" y cinta de riego con gotero integrado con gasto de $1 L h^{-1}$. En los sistemas abiertos y cerrados se midió cada día el volumen de solución nutritiva aportada con el medidor de flujo, así como la cantidad de solución nutritiva drenada y colectada en las cubetas. También se determinó el pH y CE con un medidor portátil (Hanna®, modelo HI 98130); en el sistema de raíz flotante también se medía la cantidad de agua aportada, pH y CE.



Figura 1. Panorámica mostrando los diferentes tratamientos del experimento de jitomate despuntado a tres racimos por planta en alta densidad de población.



Figura 2. Detalle de la raíz de jitomate en el sistema de raíz flotante (izquierda). Ajuste de la solución nutritiva (derecha).



Figura 3. Panorámica mostrando los diferentes tratamientos del experimento de pepino con plantas despuntadas a 1 m de altura en alta densidad de población.



Figura 4. Detalle de la raíz de pepino en el sistema de raíz flotante.



Figura 5. Panorámica mostrando los diferentes tratamientos del experimento de lechuga.

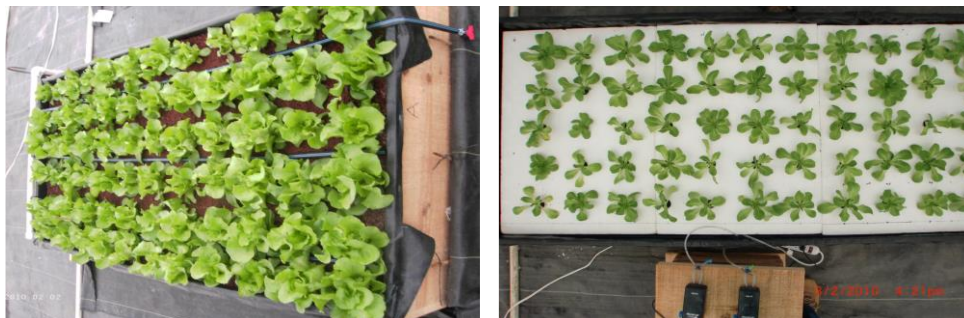


Figura 6. Sistema de camas con arena de tezontle como sustrato, con y sin recirculación (izquierda) y de raíz flotante (derecha).



La composición de la solución nutritiva inicial (mg L^{-1}) fue: N = 200, P = 60, K = 250, Ca = 200, Mg = 60, S = 200, Fe 0.1, Mn = 0.7, B = 0.5, Cu = 0.01 y Zn 0.01 (Sánchez *et al.*, 2009). En el caso de la lechuga las concentraciones fueron menores (N = 140, P = 40, K = 175, Ca = 140, Mg = 40, S = 140, Fe = 1.5, Mn = 0.5, B = 0.5, Cu = 0.1, y Zn = 0.1). Como fuentes se usaron los siguientes fertilizantes comerciales: nitrato de calcio, nitrato de potasio, sulfato de potasio, ácido fosfórico al 85 %, sulfato de magnesio, sulfato de amonio, quelato de hierro (Fe-EDTA), sulfato de manganeso, tetraborato de sodio, sulfato de cobre y sulfato de zinc. El volumen de riego aplicado dependía de las condiciones climáticas y la etapa fenológica del cultivo, y se procuraba un drenaje de 20 a 30 % de lo aplicado.

Para analizar el contenido de N, K, y Ca se utilizó un electrodo de ion selectivo (Thermo Scientific® modelo Orion 4 Star), y para P la técnica colorimétrica por el método del molibdovanadato (Chapman y Pratt, 1973). En los sistemas cerrados con sustrato la solución nutritiva pasaba por un filtro de mallas (80 mesh) y después se desinfectaba con una lámpara UV con capacidad de 25 watts y 22.71 L min^{-1} (marca Philips) y se vertía al tinaco de 1000 L, de acuerdo con el tratamiento (bolsa cerrada o cama cerrada). Una vez en el tinaco se reponían los elementos faltantes procurando alcanzar la concentración de la solución inicial. La solución ajustada se aforaba a 1000 L (capacidad de los tinacos) con la solución nutritiva normal. En las tinas de HP la solución nutritiva se ajustaba individualmente en cada repetición agregando agua simple o, de ser necesario, reponiendo los elementos minerales faltantes.

