

## Coeficientes de cultivo según densidad de siembra y volumen de sustrato en chile dulce bajo invernadero

### Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de dos densidades de siembra (1,4 y 2,4 plantas m<sup>-2</sup>) y tres volúmenes de sustrato/planta (7, 14 y 21 L) sobre los K<sub>c</sub> de chile dulce (*Capsicum annuum*) en fibra de coco bajo invernadero. El experimento se realizó del 22 de abril al 28 de agosto del 2016, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Se utilizó un diseño de tres bloques completos al azar con arreglo bifactorial de tratamientos. Los K<sub>c</sub> se obtuvieron como el cociente entre la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>), obtenida por método lisimétrico de balance de agua, y la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) según Penman-Monteith FAO-56. K<sub>c</sub> de chile dulce hidropónico bajo invernadero no fueron afectados por la interacción entre densidad de plantas y volumen de sustrato (P>0,05); sin embargo, ambos factores afectaron (P<0,05) individualmente, con mayor efecto del factor densidad. Indistintamente del volumen de sustrato, los K<sub>c</sub> se redujeron un promedio de 33%, al pasar de 2,4 a 1,4 plantas m<sup>-2</sup>. Independiente de la densidad de plantación, la mayor reducción (11,5%) del K<sub>c</sub> se presentó al disminuir el volumen desde 21 l a 7 l de sustrato planta<sup>-1</sup>. La densidad de siembra y volumen de sustrato afectaron la ET<sub>c</sub> y consecuentemente los K<sub>c</sub> del cultivo hidropónico de chile dulce bajo invernadero. La técnica de cultivo hidropónico en invernadero junto al clima y las prácticas de cultivo, reflejaron diferencias sustanciales entre valores K<sub>c</sub> FAO-56 y los K<sub>c</sub> obtenidos en el cultivo de chile dulce.

**Palabras claves:** coeficiente único de cultivo, evapotranspiración de cultivo, método FAO-56, cultivos en invernadero, balance hídrico.

### Crop coefficients according to plant density and substrate volume in sweet pepper under greenhouse

#### Abstract

The objective of this study was to determine the effect of two planting densities (1.4 and 2.4 plants m<sup>-2</sup>) and three volumes of substrate plant<sup>-1</sup> (7, 14 L and 21 L) on the K<sub>c</sub> of sweet pepper (*Capsicum annuum*) in coconut fiber in a greenhouse. The experiment was carried out from April 22 to August 28, 2016, at the Fabio Baudrit Moreno Agricultural Research Station, Alajuela, Costa Rica. It was used a three complete randomized blocks experimental design with a bifactorial treatment arrangement. The K<sub>c</sub> were obtained as the ratio between the crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) obtained by the water balance method, and the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) according to Penman-Monteith FAO-56. The K<sub>c</sub> of sweet pepper hydroponic under greenhouse were not affected by the interaction between plant density and substrate volume (P>0.05); however, both factors affected (P<0.05) individually, with a more significant effect of the density factor. Indistinctly the substrate volume, the K<sub>c</sub> were reduced in average 33%, going from 2.4 plants m<sup>-2</sup> to 1.4 plants m<sup>-2</sup>. Independent of plantation density, the most significant reduction (11.5%) in K<sub>c</sub> occurred when the volume decreased from 21 L to 7 L of substrate plant<sup>-1</sup>. Plant density and amount of substrate affected the ET<sub>c</sub> and consequently the K<sub>c</sub> of the hydroponic crop of greenhouse sweet pepper. The technique of hydroponic greenhouse crop along with the climate and cultivation practices reflected appreciable differences between K<sub>c</sub> FAO-56 values and the K<sub>c</sub> obtained in the sweet pepper cultivated.

