

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA Y VOLUMEN DE SUSTRATO SOBRE PARÁMETROS DE RIEGO Y RENDIMIENTO DE CHILE DULCE ‘DULCITICO’, EN HIDROPONÍA BAJO INVERNADERO

Freddy Soto-Bravo^{1/}, Elvis Ariel Araya-Cubero², Carlos Echandi-Gurdian³*

Palabras clave: Manejo del riego; humedad del sustrato; densidad de siembra; volumen de sustrato.

Keywords: Irrigation management; substrate water content; planting density; substrate volume.

Recibido: 05/11/18

Aceptado: 22/02/19


RESUMEN


La investigación se realizó de abril a setiembre de 2016, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica, Alajuela, Costa Rica, con el híbrido costarricense de chile dulce ‘Dulcítico’, en sistema hidropónico bajo invernadero. Se evaluó el efecto de 2 densidades de siembra (1,4 y 2,4 plantas.m⁻²) y 3 volúmenes de sustrato (7, 14 y 21 L.planta⁻¹) sobre el rendimiento, contenido de agua total disponible (ATD) en el sustrato, drenaje, evapotranspiración del cultivo (ET_c) y eficiencia de uso de agua (EUA). Se utilizó un diseño de 3 bloques completos al azar con arreglo bifactorial de tratamientos 2 x 3. La ET_c se obtuvo mediante balance de agua en el sustrato y la EUA como el cociente entre rendimiento y la ET_c. Para todas las variables de respuesta, no se observaron diferencias entre ambas densidades de siembra, conforme se incrementó el volumen de sustrato desde 7 hasta 21 L (p<0,05). Ambos factores afectaron (p<0,05) de forma independiente a todas las variables; excepto el ATD y el


ABSTRACT

Effect of plant density and substrate volume on irrigation parameters and yield of sweet pepper ‘Dulcítico’ in hydropony under greenhouse. The research was conducted from April to September 2016, at the Fabio Baudrit Moreno Agricultural Experimental Station of the University of Costa Rica, Alajuela, Costa Rica, with the Costa Rican hybrid of sweet pepper ‘Dulcítico’, in hydroponic system under greenhouse. The effect of 2 planting densities (1.4 and 2.4 plants.m⁻²) and 3 volumes of substrate (7, 14 and 21 L.plant⁻¹) on the yield, total available water content (ATD) in the substrate, drainage, crop evapotranspiration (ET_c) and water use efficiency (EUA) were evaluated. A design of 3 complete blocks at random with a factorial arrangement of 2 x 3 treatments was used. The ET_c was obtained by water balance in the substrate and the EUA as a result of the ratio between yield and ET_c. For all the response variables, no different trends were observed between the two planting densities, as the substrate volume

* Autor para correspondencia. Correo electrónico: freddy.sotobravo@ucr.ac.cr

1 Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Costa Rica.
 0000-0003-1959-9597.

2 Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Costa Rica.
 0000-0002-7936-2666.

3 Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Costa Rica.
 0000-0001-6653-7474.

rendimiento, que únicamente fueron afectados ($p < 0,05$) por el volumen de sustrato y la densidad de plantas, respectivamente. En todos los casos, el efecto de mayor magnitud fue debido al factor densidad. El volumen de sustrato no afectó el rendimiento, sin embargo, contribuyó a mejorar la EUA al reducir los volúmenes de riego, de ET_c y de drenaje. A mayor densidad de siembra incrementó el rendimiento ($kg \cdot m^{-2}$), pero redujo la EUA, debido a un mayor consumo de agua (ET_c), y mayores volúmenes de riego, de ATD y de drenaje. La mayor EUA se obtuvo a 1,4 plantas. m^{-2} y 7 L de sustrato.planta $^{-1}$, por una reducción de 13% en la ET_c respecto al cultivo con 21 L de sustrato.planta $^{-1}$ y 2,4 plantas. m^{-2} .

was increased from 7 to 21 L ($p < 0.05$). Both factors affected ($p < 0.05$) independently all the variables; except the ATD and yield, which were only affected ($p < 0.05$) by the volume of substrate and plant density, respectively. In all cases, the effect of greater magnitude was due to the density factor. The volume of substrate did not affect the yield, however, it contributed to improve the EUA by reducing the volumes of irrigation, ET_c and drainage. Higher planting density increased yield ($kg \cdot m^{-2}$), but reduced the EUA due to higher water consumption (ET_c) and higher volumes of irrigation, ATD and drainage. The highest EUA was obtained at 1.4 plants. m^{-2} and 7 L of substrate.plant $^{-1}$, due to a reduction of 13% in the ET_c with respect to the crop with 21 L of substrate.plant $^{-1}$ and 2.4 plants. m^{-2} .

INTRODUCCIÓN

En Costa Rica para el 2014, se cultivaron aproximadamente 1085,5 ha de chile dulce (INEC 2015) de las cuales, según Rojas y Paniagua (2015), 158 ha fueron bajo invernadero. En este cultivo existe una fuerte dependencia de semilla importada con un alto costo. La Universidad de Costa Rica desarrolló el primer híbrido nacional de chile dulce “Dulcítico” adaptado a las condiciones agroecológicas del país. Sin embargo, es necesario desarrollar tecnología adaptada para alcanzar su máximo potencial productivo.

A nivel global, los recursos hídricos son limitantes, ya que representan tan solo el 1,5% de los recursos de agua total del planeta, del cual el sector agropecuario es el principal consumidor de agua (69%). El crecimiento demográfico mundial, proyectado a 9000 millones de habitantes en el 2050 (Tilman *et al.* 2002), supone un incremento sustancial en la demanda de alimentos y asimismo de agua. Se estima que para el 2050

dicho requerimiento se incrementará en un 66% para alimentos vegetales y un 76% para alimentos pecuarios (WWAP 2016). La escasez de agua dulce para riego podría duplicar los efectos perjudiciales del cambio climático en la agricultura, debido a la reducción de los rendimientos en los principales cultivos como maíz, soja, trigo y arroz (Elliott *et al.* 2014).

La evolución de agricultura de aproximación a agricultura de precisión, está contribuyendo al uso racional de los recursos de producción. Aunque existe la tecnología, esta puede ser mejor aprovechada para realizar el uso eficiente de agua de riego. En ese sentido, la hidroponía contribuye con la eficiencia de uso de agua, de los fertilizantes y del espacio, reduce enfermedades de suelo y aumenta la calidad y los rendimientos (Jara 2016). La producción de cultivos, sin suelo en invernadero, reduce los efectos de climas extremos, permite producir hortalizas durante todo el año e incrementa la calidad y el rendimiento. Además, reduce la incidencia de plagas

y enfermedades, lo cual disminuye el uso de pesticidas, lo que genera productos más sanos para la persona consumidora y menor contaminación ambiental (Rojas y Paniagua 2015).

Las densidades de siembra a campo abierto y en invernadero, utilizadas en Costa Rica para chile dulce son variables y fluctúan entre 1,4 hasta 6,0 plantas m^{-2} . Silva *et al.* (2010) evaluaron 4 densidades de siembra en chile dulce 2, 2,5, 3,3 y 5 plantas. m^{-2} y determinaron que el efecto de la densidad de plantación, sobre el crecimiento y producción del cultivo, está determinado únicamente por la distancia entre plantas sin efecto de la distancia entre hileras.

Existe amplia investigación sobre el efecto de déficit de riego en chile dulce (Koksal *et al.* 2017, Hakkı and Yıldırım 2015, Guang-Cheng *et al.* 2010, Kirda *et al.* 2007) y el uso de injertos (López-Marín *et al.* 2017), sobre la EUA. Sin embargo, existe un vacío de información acerca de otros factores de manejo como la densidad de siembra y el volumen de sustrato sobre la EUA en cultivos en invernadero como el híbrido nacional ‘Dulcítico’, el cual se produce bajo condiciones tropicales.

La correcta estimación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) permite mejorar la EUA y aumentar la calidad y el rendimiento (Pérez y Castellvi 2002). Aplicaciones excesivas de agua, debido a la falta de datos locales de ET_c , disminuyen la EUA. Actualmente, en Costa Rica no hay estudios acerca de la ET_c , porcentajes de drenaje y EUA en cultivos en invernadero. En España, estudios realizados por Fernández *et al.* (2005) en chile dulce bajo invernadero, reportaron valores de ET_c total de 137-362 $L.m^{-2}$, mientras que Karam *et al.* (2009) en chile Bell pepper determinaron rangos de ET_c entre 275 - 478 $L.m^{-2}$. No obstante, la utilización de estos datos para efectos de manejo puede ser contraproducente, ya que la ET_c varía con el genotipo, el clima y el

manejo agronómico del cultivo. Únicamente se encontró un estudio local por Soto (2018), que reportó que el umbral de humedad en el cultivo de chile dulce en fibra de coco bajo invernadero, antes de afectar fisiológicamente la planta, fue aproximadamente 38% de humedad a una succión 5 kPa.

El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la densidad de siembra y el volumen de sustrato sobre el rendimiento, la evapotranspiración del cultivo (ET_c), el drenaje, el agua total disponible (ATD) en el sustrato y la eficiencia física de uso de agua (EUA) en el híbrido F_1 costarricense “Dulcítico” de chile dulce hidropónico bajo invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental. El estudio se realizó del 22 de abril al 28 de agosto del 2016, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, ubicada en San José de Alajuela, Costa Rica ($10^{\circ} 00' 24' N$ y $84^{\circ} 15' 57' W$), a una altitud de 840 msnm, con valores promedios de precipitación anual, temperatura y humedad relativa de 1940 mm, $22^{\circ}C$ y 78%, respectivamente.

Se utilizó un invernadero multitúnel de hierro galvanizado con cubierta de polietileno (200 μm) y malla anti-insectos (43 mesh) en las paredes, formado por 4 módulos de 9,75 m de ancho y 50 m de largo (1440 m^2), alturas de 6 m al centro del túnel y 4 m a la canoa. El sistema de ventilación fue pasivo, combinado con el funcionamiento automatizado de ventanas cenitales según la velocidad de viento y lluvia.