Aunque en cada experimento se estudiaron variables morfológicas, en el presente trabajo sólo se reportan resultados de rendimiento total (kg), número de frutos por unidad de superficie y el peso medio de fruto (g) o de cada pieza en el caso de lechuga. Con los datos se realizaron análisis de varianza y pruebas de comparación de medias de Tukey ($p = 0.05$).

Además se registró el consumo y ahorro de agua y de N, P, K; para el caso de jitomate también se analizó el consumo de Ca. El consumo de agua (L) se calculó con los datos registrados con el medidor de flujo y el volumen de drenaje recolectado en cada sistema. En el sistema de raíz flotante se usó el volumen de agua restablecido. El consumo de nutrientes (g) se determinó con los análisis químicos realizados a los drenajes cada 15 días a partir de la fecha del trasplante. Debido a la forma de recolección de las muestras, no se efectuaron pruebas estadísticas para el consumo y ahorro de agua y nutrimentos minerales.

Resultados y discusión

En el caso del experimento con jitomate, con excepción del sistema de bolsa sin recirculación, el sistema de raíz flotante tuvo estadísticamente mayor rendimiento que los demás sistemas de producción con casi 17 kg m^{-2} en un periodo de 115 días de trasplante a fin de cosecha (Tabla 1). Pardossi *et al.* (2009) reportan que la CE alta en las soluciones de los sistemas con recirculación reducen el rendimiento. En el presente estudio hubo niveles elevados de salinidad (6 dS m^{-1}) con los sistemas de cama y bolsa



con recirculación, pero sólo en la etapa de cosecha (106 ddt), cuando ya no había crecimiento vegetativo ni reproductivo. En el tercer racimo la mayoría de los frutos ya estaban madurando lo cual redujo la posibilidad de afectar la producción; es decir, lo corto del ciclo de cultivo permitió escapar a los efectos negativos de la CE alta. En el sistema de raíz flotante no se alcanzó un valor mayor a los 4 dS m⁻¹. Dado que el peso medio de fruto fue similar para todos los tratamientos, la diferencia del rendimiento entre a favor del sistema de raíz flotante se debió a que en el primero hubo más frutos por unidad de superficie, lo que podría explicarse por un ambiente más estable en la rizósfera. En cambio, en los sistemas de cama hubo fluctuaciones mayores de la temperatura, CE y contenido de humedad y nutrientes en la zona de la raíz, sobre todo en los periodos entre riegos sucesivos, debido a la superficie del sustrato expuesta a la evapotranspiración y que pudo provocar estrés en las plantas (Dasgan y Ekici, 2005; Liang *et al.*, 2006). Considerando que el ciclo de cultivo del trasplante al final de la cosecha se completó en 114 d, se ve posible lograr tres ciclos de cultivo al año, lo que representa un rendimiento potencial anual cercano a las 500 t ha⁻¹ año⁻¹, equiparable a la de productores holandeses en invernaderos de alta tecnología (Resh, 2001), pero con costos de producción mucho más bajos.

Tabla 1. Rendimiento y sus componentes en el cultivo de jitomate manejado en alta densidad y despuntado a tres racimos por planta.

| Tratamiento | Rendimiento (kg m ⁻²) | Frutos m ⁻² | Peso medio de fruto (g) |
|-------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Raíz flotante | 16.7 a | 142 a | 118 a |
| Bolsa con recirculación | 15.3 ab | 140 ab | 109 a |
| Bolsa sin recirculación | 14.4 bc | 127 ab | 113 a |
| Cama con recirculación | 13.9 bc | 122 b | 113 a |
| Cama sin recirculación | 13.0 c | 116 b | 112 a |
| DMS | 2.1 | 15.8 | 11.1 |

DMS = diferencia mínima significativa. Medias con la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa (Tukey, 0.05).

Para el caso del pepino el comportamiento fue similar. El rendimiento por unidad de superficie fue estadísticamente mayor en los tratamientos de Raíz flotante y de camas con y sin recirculación, respecto a los sistemas de cultivo en bolsa, tanto abiertos como cerrados (Tabla 2). Las diferencias en rendimiento se atribuyen al número de frutos cosechados por unidad de superficie, ya que el peso medio de frutos fue similar en todos los tratamientos, lo cual coincide con Ortiz *et al.* (2009), quienes señalaron que en pepino sometido a despuntes tempranos y a alta densidad de población en un ambiente poco restrictivo, el número de frutos por planta es el principal factor que determina el rendimiento. Cabe destacar que el ciclo de cultivo del pepino de trasplante a fin de cosecha, por el despunte a 1 m de altura, fue de tan sólo dos meses (contra alrededor de 6 meses en los sistemas convencionales), tiempo insuficiente para que se desajustara de manera importante la solución nutritiva, tanto en su CE como en la proporción relativa de nutrientes. Además potencialmente podrían obtenerse hasta seis ciclos en un año con una alta productividad en ese tiempo.