**Keywords:** single crop coefficient, crop evapotranspiration, FAO-56 method, glasshouse production, water balance.

Received at: 22/03/2018

Accepted for publication at: 19/10/2018

1 PhD. Universidad de Costa Rica, Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno. Alajuela, Costa Rica. freddydotbravo@ucr.ac.cr

## Coeficiente de cultivo de acuerdo con la densidad de siembra y volumen de sustrato en pimentón cultivado en estufa

### Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de dos densidades (1,4 y 2,4 plantas m<sup>-2</sup>) y tres volúmenes de sustrato / planta (7, 14 y 21 L) sobre el K<sub>c</sub> de la cultura del pimentón (*Capsicum annuum*) en fibra de coco en estufa. El experimento fue realizado en el período del 22 de abril al 28 de agosto de 2016, en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Se utilizó un diseño de tres bloques completos casualizados con un arreglo de tratamiento bifactorial. Los K<sub>c</sub> fueron obtenidos como la razón entre la evapotranspiración de la cultura (ET<sub>c</sub>) obtenida por balance hídrico en lisímetros, y la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) de acuerdo con Penman-Monteith FAO-56. Los K<sub>c</sub> de pimentón hidropónico en estufa no fueron afectados por la interacción entre densidad de plantas y volumen de sustrato (P > 0,05); sin embargo, ambos factores afectaron (P < 0,05) individualmente, con mayor efecto del factor densidad. Independientemente del volumen de sustrato, los K<sub>c</sub> fueron reducidos en un promedio del 33%, al pasar de 2,4 a 1,4 plantas m<sup>-2</sup>. Independiente de la densidad de plantío, la mayor reducción (11,5%) en el K<sub>c</sub> ocurrió cuando el volumen de sustrato disminuyó de 21 a 7 litros planta<sup>-1</sup>. La densidad de plantas y el volumen de sustrato afectaron a ET<sub>c</sub> y, consecuentemente, al K<sub>c</sub> de la cultura hidropónica de pimentón. La técnica de cultivo hidropónico en estufa junto con el clima y las prácticas de cultivo reflejaron diferencias sustanciales entre los valores de K<sub>c</sub> FAO-56 y el K<sub>c</sub> obtenido en el cultivo de pimentón.

**Palabras-clave:** coeficiente único de cultivo, evapotranspiración de la cultura, método FAO-56, cultivo en estufa, balance hídrico.

### Introducción

En América entre los años 2013-2014, la extensión del cultivo de chile alcanzó alrededor de las 233.000 ha (FAOSTAT, 2017). En Costa Rica, en el año 2014 se cultivaron aproximadamente 1085 ha de chile dulce (INEC, 2015) de las cuales alrededor de 158 ha fueron bajo invernadero (ROJASY PANIAGUA, 2015).

La agricultura enfrenta el desafío de abastecer la creciente demanda de alimentos producto del crecimiento de la población mundial, ante el cambio climático asociado a una potencial crisis global del agua. El crecimiento demográfico mundial proyectado a 9000 millones de habitantes en el año 2050 (TILMAN et al., 2002), prevé un incremento en la demanda de 66% en alimentos vegetales y de 76% en productos pecuarios (WWAP, 2016). Del total de recursos hídricos del planeta, el agua dulce disponible representa tan solo un 1,5%, del cual el sector agropecuario es el principal consumidor de agua (69%). Al respecto, ELLIOTT et al. (2014), señalan que la escasez de agua dulce para riego como consecuencia del cambio climático, reduciría los rendimientos en los principales cultivos alimenticios como maíz, soja, trigo y arroz. Lo anterior plantea la necesidad de realizar un uso eficiente del agua, mediante una estimación

precisa de la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>). El método propuesto por FAO-56 (ALLEN et al., 2006), ampliamente usado en diferentes regiones del mundo, estima la ET<sub>c</sub> como el producto de la evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) por un coeficiente de cultivo (ET<sub>c</sub> = ET<sub>o</sub> \* K<sub>c</sub>). El componente ET<sub>o</sub> se puede estimar con bastante exactitud por el método Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN et al., 2006), ya que ha demostrado ser un método muy preciso en diferentes regiones del mundo (FERNÁNDEZ et al. 2010; Fernández et al., 2011), al considerar datos climáticos locales y un cultivo hipotético de referencia estándar (pasto o alfalfa). En FAO-56, el K<sub>c</sub> obtenido mediante la relación ET<sub>c</sub>/ET<sub>o</sub>, incorpora el efecto de las características morfo-fisiológicas del cultivo consecuentes de la interacción genotipo-clima-manejo agronómico, sobre la demanda hídrica del cultivo. En el método FAO-56 se puede utilizar un K<sub>c</sub> dual, compuesto del coeficiente basal de cultivo (K<sub>cb</sub>) y el coeficiente de evaporación de suelo (K<sub>e</sub>), que permite estimar la transpiración (T<sub>p</sub>) y la evaporación (E) por separado (T<sub>p</sub> = ET<sub>o</sub> \* K<sub>cb</sub> y E = K<sub>e</sub> \* ET<sub>o</sub>). También se puede utilizar un coeficiente único del cultivo (K<sub>cu</sub>) que integra el K<sub>cb</sub> y el K<sub>e</sub> en un solo valor de K<sub>c</sub>.