Durante el experimento, se monitoreó la radiación solar global, la temperatura y la humedad del aire en el interior del invernadero, que fueron almacenados en un registro de datos (Figura 1).

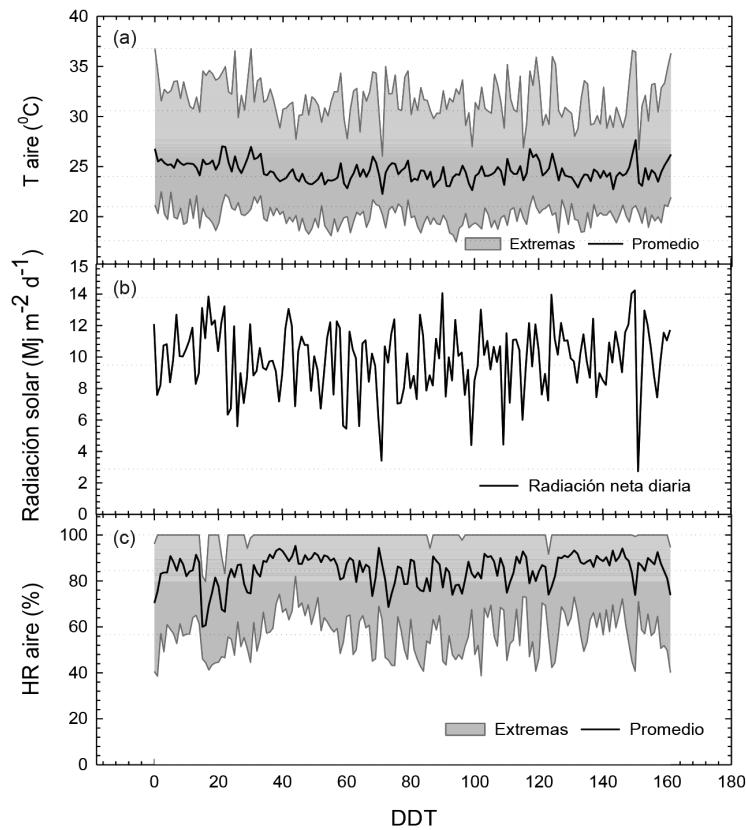


Figura 1 Condiciones de invernadero durante el ciclo de cultivo de chile dulce “Dulcítico”, Alajuela, Costa Rica.
 (a) Valores máximo promedio y mínimo de temperatura.
 (b) Humedad relativa.
 (c) Aire e integral de radiación solar global.

Se utilizó el híbrido F_1 “Dulcítico”, desarrollado en Costa Rica, que se caracteriza por iniciar la cosecha entre 90 y 110 días después del trasplante, de crecimiento indeterminado, fruto de forma cónica, color verde-rojo, altos grados brix y rendimiento de hasta $9,55 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ (Echandi 2012). Para el trasplante se utilizaron plántulas de 37 días de edad con 6 hojas verdaderas, obtenidas en bandejas plásticas de 98 celdas con turba (peat moss) como medio de cultivo.

El sustrato utilizado en el experimento fue fibra de coco de textura media en bloques

comprimidos de $100 \times 15 \times 3 \text{ cm}$, que fueron hidratados, descomprimidos y determinadas sus características físicas (Tabla 1). La porosidad total ($\%P_t$) se obtuvo a partir de la densidad aparente (d_{ap}) y la densidad real (d_r), mediante la ecuación $P_t = (1 - d_{ap} / d_r) \cdot 100$. La d_{ap} (g cm^{-3}) se determinó a partir del cociente entre el peso seco a 105°C y el volumen de sustrato, mientras que la d_r (g cm^{-3}) se determinó por el método del picnómetro. El contenido de partículas sólidas ($\%$) se obtuvo como la diferencia entre $100 - P_t$.

Tabla 1. Características físicas de la fibra de coco utilizada como sustrato para el cultivo de chile dulce hidropónico bajo invernadero.

Características físicas	Fibra de coco	% óptimo
Partículas < 1 mm = índice de grosor (%)	83,0	--
Partículas entre 1 y 4 mm (%)	58,00	--
Partículas > 4 mm (%)	25,00	--
Densidad aparente (gr.cm ⁻³)	0,075	--
Densidad real (gr.cm ⁻³)	0,650	--
Porosidad total (%)	88,5	> 85%
Partículas sólidas (%)	11,5	< 15%

Los componentes de agua y aire en la fibra de coco se determinaron según la norma europea UNE-EN-13041 (2007). Para ello, se determinó el porcentaje de humedad volumétrica (θ) en muestras sometidas a potenciales mátricos (ψ_m) de 1, 2,5, 5,0, 7,5 y 10 kPa, utilizando un equipo de caja de arena. Para cada ψ_m se utilizaron 3 repeticiones y se asumió que la θ a 1 kPa y a 10 kPa correspondieron a la capacidad de contenedor (θ_{CC}) y al punto de marchitez permanente (θ_{PMP}), respectivamente. La capacidad de aireación (%) del sustrato en cada ψ_m se obtuvo

como la diferencia entre la P_t y el porcentaje de θ respectivo. El porcentaje de agua total disponible (%ATD) en el sustrato ($\theta_{CC} - \theta_{PMP}$) incluyó los porcentajes de agua fácilmente disponible (%AFD) y agua de reserva (%AR). El %AFD se obtuvo a partir de la diferencia entre θ_{CC} y la humedad a 5 kPa (θ_{5kPa}), mientras que el %AR correspondió a la diferencia entre θ_{5kPa} y θ_{PMP} . La fibra de coco utilizada presentó una θ_{CC} de 57,4% (1kPa) y una θ_{PMP} de 30,86% (10 kPa), para un 26,54% de ATD. El AFD fue de 22,23%, almacenada entre θ_{CC} y θ_{5kPa} (Figura 2).

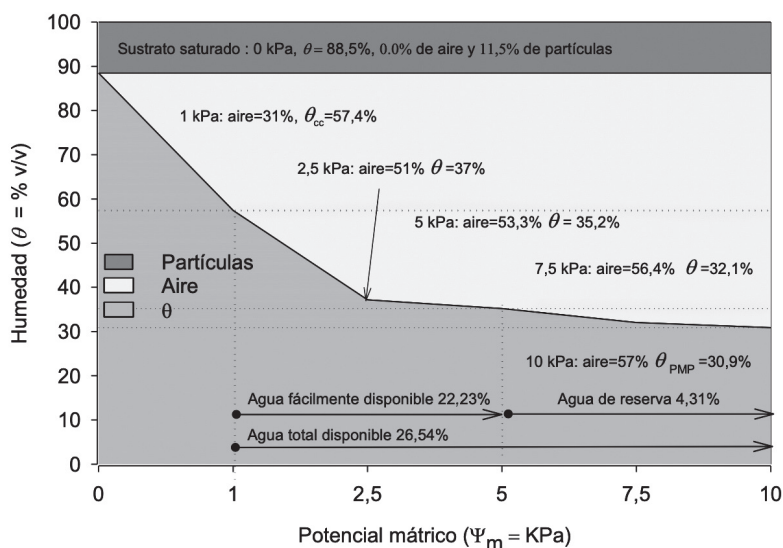


Figura 2 Curva característica de liberación de aire y desorción de agua, agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en la fibra de coco, respectivamente.

Tratamientos. Se evaluaron 6 tratamientos que combinaban 2 densidades de siembra (D) y 3 volúmenes de sustrato por planta (V). Las densidades usadas fueron 1,4

plantas.m⁻² (0,45 m x 1,55 m) y 2,4 plantas.m⁻² (0,27 m x 1,55 cm); mientras que los volúmenes de sustrato fueron 7 L, 14 L y 21 L.planta⁻¹ (Tabla 2).

Tabla 2. Descripción de tratamientos utilizados según densidad de siembra y volumen de sustrato.

Código	Densidad de plantas		Volumen de sustrato por (L)	Distancia (m)	
	Ha	m ²		Hileras	Plantas
D _{1,4} V ₇		1,4	7	1,55	0,45
D _{1,4} V ₁₄	14000	1,4	14	1,55	0,45
D _{1,4} V ₂₁		1,4	21	1,55	0,45
D _{2,4} V ₇		2,4	7	1,55	0,27
D _{2,4} V ₁₄	24000	2,4	14	1,55	0,27
D _{2,4} V ₂₁		2,4	21	1,55	0,27

La fibra de coco hidratada y descomprimida se colocó en bolsas plásticas de color blanco de 8 milésimas de espesor. De acuerdo con el volumen de sustrato por tratamiento, el ancho y el alto de la bolsa llena de sustrato mantuvo una relación constante de 1:1, con 20 cm x 20 cm para 7 L, 25 cm x 25 cm para 14 L y 28 cm x 28 cm para 21 L. Las bolsas con el sustrato se distribuyeron en el área experimental según tratamiento, y seguidamente, se trasplantó una plántula de chile dulce en cada bolsa.

Manejo del experimento. El sistema de riego consistió de un reservorio de agua de 10000 litros, una bomba eléctrica (1 HP), tubería principal de polietileno (25 mm), tubería de polietileno (19 mm) para cada hilera de cultivo con un gotero (3 L.h⁻¹) antidrenante y autocompensado para cada planta/bolsa. Cada gotero constaba de un difusor de 4 salidas con microtubos (5,5 mm) de 60 cm de largo con una estaca de anclaje al final, colocadas alrededor de la base de cada

planta. Para reducir la superficie expuesta a la evaporación de agua, el sustrato se cubrió con el sobrante de plástico de la misma bolsa, dejando un pequeño espacio (3 cm) alrededor del tallo en la base de la planta. La presión del sistema (103,4 kPa) y el control del caudal fueron regulados, a través de un tubo con llave de paso, que retornaba parte del agua impulsada por la bomba al tanque de almacenamiento.