Tabla 2. Rendimiento y sus componentes en el cultivo de pepino manejado en alta densidad y despuntado a 1 m de altura.

| Tratamiento | Rendimiento (kg m ⁻²) | Frutos m ⁻² | Peso medio de fruto (g) |
|-------------------------|-----------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Raíz flotante | 11.7 a | 44 a | 270 a |
| Bolsa con recirculación | 9.3 ab | 33 b | 268 a |
| Bolsa sin recirculación | 9.2 bc | 35 ab | 273 a |
| Cama con recirculación | 11.6 bc | 43 ab | 275 a |
| Cama sin recirculación | 10.3 c | 38 ab | 274 a |
| DMS | 1.8 | 10.2 | 33.9 |

DMS = diferencia mínima significativa. Medias con la misma letra en una columna no presentan diferencia significativa (Tukey, 0.05).

En lechuga sobresalió el sistema de raíz flotante donde un peso comercial mayor de 200 g por pieza se alcanzó en sólo 24 días, una semana antes que en las camas con tezontle con y sin recirculación de la solución nutritiva. Esto se atribuye a que en el sistema de raíz flotante las plantas no sufrieron ningún estrés después del trasplante dando por resultado un crecimiento sin interrupciones, cosa que no ocurrió cuando se trasplantó a sustrato.

Con respecto al ahorro y eficiencia en el uso del agua y fertilizantes se obtuvieron los siguientes resultados:

Jitomate:

El uso de nutrientes en cama sin recirculación de los drenajes respecto a la cama con recirculación se redujo 46, 30, 27 y 38 % para N, P, K y Ca, respectivamente, mientras que en bolsa fue 52, 40, 48 y 52 % menor en sistema con recirculación. Aunque el sistema de raíz flotante condujo al mayor rendimiento por unidad de superficie, fue estadísticamente similar al de la bolsa con recirculación, pero más difícil de manejar que los otros sistemas, además de que no se ahorró la cantidad esperada de fertilizantes, porque al final del ciclo la solución nutritiva remanente estaba desequilibrada y con una CE elevada (4.3 dS m⁻¹). Esto limitó su uso para el inicio de otro ciclo de cultivo, aunque podría usarse diluida en un cultivo adyacente a cielo abierto para evitar su desperdicio. A pesar de ello, los ahorros fueron de 20.4, 48.1, 25.0 y 31.7 % para N, P, K y Ca respecto al sistema de cama sin recirculación.

Los sistemas con recirculación cerrados en sustrato con respecto a sus testigos abiertos, presentaron ahorros de agua de 32.6 % en cama y 35.8 % en bolsa. En raíz flotante se aprovechó el 78 % del agua utilizada quedando 22 % en la tina al final del ciclo. La solución desechada en los sistemas cerrados con sustrato fue mínima, pues sólo se desperdició la del drenaje de los últimos días que ya no se recirculó. Como consecuencia de la reutilización de la solución nutritiva, los sistemas cerrados fueron muy eficientes en el uso de agua, con 27.1, 27.6 y 30.4 g de fruto fresco producidos por litro de agua usada en cama con recirculación, raíz flotante y bolsa con recirculación, contra sólo 17.1 y 18.5 g por litro de agua en los sistemas sin recirculación, lo cual coincide con lo reportado por Parra *et al.*, (2009).



Pepino:

En los tratamientos de bolsas con recirculación el ahorro fue de 23 % con respecto a los de bolsas sin recirculación, mientras que para cama con recirculación el ahorro fue de 20 % con respecto a la cama sin recirculación. Con recirculación también hubo un ahorro superior a 30 % en nutrimentos (N, P y K), comparado con los sistemas sin recirculación. Los sistemas cerrados fueron más eficientes en el uso de agua, con valores de 29.9, 25.5 y 24.4 g de fruto fresco producido por cada litro de agua usada en cama cerrada, raíz flotante y bolsa cerrada, respectivamente, contra 21.1 y 19.1 g de fruto por litro de agua en los tratamientos de cama y bolsa sin recirculación, respectivamente.