La limitante de dicho método, radica en que en muchas regiones del mundo no existen datos locales de

$K_c$  ante lo cual normalmente se utilizan valores de  $K_c$  del manual FAO-56 (ALLEN et al., 2006). Sin embargo, estos  $K_c$  fueron obtenidos en condiciones de suelo a campo abierto, sin considerar la interacción entre clima, genotipo y manejo agronómico para el cultivo en sustrato y bajo invernadero. Por tanto, la utilización de estos  $K_c$  para efectos de manejo en el trópico conlleva a imprecisiones en el aporte de agua a los cultivos.

En la práctica la  $ET_c$  estimada con el método FAO-56 para suelo, es difícil de extrapolar al cultivo en sustrato en invernadero, ya que en este sistema de cultivo la  $ET_c$  generalmente es menor que en cultivos en campo abierto, debido a las diferencias en clima, genotipo y manejo agronómico (ORGAZ et al., 2005). El método FAO-56 para cultivo en suelo considera la evaporación desde la superficie húmeda del suelo sin cobertura y expuesta a la evaporación (ALLEN et al., 2006), sin considerar el efecto reductor de la evaporación y la transpiración, debido al sistema de cultivo en invernadero, el genotipo y las prácticas específicas de manejo agronómico. En cultivo hidropónico, normalmente el sustrato está recubierto con una lámina plástica que reduce sustancialmente la evaporación, por lo cual la  $ET_c$  corresponde básicamente a la transpiración; mientras que en cultivos en suelo la evaporación comprende una significativa fracción de la  $ET_c$ . Por otra parte, el manejo del riego de cultivos en suelo y en sustrato difiere, ya que la dinámica del agua varía debido a las diferencias en las características físicas e hidráulicas.

Respecto a los efectos de prácticas de manejo del cultivo, muchos estudios han demostrado que el incremento en la densidad de plantación tiene como consecuencia un aumento en la transpiración (QIU et al., 2013; DI-BENEDETTO Y TOGNETTI, 2016) debido a que el área foliar (AF) y el número de hojas incrementan por unidad de superficie (Aminifard et al., 2010). En relación al efecto del volumen de sustrato sobre los  $K_c$ , la información es escasa. Estudios realizados por BAR-TAL et al. (1995) y MORENO-RESÉNDEZ et al. (2015) demostraron que la reducción del volumen del contenedor afecta el crecimiento de la raíz y el AF.

Lo anterior plantea la necesidad de generar  $K_c$  para las condiciones particulares del cultivo sin suelo bajo invernadero, que considere las prácticas de manejo del cultivo tales como la densidad de siembra, volumen de sustrato, forma del contenedor, nutrición, podas, tutorado, entre otras, específicas de la técnica de producción en sustrato bajo invernadero. En Costa Rica, SOTO (2018) reportó que el umbral de humedad en

un sustrato de fibra de coco, como criterio para aplicar riego en chile dulce en invernadero, fue de un 38% correspondiente a un potencial mátrico de 5 kPa, con promedios de  $ET_c$  desde 1,75 hasta 2,1 L por planta día<sup>-1</sup>.

Históricamente, la producción de chile dulce en Costa Rica se ha caracterizado por la dependencia tecnológica de semilla importada. El "Dulcítico" es el primer híbrido nacional de chile dulce desarrollado en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno de la Universidad de Costa Rica, adaptado a las condiciones agroecológicas locales. Sin embargo, es imprescindible el acompañamiento en investigación, para generar tecnologías de manejo agronómico que permitan expresar su máximo potencial productivo.