La nutrición mineral se inició un día después del trasplante, con una solución nutritiva según etapa del cultivo (Tabla 3). El pH de la solución nutritiva fue ajustado a 5,7 con ácido nítrico (56% v/v, 167 g.L⁻¹) según la concentración de bicarbonatos (77 mg.L⁻¹) en el agua de riego. Las concentraciones de nutrientes en el agua de riego fueron consideradas en los aportes a la solución nutritiva. Dichas concentraciones fueron 6,2 de N-NO₃⁻, 0,3 de P, 3,7 de K, 12,6 de Ca, 6,2 de Mg y 1,6 mg.L⁻¹ de S, con un pH de 7,5 y una conductividad eléctrica (CE) de 0,2 mS.cm⁻¹.

Tabla 3. Concentración de nutrientes en solución nutritiva según etapa fenológica del cultivo de chile dulce bajo invernadero.

Etapa fenológica	Duración (semana)	Concentración de nutrientes (mg.L ⁻¹)											
		N	P	K	Mg	Ca	S	Cl	Fe	Cu	Mn	Zn	B
Establecimiento	2	129	40	182	39	140	65	1,20	1,00	0,23	0,80	0,23	0,50
Desarrollo vegetativo y radicular	4	141	47	204	46	150	75	1,20	1,50	0,23	0,80	0,23	0,50
Crecimiento-inicio producción	4	152	46	260	51	172	104	1,20	1,60	0,23	0,80	0,23	0,51
Producción	15	159	50	287	51	181	113	1,20	2,00	0,23	1,00	0,23	0,50

En la preparación de la solución nutritiva, se utilizó fosfato monopotásico, nitrato de potasio, sulfato de potasio, sulfato de magnesio, nitrato de calcio, cloruro de calcio, ácido nítrico, elementos menores, ácido bórico, y quelatos de hierro y de manganeso (EDTA-Fe, EDTA-Mn). Para la protección del cultivo, previo al trasplante, se realizó una desinfección general del invernadero utilizando peróxido de hidrogeno (H_2O_2). El manejo de los problemas fitosanitarios se realizó básicamente de forma preventiva mediante aplicaciones semanales de productos biológicos. Todas las semanas se monitoreaba la incidencia de insectos y patógenos, y si el umbral de plaga lo justificaba se realizaban aplicaciones de productos químicos específicos.

El tutorado de las plantas se realizó con mecate de nylon y anillos plásticos que se colocaron en la primera y segunda bifurcación de la planta. Posteriormente, todas las ramas emergentes se sujetaron con cuerda de nylon a un alambre metálico colocado horizontalmente a 2,5 m en la parte superior del cultivo. Todos los brotes vegetativos ubicados por debajo de la primera bifurcación de la planta fueron eliminados, mientras que por encima de este se permitió el libre crecimiento de tallos, y solamente, se realizó una deshoja sanitaria a los 105 días después del trasplante.

Diseño experimental. Los 6 tratamientos fueron distribuidos en un diseño de 3 bloques completos al azar, con un arreglo bifactorial 2 x 3 que combinaba 2 densidades de siembra y 3 volúmenes de sustrato por planta, para un total de 18 unidades experimentales (UE). En los tratamientos de baja densidad, la UE estaba conformada por 3 hileras de 9 plantas, para un total de 27 plantas; mientras que en los tratamientos de alta densidad estaban compuestos por 3 hileras de 13 plantas, para un total de 39 plantas. La unidad de muestreo constó de 7 plantas ubicadas en el centro de la hilera central de cada UE, utilizando como borde las 2 hileras externas y las plantas ubicadas en los extremos de la hilera

central. Adicionalmente, se colocó una hilera extra contiguo a la pared externa del invernadero para mitigar el efecto de borde.

Variables de respuesta. Para cada tratamiento se determinó la evapotranspiración del cultivo (ET_c) semanalmente, utilizando el método de balance de agua en el sistema, a partir de los volúmenes ($L \cdot m^{-2}$) de riego (R) y drenaje (D), y de la diferencia entre el contenido de humedad volumétrica del sustrato ($\Delta\theta = \theta_i - \theta_f$) al inicio (θ_i) y al final (θ_f) de cada semana, según la ecuación $ET_c = R - D \pm \Delta\theta$.

El riego fue manejado independientemente para cada tratamiento con el objetivo de mantener el porcentaje de θ dentro del rango de AFD en el sustrato ($\theta_{CC} - \theta_{5kPa}$). El volumen de riego por planta/bolsa se estimó en función de i- un valor máximo de agotamiento preestablecido (20%) del agua total disponible (26,5%) en el sustrato (Figura 1), ii- del volumen de sustrato por planta/bolsa (Tabla 2) y iii- del porcentaje de drenaje preestablecido (15%). Este último se estableció al considerar que la CE del agua de riego ($0,2 \text{ mS cm}^{-1}$) utilizada permite usar hasta menos de 20% de drenaje.

Una vez determinado el volumen de agua a aplicar por planta en cada tratamiento, se calculó el tiempo de riego a partir del número de goteros por planta y del caudal promedio de los goteros. Este último fue obtenido mediante la determinación del coeficiente de uniformidad (>94%) del sistema de riego (Christiansen 1942). El riego se controló con 2 programadores de riego, que mediante válvulas solenoides regó de forma independiente a cada tratamiento. La frecuencia de riego fue ajustada diariamente en función del volumen de drenaje y la θ para cada tratamiento, los cuales fueron medidos diariamente a las 6 a.m. antes del primer riego.

El porcentaje de drenaje se estimó como el cociente entre el volumen de agua drenada y el volumen de agua aplicada. Para esto, se colocaron 4 plantas en sus respectivas bolsas de cultivo dentro de una bandeja de madera (1 m x 0,3 m

x 0,05 m) hermetizada con plástico negro (230 μm), con una leve pendiente (1%) hacia uno de los extremos, donde se colocó un recipiente para recolectar el agua drenada. Para favorecer el drenaje se realizaron 4 agujeros de 4 mm de diámetro en la base y alrededor de la bolsa de cultivo. La bandeja se cubrió con plástico plata/negro para evitar la evaporación del agua drenada.

El contenido de humedad volumétrica en el sustrato ($\theta = \%v/v$) se midió con un sensor tipo "TDR" (Time Domain Reflectometry) conectado a un registrador de datos. La medición se realizó en 3 puntos distintos a media altura en cada una de las 4 bolsas por bandeja de drenaje, utilizando el valor promedio de θ de las 12 mediciones por repetición. A partir de la diferencia entre θ medida con el TDR y la θ_{PMP} obtenida en laboratorio (Figura 1), se obtuvo el valor real del %ATD en el sustrato que, al multiplicarla por el volumen de sustrato, estimó el volumen (L) de ATD por planta/bolsa.

Eficiencia de uso del agua (EUA = $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$). La EUA se estimó para los rendimientos de fruto comercial (EUA_c) y total (EUA_t), como el cociente entre rendimiento (kg) y la ET_c (m^3). El rendimiento comercial se determinó en 7 plantas de cada unidad de muestreo y se clasificó según el peso y las características del fruto en primera (I), segunda (II) y tercera (III), de acuerdo con la normativa nacional descrita por Quesada (2015). Las categorías fueron: frutos I con peso mayor a 119 g sin deformaciones ni manchas, frutos II con peso entre 86-118 g con deformaciones y manchas leves, y frutos III con peso entre 51-85 g sin daños. Además, se cuantificó fruto de desecho, con peso menor a 51 g y con daños físicos y mecánicos causados por insectos, hongos, necrosis apical, deshidratación y quemadura por sol, entre otros. El rendimiento total se obtuvo como la suma del rendimiento comercial más el desecho.

Análisis estadístico. Los datos experimentales fueron sometidos a un análisis de normalidad y homocedasticidad. Cuando se

cumplieron dichos supuestos, los datos fueron sometidos a un análisis de varianza, para determinar si hubo efecto de la interacción o efectos independientes de ambos factores. Como no hubo efecto de la interacción ($p > 0,05$) para ninguna de las variables de respuesta, se analizaron los efectos principales del factor o de ambos factores, que fueron estadísticamente significativos ($p < 0,05$).

Para el análisis de la información se utilizó el siguiente modelo de análisis de varianza para bloques completos al azar según Di Rienzo *et al.* (2012):

$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \gamma_k + \epsilon_{ijk}$, con $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, n$; $k = 1, 2, \dots, n$ donde,

Y_{ijk} = variable de respuesta medida en la ijk -ésima unidad experimental.

μ = media general.

α_i = efecto del i -ésimo nivel del factor densidad de siembra.

β_j = efecto del j -ésimo nivel del factor volumen de sustrato.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción entre el i -ésimo nivel del factor densidad de siembra y el j -ésimo nivel del factor volumen de sustrato.

γ_k = efecto del k -ésimo bloque.

ϵ_{ijk} = error experimental asociado al ijk -ésimo valor medido en la ijk -ésima unidad experimental.

RESULTADOS

Para todas las variables de respuesta no se observaron tendencias diferentes entre ambas densidades de siembra conforme se incrementó el volumen de sustrato desde 7 hasta 21 L, lo cual implica ausencia de interacción entre actores ($p > 0,05$). Ambos factores afectaron ($p < 0,05$), de forma independiente, con efecto de mayor magnitud sobre el drenaje y la ET_c debido al factor densidad, y con magnitud similar sobre las EUA_c y EUA_t. El ATD y el rendimiento únicamente fueron afectados ($p < 0,05$), respectivamente, por el volumen de sustrato y la densidad de plantas (Tabla 4).

Tabla 4. Resumen de los efectos principales e interacción de los factores densidad de siembra y volumen de sustrato, conforme al análisis de varianza.