Lechuga:

El uso de nutrientes en cama sin recirculación de los drenajes respecto a la cama con recirculación se redujo 30, 2.4, 13 y 32 % para N, P, K y Ca, respectivamente, mientras que en raíz flotante fue 90, 50, 60 y 87 % menor. El menor ahorro en el sistema de camas con recirculación respecto al de raíz flotante se puede explicar en función de precipitaciones de sales fertilizantes en el sustrato debido a una alta tasa de transpiración por la alta rugosidad del tezontle que expone mucha superficie al aire (Sánchez y Escalante, 1988).

Para el caso de las camas sin recirculación, por cada pieza de lechuga producida se gastaron 2.8 litros de agua en tanto en camas sin recirculación el gasto fue de 2.3 litros por pieza y en el sistema de raíz flotante sólo 2 litros por pieza. Esto representa eficiencias de 12.6, 10.8 y 9 litros de agua consumida por kg de lechuga producida, respectivamente.

Conclusiones

Con un manejo del cultivo de jitomate basado en ciclos cortos, es posible recircular la solución nutritiva sin afectar el rendimiento y con un ahorro mayor a 30 % de agua y a 40 % de nutrimentos comparado con los sistemas sin recirculación. El sistema de bolsa con recirculación fue más fácil de manejar respecto al de hidroponía profunda, por lo que de disponer de un sustrato localmente, sería preferible para su uso por el productor.

En pepino sobresalió el sistema de raíz flotante por haber presentado mayor rendimiento por unidad de superficie en comparación con los sistemas de cultivo en bolsa. Lo anterior significa que con un manejo del cultivo de pepino en ciclo corto (dos meses) mediante despunte temprano y plantado en altas densidades de población, es posible usar sistemas con recirculación de la solución nutritiva sin menoscabo del rendimiento, con respecto a sistemas sin recirculación, con ahorros superiores a 20 % de agua y superior a 30 % en nutrimentos (N, P y K).



Con el sistema de raíz flotante se obtuvo mayor crecimiento y precocidad de lechuga así como un uso mucho más eficiente del agua y los nutrimentos respecto a los sistemas de camas de cultivo con sustrato.

Referencias bibliográficas

- Adams, P. 2004. Aspectos de la nutrición mineral en cultivos sin suelo en relación al suelo. *In*: Urrestarazu, G. M. (ed). Tratado de Cultivo sin Suelo. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España. pp: 81-111.
- Alarcón V. A. 2006. Proyectos en cultivo sin suelo ¿Cómo empezar? *In*: Cultivos sin Suelo. V. A. Alarcón (ed.). Compendios de Horticultura 17. Ediciones de Horticultura, S. L. Reus. España. pp:11-21.
- Cánovas M. F.; C. J. Magán. 2003. Cultivos sin suelo. En: Técnicas de Producción en Cultivos Protegidos. F. F. Camacho (ed). Instituto Cajamar. Madrid, España. pp: 409-453.
- Chapman, H. D.; P. E. Pratt. 1973. Métodos de Análisis para Suelos, Plantas y Agua. Trillas. México, D. F. 195 p.
- Dasgan, H. Y.; B. Ekici. 2005. Comparison of open and recycling systems for ion accumulation of substrate, nutrient uptake and water and water use of tomato plants. *Acta Hort.* 697: 399-408.
- Giuffrida F.; C. Leonardi. 2009. Nutrient solution concentrations in soilless closed system. *Acta Horticulturae* 807:463-468.
- Huang, W. Y. 2009. Factors Contributing to the Recent Increase in U.S. Fertilizer Prices, 2002-08. Agricultural Resources Situation and Outlook Number AR-33. U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service, Washington, DC. 21 p.
- Jones, J. B. 2005. The plant root: its roles and functions. *In*: Jones, J. B. (ed). *Hydroponics: A Practical Guide for the Soilless Grower*. CRS PRESS. USA. pp: 19-28.
- Liang, W.; Y. Jiang.; Y. Zhang. 2006. Accumulation of soil soluble salt in vegetable greenhouses under heavy application of fertilizers. *Agric. J.* 1: 123-127.
- Massa, D.; L. Incrocci.; R. Maggini.; G. Carmassi.; C. A. Campiotti.; C. A. Pardossi. 2010. Strategies to decrease water drainage and nitrate emission from soilless culture of greenhouse tomato. *Agricultural Water Management* 97: 971-980.