El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la densidad de siembra y el volumen de sustrato sobre los coeficientes ( $K_c$ ) del cultivo de chile dulce "Dulcítico" en fibra de coco bajo invernadero. Adicionalmente, los valores de  $K_c$  obtenidos fueron comparados con valores de  $K_c$  del manual FAO-56 (ALLEN et al., 2006), que han sido ampliamente utilizados para estimar la  $ET_c$  de los cultivos hortícolas a nivel mundial.

## **Materiales y métodos**

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

Se utilizó un invernadero multitúnel de hierro galvanizado, con cubierta de polietileno (200  $\mu$ m) y malla anti-insectos (43 mesh) en las paredes, alturas de 6 m al centro y 4 m a la canoa. El sistema de ventilación fue pasivo con la apertura de ventanas cenitales automatizadas, según velocidad de viento y precipitación.

Durante el experimento, en el interior del invernadero se monitoreó la radiación solar (Piranómetro LI-COR Mod. LI-200SA), la temperatura y la humedad relativa (VAISALA Modelo HMP-35C), almacenados en un "data logger" (Campbell Scientific, Mod. CR1000). La radiación solar ( $R_s$ ) en MJ m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> fue expresada en mm día<sup>-1</sup> mediante el factor de conversión  $\frac{1}{\lambda}$  donde  $\lambda$  es el calor latente de vaporización ( $\lambda = 2,501 \frac{1}{\lambda} * 0,002361 * T$ ) y T es la temperatura promedio diaria (°C). El déficit de presión de vapor (DPV) se calculó a partir de datos de temperatura y humedad relativa diaria, según ALLEN et al. (2006).

Los promedios de todo el ciclo de cultivo,

de valores diarios máximos, mínimos y promedios, fueron respectivamente, 31,8, 20,1, y 24,6% para temperatura, 99,3, 56,2 y 83,9°C para humedad relativa, 14,1, 9,7 y 3,4 mm para la integral de radiación solar, 1,89, 1,07 y 0,34 kPa para DPV y 3,61, 1,77 y 0,33 m s<sup>-1</sup> para la velocidad de viento.

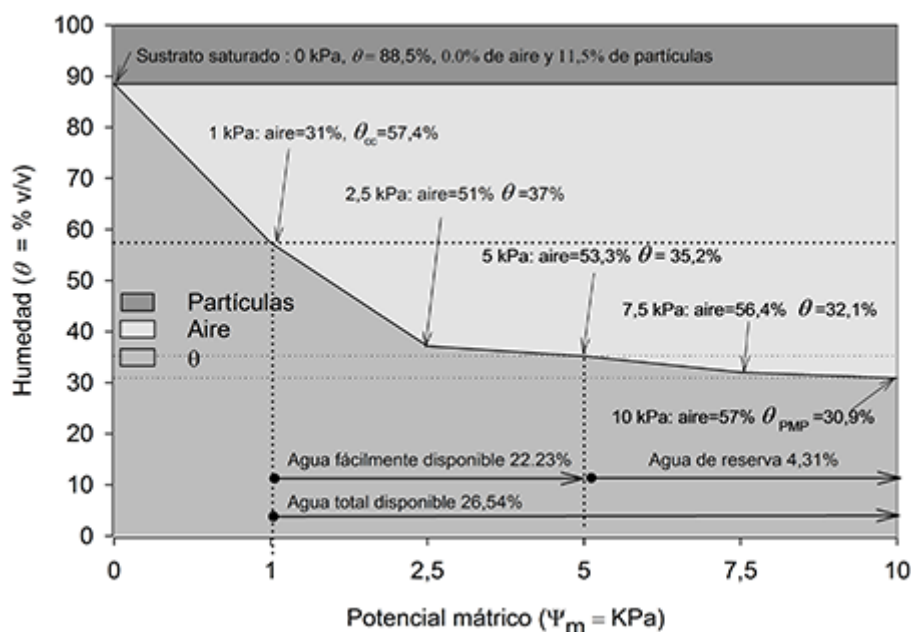
Se utilizó el híbrido costarricense F1 "Dulcítico" (*Capsicum annuum*), el cual inicia cosecha entre 90 y 110 días después del trasplante, posee crecimiento indeterminado, fruto cónico, color verde-rojo, altos grados brix y rendimiento de hasta 9,55 kg m<sup>-2</sup>. Para la siembra se utilizaron plántulas de 37 días de edad con seis hojas verdaderas, obtenidas en bandejas plásticas de 98 celdas con turba (peat moss) como medio de cultivo.