Efectos	Factor	Variable de respuesta									
		θ (%)	ATD (L.m ⁻²)	Drenaje (L.m ⁻²)	Drenaje (%)	ET_c 1/(L.pl ⁻¹)	ET_c (L.m ⁻²)	Producción (kg.m ⁻²)	Producción 1/ (kg.pl ⁻¹)	EUA _c (kg.m ⁻³)	EUA _t (kg.m ⁻³)
Principales	Densidad	**	*	**	**	**	*	*	*	*	*
	Volumen	*		*	*	*	*	*	*	*	*
Interacción	D x V										

*Representa efecto estadísticamente significativo ($p < 0,05$).

**Indica el factor que presentó el efecto ($p < 0,05$) de mayor magnitud.

1/Indica por planta.

En el presente estudio, debido a la ausencia de interacción, en adelante únicamente se hace referencia al efecto independiente de la densidad de siembra y el volumen de sustrato. Inicialmente, se presenta información del riego, de la humedad volumétrica en el sustrato y del drenaje, ya que son componentes esenciales del balance hídrico para determinar la ET_c . Otra razón de consignar el riego como parte de los resultados, se basó en fundamentar el control del manejo del riego que permitió mantener la uniformidad en el contenido de humedad en el sustrato, y así, analizar el efecto de los tratamientos de volumen de sustrato y de la densidad de plantas por sí mismos.

Riego. El volumen de riego aportado por unidad de superficie ($L.m^{-2}$) fue superior en los tratamientos de mayor densidad y con menor efecto, debido al volumen (Figura 3a, 3b). Las diferencias en los aportes de riego entre tratamientos (Figura 3a), debido a la densidad, empezaron a manifestarse a partir de la semana 5. El aporte inicial estuvo en valores cercanos a $0,5 L.m^{-2}$, incrementando progresivamente hasta alcanzar valores máximos de $7,4 L.m^{-2}$ en la semana 12 de cultivo (Figura 3a). En el riego acumulado (Figura 3b) no hubo tendencias diferentes entre ambas densidades de siembra conforme se incrementó el volumen de sustrato desde 7 hasta 21 L.

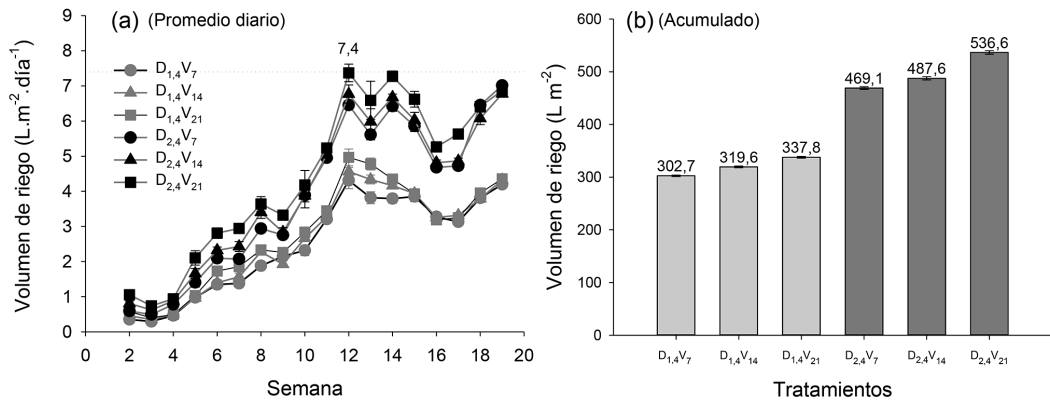


Figura 3 (a) Evolución semanal del aporte de riego promedio diario.
(b) Volúmenes de riego acumulado conforme al tratamiento.

El volumen de riego total incrementó desde $302 L.m^{-2}$ hasta $536 L.m^{-2}$ al pasar del tratamiento $D_{1,4}V_7$ a $D_{2,4}V_{21}$, respectivamente. El incremento promedio al aumentar la densidad de $1,4 plantas m^{-2}$ ($320 L.m^{-2}$) a $2,4 plantas m^{-2}$ ($536,6 L.m^{-2}$) fue de 56%; mientras que al pasar de 7 L de sustrato por planta ($385,9 L.m^{-2}$) a 21 L ($437,2 L.m^{-2}$) el incremento promedio fue solamente un 13%.

Humedad volumétrica (θ) en el sustrato. Durante el ciclo de cultivo, la θ en el

sustrato se mantuvo relativamente constante, sin mayores diferencias entre tratamientos (Figura 4a) y dentro del rango de AFD entre θ_{CC} (57,4%) y θ_{5kPa} (35,2%) (Figura 1). Consecuentemente, no hubo efecto de la interacción ($p>0,05$), ni efectos independientes de la densidad de siembra y el volumen de sustrato sobre el porcentaje de θ . Los promedios de θ en los diferentes tratamientos, entre 45% a 49%, oscilaron dentro del rango de AFD de la fibra de coco (Figura 4b).

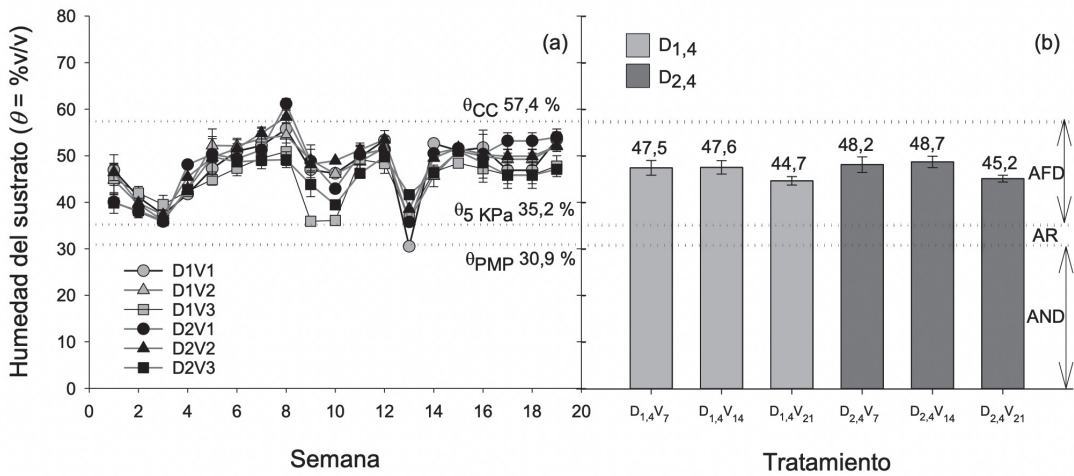


Figura 4 (a) Evolución semanal del contenido promedio de humedad volumétrica (%) en el sustrato. (b) Promedio global según tratamiento.

Agua total disponible (ATD) en el sustrato. El volumen de ATD por planta y por m² no fue afectado por la interacción entre ambos factores. A nivel de planta, el ATD únicamente fue afectada ($p < 0,05$) por el volumen de sustrato (Figura 5a). Independientemente de la densidad, el ATD fluctuó desde 1,2 L de ATD en los tratamientos con 7 L de sustrato hasta 3,0 L de ATD.planta⁻¹ al utilizar 21 L de sustrato.planta⁻¹, lo cual

representó un apreciable incremento de 149%. Sin embargo, al analizar el ATD por área (Figura 5b), a diferencia del ATD.planta⁻¹, se observó que dicha variable fue afectada significativamente por ambos factores ($p < 0,05$) con una magnitud similar. El aumento la densidad de 1,4 a 2,4 plantas.m⁻² representó un incremento de un 80%; mientras que al incrementar el volumen de sustrato de 7 L a 21 L, el ATD incrementó un 83%.

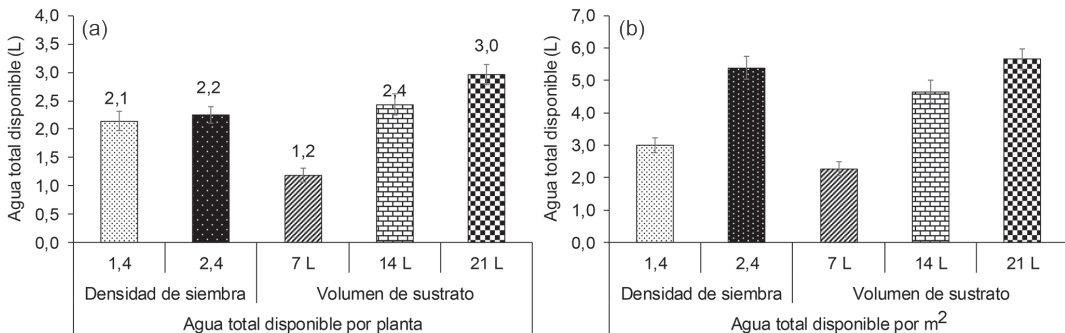


Figura 5 Agua total disponible por planta. (a) Conforme tratamiento combinado. (b) Conforme volumen de sustrato por planta.

Volumen y porcentaje de drenaje. La densidad de siembra y el volumen de sustrato afectaron ($p < 0,05$) de forma independiente, sin interacción, a ambas variables, con el mayor efecto debido al factor densidad. En el caso del

volumen de drenaje, este incrementó un 89% al pasar de una condición de baja a alta densidad; mientras que al cambiar el volumen de 7 L a 21 L de sustrato, planta⁻¹, el volumen de drenaje incrementó tan solo un 17% (Figura 6a).