- Moreno, P. E.; F. Sánchez Del C.; J. Gutiérrez T.; L. González M.; J. Pineda P. 2015. Producción de lechuga en invernadero con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 21(1):43-55.
- Nakano, Y.; H. Sasaki.; A. Nakano.; K. Suzuki.; M. Takaichi. 2010. Growth and yield of tomato plants as influenced by nutrient application rates with quantitative control in closed rockwool cultivation. *J. Japan. Soc. Hort. Sci.* 79: 47-55.
- Ortiz C. J.; F. Sánchez, Del C.; C. Mendoza, C.; G. Torres, A. 2009. Características deseables de plantas de pepino crecidas en invernadero e hidroponía en altas densidades de población. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32:289-294.
- Pardossi, A.; L. Incrocci.; D. Massa.; G. Carmassi.; R. Maggini. 2009. The influence of fertigation strategies on water and nutrient efficiency of tomato grown in closed soilless culture with saline water. *Acta Hort.* 807: 445-450.
- Parra, M.; V. Raya, M.; C. Cid.; J. Haroun. 2009. Alternative to tomato soilless culture in open system in the Canary Islands: preliminary results. *Acta Hort.* 807: 509-514.
- Ponce, C. P. 2013. Panorama de la Agricultura Protegida en México. <http://www.hortalizas.com/articulo/35512/panorama-de-la-agricultura-protegida-en-mexico> (Julio 2013).
- Raviv, M.; H. Lieth. 2008. Significance of soilless culture in agriculture. In: *Soilless Culture Theory and Practice*. M. Raviv and H. Lieth (eds.). Ed. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. pp:1-11.
- Resh, H. M. 2001. *Cultivos Hidropónicos*. Mundi-Prensa. Madrid, España. 558 p.
- Sánchez, Del C. F.; R. E. Escalante. 1988. *Hidroponía. Estudio de un Sistema de Producción*. Ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 194 p.
- Sánchez, Del C. F.; E. Moreno, P. 2017. *Diseño Agronómico y Manejo de Invernaderos*. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México. 405 p.
- Sánchez, Del C. F.; E. Moreno, P.; L. Cruz, A. 2009. Producción de jitomate hidropónico bajo invernadero en un sistema de dosel en forma de escalera. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 15(1): 67-73.
- Sánchez, Del C. F.; E. Moreno, P.; E. Contreras, M.; V. González, E. 2006. Reducción del ciclo de crecimiento en pepino europeo mediante trasplante tardío. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29:87-90.



- Sánchez, Del C. F.; E. Moreno P.; J. Pineda P.; J. Osuna, M.; J. E. Rodríguez, P.; T. Osuna, E. 2014a. Producción hidropónica de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Agrociencia* 48(2):185-197.
- Sánchez, Del C. F.; L. González, M.; E. Moreno P.; J. Pineda P.; C. E. Reyes G. 2014b. Dinámica nutrimental y rendimiento de pepino cultivado en hidroponía con y sin recirculación de la solución nutritiva. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37(3):261-269.
- Savvas, D.; N. Sigrimis.; E. Chatzieustratiou.; C. Paschalidis. 2009. Impact of a progressive Na and Cl accumulation in the root zone on pepper grown in a closed-cycle hydroponic system. *Acta Hort.* 807: 451-456.
- Sonneveled, C.; W. Voogt. 2009. Substrates: Chemical characteristics and preparation. *In: Sonneveled, C., and W. Voogt (eds). Plant Nutrition of Greenhouse Crops.* Springer. pp: 227-252.
- Takahashi, K. 1984. Injury by continuous cropping in vegetables: various problems in the cultivation using grafted plants. *Yasaishikenjo Kenkyu Shiryo* 18: 87-89.
- Terabayashi S.; I. Muramatsu.; S. Tokutani.; M. Ando.; E. Kitagawa.; T. Shigemori.; S. Date.; Y. Fujime. 2004. Relationship between the weekly nutrient uptake rate during fruiting stages and fruit weight of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown hydroponically. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 73:324-329.
- Tüzel I. H.; U. Tunali.; Y. Tüzel.; G. B. Öztekin. 2009. Effects of salinity on tomato in a closed system. *Acta Horticulturae* 807:457- 462.
- Urrestarazu, G. M. 2000. Bases y sistemas de los cultivos sin suelo. *In: Urrestarazu, G. M. (ed). Manual de Cultivos sin Suelo* 5. Mundi-Prensa. España. pp: 51-94.
- Van-Os E. A. 2009. Comparison of some chemical and non-chemical treatments to disinfect a recirculating nutrient solution. *Acta Horticulturae* 843:229-234.