Como sustrato se utilizaron bloques comprimidos (100x15x3 cm) de fibra de coco (FICO®), los cuales fueron hidratados y descomprimidos. La porosidad total (%P<sub>t</sub>), densidad aparente, densidad real (d<sub>r</sub>) y el contenido de partículas sólidas (%) se obtuvieron según la metodología propuesta por UNE-EN-13041 (2007) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Características físicas de la fibra de coco utilizada como sustrato para el cultivo de chile dulce (*Capsicum annuum*), hidropónico bajo invernadero. Alajuela, Costa Rica. 2016.

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

Los curva de liberación de agua y aire en la fibra de coco se determinó según la norma Europea UNE-EN-13041 (2007), a partir del porcentaje de humedad volumétrica ( $\theta$ ) en muestras sometidas a potenciales mátricos ( $\psi_m$ ) de 1,0, 2,5, 5,0, 7,5 y 10 kPa, utilizando un equipo de caja de arena (Eikelkamp, mod. 08.01). Para cada  $\psi_m$  se utilizaron



**Figura 1.** Curva característica de liberación de aire y desorción de agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua total disponible en la fibra de coco utilizada como sustrato para el cultivo de chile dulce (*Capsicum annuum*), hidropónico bajo invernadero. Las siglas  $\theta_{cc}$  y  $\theta_{PMP}$  indican la humedad a capacidad de contenedor y en el punto de marchitez permanente, respectivamente. Alajuela, Costa Rica. 2016.

tres repeticiones y se asumió que las  $\theta$  a 1 kPa y a 10 kPa correspondieron a la capacidad de contenedor ( $\theta_{cc}$ ) y al punto de marchitez permanente ( $\theta_{PMP}$ ),

respectivamente. La capacidad de aireación (%) del sustrato en cada  $\psi_m$  se obtuvo como la diferencia entre la Pt y el porcentaje de  $\theta$  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  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{5kPa}$ , mientras que el %AR correspondió a la diferencia entre  $\theta_{5kPa}$  y  $\theta_{PMP}$ . La fibra de coco presentó una  $\theta_{CC}$  de 57,4% (1kPa) y una  $\theta_{PMP}$  de 30,86% (10 kPa), para un 26,54% de ATD. El AFD, almacenada entre  $\theta_{CC}$  y  $\theta_{5kPa}$ , fue de 22,23% (Figura 2).

Se evaluaron seis tratamientos combinando dos densidades de siembra (D) y tres 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). La fibra de coco se colocó en bolsas plásticas de color blanco de ocho milésimas de espesor. En cada tratamiento, se mantuvo una relación constante de 1:1 entre el ancho y el alto de la bolsa llena con sustrato, 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 cada uno de los seis tratamientos, según el diseño

**Tabla 2.** Descripción de tratamientos utilizados según densidad de siembra y volumen de sustrato para el cultivo de chile dulce (*Capsicum annuum*), hidropónico bajo invernadero. Alajuela, Costa Rica. 2016.

Código de tratamiento	Densidad de plantas		Volumen de sustrato por planta (l)	Distancia (m) entre	
	ha	$m^2$		Hileras	Plantas
D <sub>1'4</sub> V <sub>7</sub>		1,4	7	1,55	0,45
D <sub>1'4</sub> V <sub>14</sub>	14 000	1,4	14	1,55	0,45
D <sub>1'4</sub> V <sub>21</sub>		1,4	21	1,55	0,45
D <sub>2'4</sub> V <sub>7</sub>		2,4	7	1,55	0,27
D <sub>2'4</sub> V <sub>14</sub>	24 000	2,4	14	1,55	0,27
D <sub>2'4</sub> V <sub>21</sub>		2,4	21	1,55	0,27

experimental de tres bloques completos al azar, con un arreglo bifactorial que combinó las dos densidades de siembra y los tres volúmenes de sustrato por planta, para un total de 18 unidades experimentales (UE). En los tratamientos de menor densidad, la UE estaba conformada por tres hileras de nueve

plantas, para un total de 27 plantas; mientras que en los tratamientos de mayor densidad, estaban compuestos por tres hileras de 13 plantas, para un total de 39 plantas. La unidad de muestreo constó de siete plantas ubicadas en el centro de la hilera central de cada UE, utilizando como borde las dos hileras