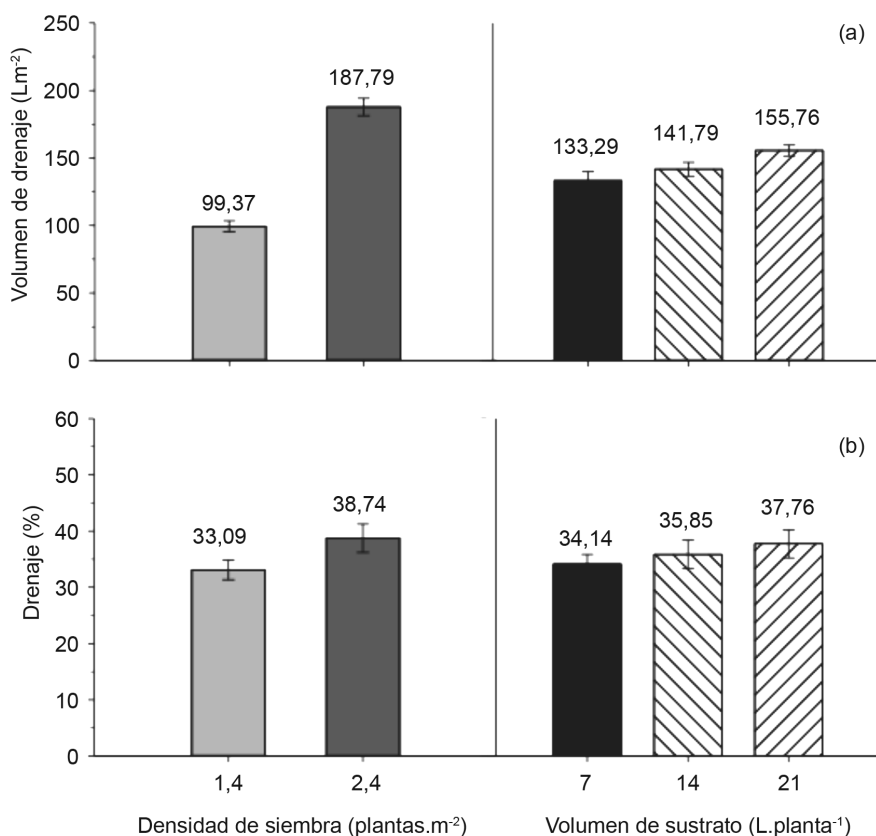


Figura 6 (a) Efectos principales de la densidad de siembra y volumen de sustrato sobre el volumen total drenado. (b) Porcentajes de drenaje.

El porcentaje de drenaje (Figura 6b) tuvo comportamiento similar al observado en el caso del volumen de drenaje (Figura 6a), ya que mostró una tendencia al incremento conforme aumentó la densidad de plantación y el volumen de sustrato. La densidad tuvo un efecto ligeramente superior al volumen de sustrato, ya que el porcentaje de drenaje incrementó un 17%, al

aumentar la densidad de 1,4 a 2,4 plantas.m⁻², y un 11% al incrementar el volumen de sustrato de 7 L a 21 L (Figura 6b).

Evapotranspiración del cultivo (ET_c).

La ET_c por m⁻² y por planta⁻¹ no mostraron tendencias diferentes entre ambas densidades de siembra conforme incrementó el volumen

de sustrato.planta⁻¹ ($p>0,05$). Sin embargo, dichas variables fueron afectadas por ambos factores ($p<0,05$), con mayor magnitud debido al factor densidad.

Los efectos principales de la densidad de siembra y el volumen de sustrato, por área y por planta, se presentan en la Figura 7. Al analizar

dichos efectos sobre la $ET_c.planta^{-1}$, indistintamente del volumen del contenedor, se redujo un 18% al aumentar la densidad de 1,4 plantas.m⁻² a 2,4 plantas.m⁻² (Figura 7a). Por otra parte, contrario al consumo por planta, la ET_c por área, aumentó un 41% al incrementar la densidad de siembra de 1,4 a 2,4 plantas.m⁻².

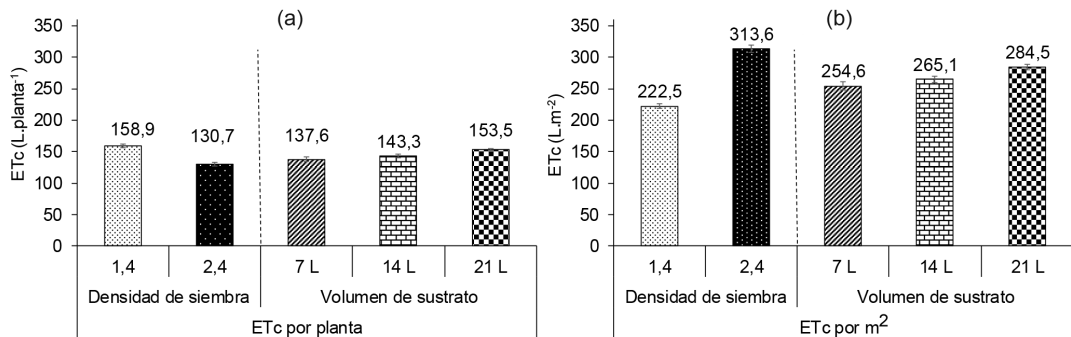


Figura 7 (a) Efectos principales de la densidad de siembra y el volumen de sustrato sobre la evapotranspiración total del cultivo (ET_c), por planta.
(b) Efectos por área.

Respecto a los efectos del volumen de sustrato, tanto la ET_c por planta como por área, incrementaron en magnitud similar, en un promedio de 12% conforme aumentó el volumen desde 7 L a 21 L de sustrato/planta (7b).

Considerando la importancia de la disponibilidad de datos de referencia acerca del consumo de agua (ET_c : L.m⁻²) para la producción, en la Figura 8 se presentan valores promedio diarios de ET_c por tratamiento combinado, donde se observa

una tendencia a incrementar la ET_c conforme aumentó la densidad de siembra y el volumen de sustrato. Durante el ciclo del cultivo, en todos los tratamientos la ET_c diaria (L.m⁻²) incrementó progresivamente desde la semana 1 (0,2 L.m⁻².día⁻¹) hasta alcanzar valores máximos en la semana 14, con 4,9 L.m⁻².día⁻¹ en los tratamientos de mayor densidad ($D_{2,4}V_{21}$) y de 3,0 L.m⁻².día⁻¹ en la menor densidad ($D_{1,4}V_7$), con una tendencia a disminuir en el resto del ciclo (Figura 8a).

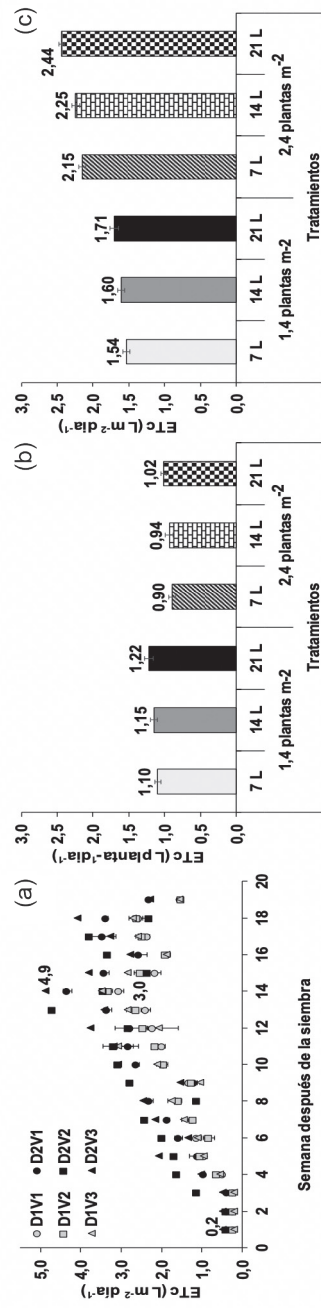


Figura 8 (a) Evolución de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) por tratamiento: promedio acumulado por semana.
 (b) Promedio general diario por planta.
 (c) Por área.

En relación con los promedios globales de todo el ciclo (Figura 8b, 8c), la $ET_c \cdot planta^{-1}$ disminuyó en los tratamientos de mayor densidad (Figura 8b). Consecuentemente, las ET_c máxima y mínima se obtuvieron, respectivamente, en los tratamientos con 1,4 plantas y 21 L de sustrato/planta ($1,22 \text{ L} \cdot planta^{-1} \cdot día^{-1} = D_{1,4} V_{21}$), y con 2,4 plantas. m^{-2} y 7 L de sustrato/planta ($0,9 \text{ L} \cdot planta^{-1} \cdot día^{-1} = D_{2,4} V_7$).

Por otra parte, el consumo por área (Figura 8c) incrementó conforme aumentó la densidad de siembra y el volumen sustrato, fluctuando desde un mínimo de $1,54 \text{ L} \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ en los tratamientos de menor volumen ($D_{1,4} V_7$) hasta un máximo de $2,44 \text{ L} \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$ en los tratamientos con 21 L de sustrato. $planta^{-1}$ ($D_{2,4} V_{21}$).

Rendimiento. Los componentes de rendimiento en número y peso de frutos comercial

y total, por planta y por área, únicamente fueron afectados ($p < 0,05$) por la densidad de siembra, sin interacción entre ambos factores. En la Figura 9 se presentan los efectos principales de la densidad de plantación sobre dichos componentes del rendimiento. A nivel de planta, el peso de frutos comercial y total fue mayor en el cultivo de menor densidad, debido a que al disminuir la densidad, incrementó el número de frutos. $planta^{-1}$ en comparación a la densidad de 2,4 plantas. m^{-2} (Figura 9a). Sin embargo, al analizar el rendimiento por área, el incremento en el número de plantas al aumentar la densidad de plantación a 2,4 plantas. m^{-2} , incrementó la cantidad de frutos. m^{-2} y consecuentemente el peso de frutos. m^{-2} (Figura 9b). Independientemente del volumen de sustrato, al aumentar la densidad desde 1,4 a 2,4 plantas. m^{-2} , incrementó la producción comercial un promedio de 30%, equivalente a $2,7 \text{ kg} \cdot m^{-2}$ y $22 \text{ frutos} \cdot m^{-2}$.