**Tabla 3.** Concentración de nutrientes en la solución nutritiva utilizada, según etapa fenológica del cultivo de chile dulce (*Capsicum annuum*), hidropónico bajo invernadero. Alajuela, Costa Rica. 2016.

Etapa fenológica	Duración (semanas)	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

externas y las plantas ubicadas en los extremos de la hilera central. Adicionalmente, se colocó una hilera extra contiguo a la pared del invernadero, para amortiguar el efecto de borde.

Se trasplantó una plántula de chile dulce por bolsa en cada tratamiento, los cuales tenían un

sistema de riego independiente con un gotero ( $3 L h^{-1}$ ) antidrenante y autocompensado (NAANDANJAIN<sup>®</sup>) para cada planta  $bolsa^{-1}$ . Cada gotero constaba de un difusor de cuatro 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 espacio (3 cm) alrededor de la base del tallo de la planta.

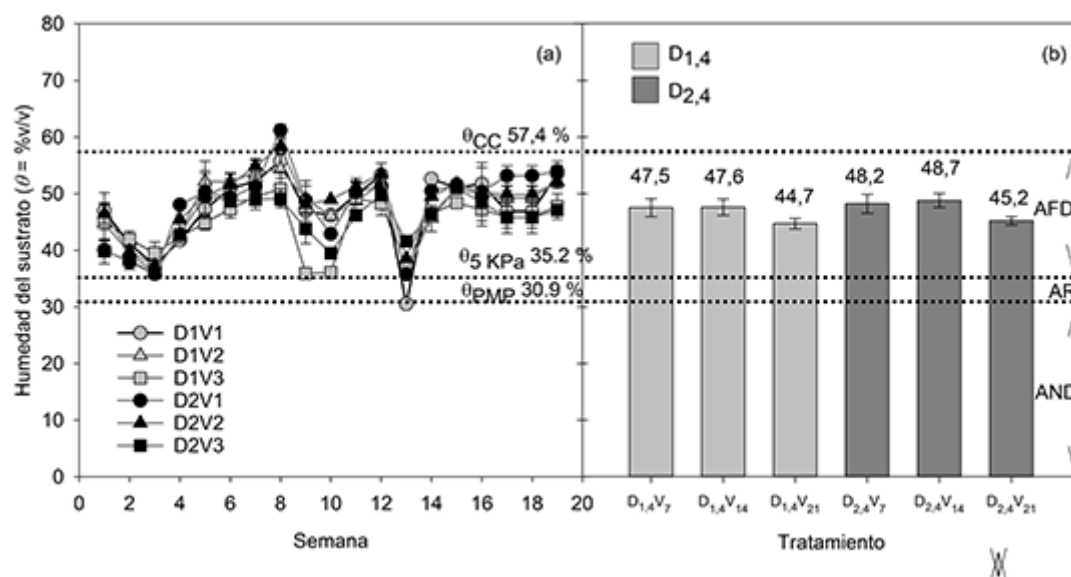
La nutrición mineral se inició un día después del trasplante, utilizando una solución nutritiva según etapa del cultivo (Tabla 3). El pH de la solución nutritiva fue ajustado a 5,7 con ácido nítrico (56% v v<sup>-1</sup>, 167 g L<sup>-1</sup>) según la concentración de bicarbonatos en el agua de riego (77 mg L<sup>-1</sup>). Las concentraciones de nutrientes en el agua de riego (6,2 de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 0,3 de P, 3,7 de K, 12,6 de Ca, 6,2 de Mg y 1,6 mg L<sup>-1</sup> de S) fueron consideradas dentro de los aportes en la solución nutritiva. El pH y la conductividad eléctrica (CE) del agua fueron 7,5 de 0,2 Ms cm<sup>-1</sup>, respectivamente. El manejo fitosanitario se realizó mediante aplicaciones semanales preventivas de productos biológicos (*Beauveria* + *Metarrhizium* + *Lecanicillium* + *Isaria fumosorosea*). Todas las semanas se monitoreaba la incidencia de insectos

y patógenos y se realizaban aplicaciones de productos químicos según el umbral de plaga.