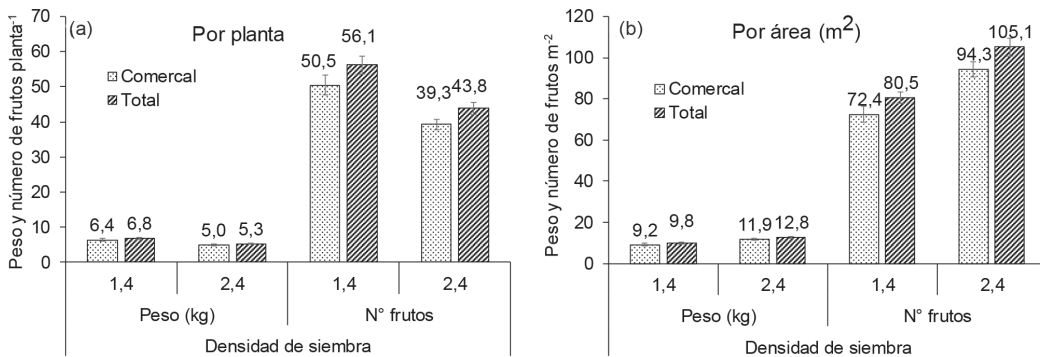


Figura 9 (a) Efectos principales de la densidad de siembra, según los componentes de rendimiento de número y peso de frutos comercial y total por planta.
(b) Efectos por unidad de superficie.

Eficiencia de uso de agua. La eficiencia de uso de agua en producción de fruto comercial (EUA_c) y total (EUA_t) no fue afectada ($p < 0,05$) por la interacción entre densidad de siembra y el volumen de sustrato; mientras que hubo efecto ($p < 0,05$) independiente, con similar magnitud, de ambos factores, cuyos efectos principales se

presentan en la Figura 10. En general, dichas eficiencias incrementaron al disminuir la densidad de siembra y el volumen de sustrato. Indistintamente del volumen de sustrato, al pasar de una densidad de 1,4 a 2,4 plantas. m^{-2} , ambas eficiencias disminuyeron un promedio de 11%. En el volumen de 21 L de sustrato, ambas eficiencias

fueron significativamente menores ($p < 0,05$) que en los tratamientos de 7 y 14 L de sustrato.planta⁻¹, los cuales fueron estadísticamente iguales

($p > 0,05$). Al incrementar el volumen de sustrato de 7 L a 21 L sustrato.planta⁻¹, ambas eficiencias disminuyeron un promedio de 13,5%.

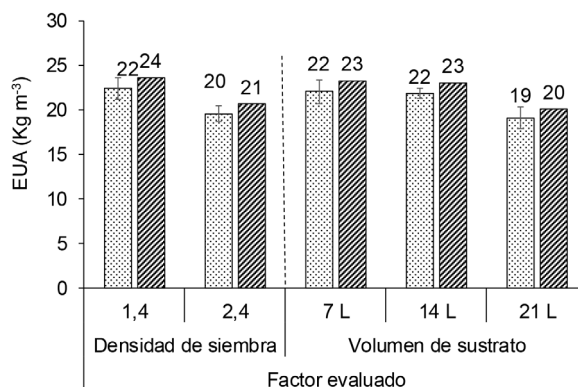


Figura 10 Efectos principales de la densidad de siembra y del volumen de sustrato sobre la eficiencia de uso de agua en rendimiento comercial (EUA_c) y total (EUA_t).

DISCUSIÓN

Debido a la ausencia de interacción entre factores, a continuación se analizan los efectos principales de la densidad de siembra y volumen de sustrato que fueron estadísticamente significativos sobre las variables de respuesta.

La ET_c fue afectada en mayor magnitud por la densidad de siembra que por el volumen de sustrato. En cultivo en sustrato, el principal componente de la ET_c es la transpiración, ya que la evaporación se reduce a valores cercanos a cero (Allen *et al.* 2006). En este ensayo, la superficie húmeda y expuesta del sustrato se redujo sustancialmente al estar cubierto con plástico, donde solo una pequeña área por donde emerge la planta estuvo expuesta a evaporación. El mayor efecto de la densidad de plantas, probablemente, se debió a que dicho factor afecta parámetros de crecimiento de las plantas, tales como el área foliar (AF) y en el tamaño y número de hojas, que están directamente asociados a la transpiración del cultivo (Taiz y Zeiger 2006). Diferentes personas autoras han demostrado que al incrementar la densidad de siembra, el AF y el

número de hojas por planta, disminuye (Aminifard *et al.* 2010) pero incrementan por unidad de superficie. Otras personas autoras han demostrado que el incremento en la densidad de plantación tiene como consecuencia un aumento en la transpiración, debido a un mayor IAF (Qiu *et al.* 2013, Di Benedetto y Tognetti 2016). En chile dulce bajo túneles de plástico, Jolliffe y Gaye (1995) encontraron que el IAF incrementó desde 1,5 m².m⁻² en 1,4 plantas.m⁻² hasta 4 m².m⁻² en 11,1 plantas.m⁻²; mientras que Aminifard *et al.* (2010) determinaron un incremento en el número de hojas a mayor densidad de plantas.m⁻².

Coincidente con lo anterior, en el presente estudio, a mayor densidad la ET_c.planta⁻¹ disminuyó, pero incrementó por área (L.m⁻²). Probablemente, al incrementar la densidad de siembra mediante la reducción de la distancia entre plantas de 0,55 a 0,3 m, incrementó el AF y el número de hojas por m², contribuyendo así, a una mayor transpiración.

La literatura acerca de la ET_c y la EUA relacionada con la densidad de siembra y el volumen de sustrato en chile dulce bajo invernadero, es escasa; y específicamente en Costa Rica hay

un apreciable vacío de información. En cultivos como el tomate en invernadero en suelo, Qiu *et al.* (2013) encontraron que la ET_c incrementó un 11% al aumentar la densidad de 3,1 a 5,6 plantas. m^{-2} . Por otra parte, Silva *et al.* (2010) determinaron que el efecto de la densidad de plantación sobre el crecimiento del cultivo de chile dulce está principalmente determinado por la distancia entre plantas y no por la distancia entre hileras, ya que se anula el efecto de competencia entre hileras. En dicha literatura se encontró que el AF y los contenidos de MS por unidad de área incrementaron conforme aumentó la densidad de siembra al reducir la distancia entre plantas desde 0,4 m hasta 0,2 m, sin efectos debido a la distancia entre hileras.

El volumen de sustrato afectó los volúmenes de ET_c , de drenaje y de ATD, y la EUA, pero no tuvo efecto sobre el rendimiento. La $ET_c \cdot m^{-2}$ y $ET_c \cdot planta^{-1}$ disminuyeron conforme se redujo el volumen de sustrato por planta, probablemente debido a una reducción de la transpiración, relacionado con una reducción del AF del cultivo y del contenido de ATD en el sustrato. En este estudio, con el objetivo de mantener la θ en el rango de AFD en el sustrato (Figura 2), fue necesario incrementar el aporte de agua conforme aumentó el volumen de sustrato por planta, lo cual a la vez estuvo relacionado con el incremento de los volúmenes de drenaje y de ATD. Al respecto, Bar-Tal *et al.* (1995) demostraron que en chile hidropónico bajo invernadero al reducir el volumen del contenedor se restringe el crecimiento radical y el AF y consecuentemente la transpiración.

Según Moreno-Reséndez *et al.* (2015), una reducción del volumen de sustrato limita el crecimiento de la raíz, debido a la reducción en la disponibilidad de oxígeno, agua y nutrientes, que consecuentemente afecta parámetros de crecimiento tales como el AF y el tamaño y número de hojas. En la presente investigación, un menor volumen de sustrato por planta, probablemente, afectó la concentración de oxígeno en la rizosfera. Al respecto, Vence *et al.* (2013) señala que cuando se limita el volumen

de sustrato, el consumo de oxígeno es mayor, mientras que la capacidad de aireación se reduce, debido al incremento en la densidad radical por unidad de volumen. Por otra parte, la temperatura ambiental afecta la temperatura del medio de cultivo en mayor magnitud, conforme se reduce el volumen de sustrato, que a su vez afecta la concentración de oxígeno en la rizosfera (Hurley *et al.* 1998).

No obstante, los potenciales efectos negativos de un menor volumen de sustrato, no afectaron el rendimiento por planta, sino por área, debido al incremento en el número de plantas m^{-2} . Probablemente, el híbrido dulcítico, por ser mejorado localmente para las condiciones específicas del trópico, podría presentar una posible plasticidad genética del sistema radical que le permite una mejor adaptación a volúmenes reducidos de sustrato.

Independiente de la densidad de plantas, el ATD por planta incrementó al aumentar el volumen de sustrato, lo cual estuvo relacionado con una mayor ET_c , debido a incrementos en la transpiración. Al respecto, diferentes estudios han demostrado que el aumento del volumen de sustrato favorece el crecimiento del cultivo (Poorter *et al.* 2012, Luo *et al.* 2015, Graham y Wheeler 2015) y consecuentemente la ET_c . Otras personas autoras han demostrado que a menor volumen de sustrato se reduce la transpiración, debido a una reducción del AF, el número y tamaño de la hoja, peso seco de raíz y en la respuesta estomática (NeSmith *et al.* 1992, Kharkina *et al.* 1999, Ismail *et al.* 2002).

En los cultivos sin suelo, el volumen de sustrato no está distribuido por unidad de superficie ($L \cdot m^{-2}$) y el sistema radicular de cada planta explora un volumen de sustrato que está determinado por las dimensiones del contenedor ($L \cdot planta^{-1} \cdot bolsa^{-1}$). Diversos estudios han demostrado que al incrementar el volumen de sustrato, aumenta el volumen de ATD para la planta (Hurley *et al.* 1998). Al respecto, Moral *et al.* (2014) demostraron que un mayor contenido de $ATD \cdot planta^{-1}$ es un parámetro clave en la morfología radicular, ya que genera mayor longitud

y área radicular, pero menor diámetro de raíces, lo que indica una formación más eficiente de pelos radiculares. Esto provee a la planta mayor capacidad de absorción de agua y de nutrientes y, por tanto, mayor crecimiento foliar. En cultivo de chile dulce bajo invernadero, Fernández *et al.* (2005) demostraron que al aumentar el volumen de ATD para la planta mediante tratamientos con dosis crecientes de riego, consecuentemente aumentó la ET_c y disminuyó la EUA.

Durante el ciclo del experimento, el manejo independiente y diferenciado del riego, de acuerdo con el volumen de sustrato por planta, permitió mantener el porcentaje de θ dentro del rango de AFD en el sustrato. Para mantener la θ en el rango de AFD, fue necesario incrementar el aporte de agua conforme se incrementó el volumen de sustrato por planta (Figura 3b). Dicho comportamiento reflejó la interacción sustrato-planta-atmósfera, ya que a mayor volumen de riego, como consecuencia de mayor volumen de sustrato.planta⁻¹, incrementó el volumen de ATD.planta⁻¹, y consecuentemente, hubo mayores volúmenes de drenaje y de ET_c .

Un mayor volumen de drenaje, en los tratamientos de más volumen de sustrato, coinciden con estudios realizados por Abdel-Maugoud *et al.* (2006), quienes aplicaron diferentes volúmenes de riego en chile dulce cultivado en lana de roca, obteniendo un 8% menos de drenaje en el tratamiento con menor ATD.planta⁻¹.

Rendimiento y eficiencia de uso de agua. El peso medio de fruto no fue afectado por ninguno de los factores estudiados, coincidente con estudios realizados por Cavero *et al.* (2001) y Cruz *et al.* (2009) en chile dulce. Por otra parte, los componentes de rendimiento número y peso de frutos, únicamente fueron afectados por la densidad de siembra. A mayor densidad, el número y rendimiento de frutos comercial y total disminuyó por planta; sin embargo, incrementó por unidad de superficie, lo cual coincide con diversos estudios realizados en chile dulce (Hossein 2012, Cavero *et al.* 2001, De Freitas *et al.* 2017, Ngozi y Chidera 2017). Rangel (2016) demostró

que el rendimiento en chile dulce incrementó de 2,25 a 4,26 y kg.m⁻² al aumentar la densidad de 2,8 a 5,3 plantas.m⁻², respectivamente; mientras que Hossein (2012) reportó que los rendimientos aumentaron de 4,9 kg.m⁻² en 3,3 plantas.m⁻² hasta 12,9 kg.m⁻² en 10 plantas.m⁻². En cultivo de chile dulce bajo invernadero se han reportado rendimientos desde 32,5 ton.ha⁻¹ (Nafarrate-Ramos *et al.* 2016) hasta 81,5 t.ha⁻¹ (Dafgan y Abak 2003). En este experimento, se obtuvo un rendimiento comercial superior, con un máximo de 120 t.ha⁻¹ a 2,4 plantas.m⁻² y hasta 56 frutos.planta⁻¹ a una densidad de 1,4 plantas.m⁻².

Entre las alternativas para mejorar la EUA, se incluyen todas aquellas prácticas de manejo del cultivo orientadas a reducir el consumo de agua y a aumentar el rendimiento del cultivo (Ritchie y Basso 2008). Debido al sistema hidropónico utilizado en este estudio, la evaporación fue insignificante, por lo que el consumo de agua correspondió básicamente a transpiración. Ritchie y Basso (2008) en una revisión exhaustiva, demostraron que la densidad de plantas y el aporte de agua influyen en el rendimiento, el cual mantiene una relación lineal con la EUA. Considerando que la EUA es la relación entre producción (kg.m⁻²) y ET_c (L.m⁻²), se espera que un mayor rendimiento obtenido en la densidad de 2,4 plantas.m⁻², resultara en una mayor EUA. Sin embargo, una menor densidad a 1,4 planta.m⁻² contribuyó a reducir la ET_c .m⁻² en un promedio de 41%, lo cual ayudó a incrementar un 11% la EUA, en comparación a la densidad de 2,4 planta.m⁻². En el cultivo de mayor densidad de plantas, aunque el rendimiento por área aumentó debido al incremento en el número de plantas, la magnitud del incremento, debido al efecto del factor densidad, fue mayor para la ET_c que para el rendimiento.

Los valores de EUA obtenidos a menor densidad, en el presente estudio (21,2 a 25,3 kg.m⁻³), fueron superiores a los reportados por Fernández *et al.* (2007) en el cultivo de chile dulce bajo invernadero en Almería, España (13,1 kg.m⁻³) y por Arévalo (2015) en Comayagua, Honduras. Aunque el factor volumen no influyó directamente en los rendimientos, el volumen

promedio de sustrato por unidad de superficie fue mayor en la densidad de 2,4 planta.m⁻² (33,6 L.m⁻²) que en 1,4 planta.m⁻² (19,6 L.m⁻²). Por tanto, para mantener la θ dentro del rango de AFD en el sustrato, en los tratamientos de 2,4 planta.m⁻², fue necesario aplicar mayores volúmenes de riego, lo cual, consecuentemente, incrementó los volúmenes de ATD, el drenaje y la ET_c, reduciendo la EUA.

Xu and Kafkafi (2001), al evaluar el efecto del volumen de sustrato sobre el rendimiento, encontraron que al incrementar de 9 a 33 L.planta⁻¹, el rendimiento aumentó; mientras que Karam *et al.* (2009), en Chile “Bell pepper”, demostraron que al aumentar el volumen de ATD en el sustrato, incrementó el rendimiento, debido a una mayor eficiencia de uso de la radiación. Sin embargo, en este estudio al incrementar el volumen de sustrato, el potencial efecto positivo sobre la producción no se manifestó. Por tanto, un hallazgo relevante es el comportamiento característico del genotipo del híbrido Dulcítico en respuesta al volumen del contenedor y a la densidad de plantas. Por primera vez, se reporta la ET_c obtenida por un método directo (lisímetro), el rendimiento de frutos y la eficiencia física de uso del agua, bajo un manejo hidropónico y en invernadero.

En resumen, un menor volumen de sustrato no incrementó los rendimientos por área, sin embargo, mejoró la EUA al reducir los volúmenes de riego, de ET_c y de drenaje; mientras que una mayor densidad de siembra mejoró los rendimientos (k.m⁻²), pero redujo la EUA, debido a un mayor gasto de agua como consecuencia de mayores volúmenes de riego, de ATD, de ET_c y de drenaje. Aun cuando la mayor densidad de siembra elevó los rendimientos en un 30% (2 kg.m⁻²), es importante determinar la densidad óptima económica, en la cual se da la mayor relación beneficio/costo. En este sentido, Camacho (2017), mediante un análisis de presupuestos parciales, determinó que el tratamiento de 1,4 plantas.m⁻² y 7 L de sustrato presentó el mayor beneficio neto, debido a una mayor magnitud en la reducción en los costos. Coincidentemente, dicho tratamiento presentó la mayor EUA.

LITERATURA CITADA

- Abdel-Maugoud, AMR; Sassine, YN; Ghora, Y; Heuvelink, E. 2006. Independent effect of water content in rockwool® on water use, growth and production of greenhouse sweet pepper European Journal of Scientific Research 15:235-234.
- Allen, RG; Pereira, LS; Raes, D; Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO-56. Riego y Drenaje. Roma, Italia. 323 p.
- Aminifard, MH; Aroiee, H; Karimpour, S; Nemati, H. 2010. Growth and yield characteristics of paprika pepper (*Capsicum annum* L.) in response to plant density. Asian Journal of Plant Sciences 9(5):276-280.
- Arévalo, G. 2015. Determinación de la eficiencia de manejo de nutrientes y agua en tres variedades de pimiento de color (*Capsicum annum* L.) bajo hidroponía en condiciones de invernadero en Mulacagua, Comayagua, Honduras. Tesis doctoral. Almería, España, Universidad de Almería. 193 p.
- Bar-Tal, A; Feigin, A; Sheinfeld, S; Rosenberg, R; Sternbaum, B; Rylski, I; Pressman, E. 1995. Root restriction and N-NO₃ solution concentration effects on nutrient uptake, transpiration and dry matter production of tomato. Scientia Horticulturae 63:195-208.
- Cabrera, J. 2009. Evaluación del consumo de agua y nutrientes en Chile (*Capsicum annum*), variedades Taranto, Zidenka y Sympathy en hidroponía y condiciones de altura en Mulacagua, Comayagua, Honduras. Tesis Lic. Honduras, Zamorano. 31 p.
- Camacho, G. 2017. Evaluación económica para la producción del híbrido de Chile dulce (*Capsicum annum*) “Dulcítico” en invernadero, mediante el enfoque de presupuestos parciales, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Tesis de Lic. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 148 p.
- Cavero, J; Gil Ortega, R; Gutierrez, M. 2001. Plant density affects yield, yield components, and color of direct-seeded paprika pepper. Hort. Science 36(1):76-79.
- Christiansen, JE. 1942. Irrigation by Sprinkling. California Agricultural Experiment Station. Bulletin N° 670. 126 p.
- Cruz, N; Sánchez, F; Ortiz, CJ; Mendoza, CM del C. 2009. Altas densidades con despunte temprano en rendimiento y período de cosecha en Chile pimiento. Agricultura Técnica en México 35(1):73-80.
- Dafgan, HY; Abak, K. 2003. Effects of Plant Density and Number of Shoots on Yield and Fruit Characteristics of Peppers Grown in Glasshouses. Turk J. Agric. 27:29-35.
- De Freitas, G; Ramos, A; Chaves, LHG; Santos Júnior, JA; Gheyi, HR. 2017. Growth and Production of Hydroponic Pepper under Salt Stress and Plant

- Density. *American Journal of Plant Sciences* 8(9):2255-2267.
- Di Benedetto, A; Tognetti, J. 2016. Técnicas de análisis de crecimiento de plantas : su aplicación a cultivos intensivos. *Ria* 42(1900):258-282.
- Di Rienzo, JA; Macciavelli, RE; Casanoves, F. 2012. Modelos Lineales Mixtos: aplicaciones en InfoStat. Universidad de Córdoba, Córdoba, Argentina. 193 p.
- Echandi, C. 2012. Híbridos promisorios de chile dulce para la zona media-alta de Costa Rica. Boletín Técnico Quincenal de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit, Universidad de Costa Rica. Alajuela, Costa Rica. 7 p.
- Elliott, J; Deryng, D; Müller, C; Frieler, K; Konzmann, M; Gerten, D; Glotter, M; Flörke, M; Wada, Y; Best, N; Eisner, S; Fekete, BM; Folberth, C; Foster, I; Gosling, SN; Haddeland, I; Khabarov, N; Ludwig, F; Masaki, Y; Olin, S; Rosenzweig, C; Ruane, AC; Satoh, Y; Schmid, E; Stacke, T; Tang, Q; Wisser, D. 2014. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111(9):3239-3244.
- Fernández, MD; Gallardo, M; Bonachela, S; Orgaz, F; Thompson, RB; Fereres, E. 2005. Water use and production of a greenhouse pepper crop under optimum and limited water supply. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 80(1):87-96.
- Fernández, MD; González, AM; Carreño, J; Pérez, C; Bonachela, S. 2007. Analysis of on-farm irrigation performance in Mediterranean greenhouses. *Agricultural Water Management* 89:251-260.
- Graham, T; Wheeler, R. 2015. Root restriction: A tool for improving volume utilization efficiency in bioregenerative life-support systems. *Life Sciences in Space Research* 9:62-68.
- Guang-Cheng, S; Na, L; Zhan-Yu, Z; Shuang-En, Y; Changren, C. 2010. Growth, yield and water use efficiency response of greenhouse-grown hot pepper under Time-Space deficit irrigation. *Scientia Horticulturae* 126(2):172-179.
- Hakkı, O; Yıldırım, M. 2015. Water and Radiation Use Efficiencies of Pepper (*Capsicum annuum* L. cv. Carliston). *Sch. J. Agric. Vet. Sci.* 2(2A):87-93.
- Hossein, M. 2012. Effect of plant density and nitrogen fertilizer on growth, yield and fruit quality of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *African Journal of Agricultural Research* 7(6):859-866.
- Hurley, MB; Rowarth, JS; Trought, MCT; Barnes, MF; Rowe, RN. 1998. Variations in water availability and temperature in the root environment during root volume restriction studies. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science* 26(2):127-134.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos Agropecuarios). 2015. VI Censo Nacional Agropecuario. San José, Costa Rica. 145 p.
- Ismail, MR; Davies, WJ; Awad, MH. 2002. Leaf growth and stomatal sensitivity to ABA in droughted pepper plants. *Scientia Horticulturae* 96(1-4):313-327.
- Jara, D. 2016. Evaluación de tres híbridos de pimiento (*Capsicum annuum* L.) cultivados en hidroponía con tres mezclas de sustrato. Tesis Ing. Agr. Universidad de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador. 46 p.
- Jolliffe, PA; Gaye, MM. 1995. Dynamics of growth and yield component responses of bell peppers (*Capsicum annuum* L.) to row covers and population density. *Scientia Horticulturae* 62(3):153-164.
- Karam, F; Masaad, R; Bachour, R; Rhayem, C; Roupheal, Y. 2009. Water and radiation use efficiencies in drip-irrigated pepper (*Capsicum annuum* L.). Response to full and deficit irrigation regimes. *European Journal of Horticultural Science* 74(2):79-85.
- Kharkina, TG; Ottosen, CO; Rosenqvist, E. 1999. Effects of root restriction on the growth and physiology of cucumber plants. *Physiologia Plantarum* 105(3):434-441.
- Kirda, C; Topcu, S; Cetin, M; Dasgan, HY; Kaman, H; Topaloglu, F; Derici, MR; Ekici, B. 2007. Prospects of partial root zone irrigation for increasing irrigation water use efficiency of major crops in the Mediterranean region. *Annals of Applied Biology* 150:281-291.
- Koksal, ES; Tasan, M; Artik, C; Gowda, P. 2017. Evaluation of financial efficiency of drip-irrigation of red pepper based on evapotranspiration calculated using an iterative soil water-budget approach. *Scientia Horticulturae* 226:398-405.
- López-Marín, J; Gálvez, A; del Amor, FM; Albacete, A; Fernández, JA; Egea-Gilabert, C; Pérez-Alfocea, F. 2017. Selecting vegetative/generative/dwarfing rootstocks for improving fruit yield and quality in water stressed sweet peppers. *Scientia Horticulturae* 214:9-17.
- López-Marín, J; González, A; Pérez-Alfocea, F; Egea-Gilabert, C; Fernández, JA. 2013. Grafting is an efficient alternative to shading screens to alleviate thermal stress in greenhouse-grown sweet pepper. *Scientia Horticulturae* 149:39-46.
- Luo, HH; Tao, XP; Hu, YY; Zhang, YL; Zhang, WF. 2015. Response of cotton root growth and yield to root restriction under various water and nitrogen regimes. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178(3):384-392.
- Moral, R; Picó, B; Barber, X; Mininni, C; Agulló, E; Pérez-Murcia, MD; Pérez-Espinosa, A; Paredes, C; Bustamante, MA. 2014. Uso del escaneo de raíces para estimar la calidad de sustratos alternativos a la turba. In Ansorena, J; Merino, D (eds.). *Actas de Horticultura, XI Jornadas de Sustratos*. Barcelona, España, Sociedad Española de ciencias Horticolas (SECH) 67:49-54.

- Moreno-Reséndez, A; Hernández-García, R; Rodríguez-Dimas, N; Reyes-Carrillo, JL; Márquez-Quiroz, C; Preciado-Rangel, P. 2015. Development of "Serrano" pepper in vermicompost: Perlite substrates under shade net conditions. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 27(12):897-902.
- Nafarrate-Ramos, D; Sanchez-Soto, BH; Nunez-Ramirez, F; Lugo-Garcia, GA; Sarabia-Perea, VR; Buelnatarin, S. 2016. Anaheim Pepper (*Capsicum annuum* L.) Production on Substrates under Greenhouse Conditions. *Open Access Library Journal* 3(6):1-6.
- NeSmith, D; Bridges, D; Barbour, J. 1992. Bell pepper responses to root restriction. *Journal of Plant Nutrition* 15(12):2763-2776.
- Ngozi, EA; Chidera, VO. 2017. The effect of plant density on growth and yield of NsukkaYellow aromatic pepper (*Capsicum annuum* L.). *African Journal of Agricultural Research* 12(15):1269-1277.
- Pérez, PJ; Castellví, F. 2002. Análisis de la evapotranspiración a escala local y regional en cataluña. *Ingeniería del agua* 9(1):59-72.
- Poorter, H; Bühler, J; Van Dusschoten, D; Climent, J; Postma, JA. 2012. Pot size matters: A meta-analysis of the effects of rooting volume on plant growth. *Functional Plant Biology* 39(11):839-850.
- Qiu, R; Song, J; Du, T; Kang, S; Tong, L; Chen, R; Wu, L. 2013. Response of evapotranspiration and yield to planting density of solar greenhouse grown tomato in northwest China. *Agricultural Water Management* 130:44-51.
- Quesada, G. 2015. Producción de chile dulce en invernadero bajo diferentes niveles de agotamiento en la humedad del sustrato. *Agronomía costarricense* 39(1):25-36.
- Rangel, L. 2016. Crecimiento de chile habanero (*Capsicum Chinense* Jacq.) bajo diferentes espaciamientos entre hileras en la comarca lagunera. Tesis Lic. Coahuila, México, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 55 p.
- Ritchie, JT; Basso, B. 2008. Water use efficiency is not constant when crop water supply is adequate or fixed: The role of agronomic management. *European Journal of Agronomy* 28(3):273-281.
- Rojas, J; Paniagua, F. 2015. Comportamiento agronómico de *Capsicum annuum* L., *Lycopersicon esculentum* M. y *Cucumis melo* L. bajo cultivo protegido hidropónico utilizando la solución universal de Steiner. Tesis Lic. San Carlos, Costa Rica, Tecnológico de Costa Rica. 98 p.
- Silva, PIB; de Negreiros, MZ; de Freitas Moura, KKC; de Freitas, FCL; de Sousa Nunes, GH; Silva, PSL e.; Grangeiro, LC. 2010. Crescimento de pimentão em diferentes arranjos espaciais. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira* 45(2):132-139.
- Soto, F. 2018. Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero. *Agronomía Costarricense* 42(2):59-73.
- Taiz, L; Zeiger, E. 2006. *Plant Physiology*. 3 edition. Sinauer Associates, Inc. Sunderland, Massachusetts. 764 p.
- Tilman, D; Cassman, KG; Matson, PA; Naylor, R; Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418(6898):671-677.
- Vence, LB; Valenzuela, OR; Svartz, HA; Conti, ME. 2013. Elección del sustrato y manejo del riego utilizando como herramienta las curvas de retención de agua. *Ciencia del Suelo* 31(2):153-164.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2016. *The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs*. UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ed.). Paris. 148 p.
- Xu, G; Kafkafi, U. 2001. Nutrient supply and container size effects on flowering, fruiting, assimilate allocation, and water relations of sweet pepper. *Acta Horticulturae* 1:113-120.



Todos los derechos reservados. Universidad de Costa Rica. Este artículo se encuentra licenciado con Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Costa Rica. Para mayor información escribir a rac.cia@ucr.ac.cr