El tutorado de las plantas se realizó con cuerda 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 se realizó una deshoja sanitaria a los 105 días después del trasplante.

El riego fue manejado de forma independiente en cada tratamiento, con el objetivo de mantener el porcentaje de  $\theta$  dentro del rango de AFD en el sustrato, comprendido entre  $\theta_{CC}$  (57,4%) y  $\theta_{5kPa}$  (35,2%) (Figura 2).

El volumen de agua en cada riego, se estimó



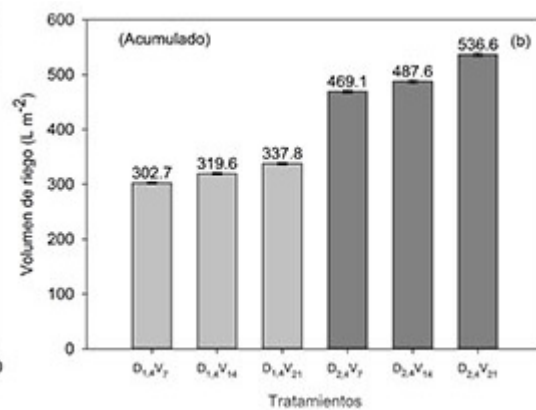
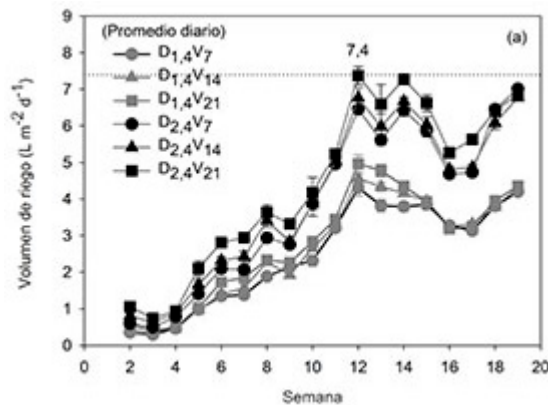
**Figura 2.** Contenido de humedad (%v/v) en el sustrato según tratamiento: (a) evolución semanal del promedio de riego diario (símbolos) y (b) promedios en el ciclo de cultivo de chile dulce (*Capsicum annuum*) hidropónico bajo invernadero (barras). Alajuela, Costa Rica. 2016. Las siglas  $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{5kPa}$ ,  $\theta_{PMP}$  indican la humedad a capacidad de contenedor, a potencial mátrico de 5 kPa y en punto de marchitez permanente, respectivamente; AFD, AR y AND indican los rangos de agua fácilmente disponible, agua de reserva y agua no disponible, correspondientemente.

en función de *i*- un valor máximo de agotamiento preestablecido (20%) del agua total disponible en el sustrato (Figura 1), *ii*- del volumen de sustrato por planta/bolsa según tratamiento (Tabla 2) y *iii*- de un porcentaje de drenaje mínimo preestablecido de 15%, con base en que la CE del agua de riego fue baja (0,2

mS cm<sup>-1</sup>). Una vez determinado el volumen de agua a aplicar por planta/bolsa según tratamiento, se calculó el tiempo de riego a partir del número y caudal promedio de los goteros/planta/bolsa. El caudal promedio fue obtenido mediante la determinación del coeficiente de uniformidad (CHRISTIANSEN, 1942)

del sistema de riego (>94%). El riego se programó con un "timer" (TORO® mod TMC 212), que controlaba una válvula solenoide (NAANDANJAIN® mod S390 2WR) para cada tratamiento. La frecuencia de riego en cada tratamiento fue ajustada continuamente en función del volumen de drenaje y la  $\theta$  en el sustrato. El volumen de riego diario aplicado (R) por tratamiento (Figura 3) se estimó en función del tiempo total de riego por día y del caudal promedio de los goteros.

Para el cálculo de los  $K_c$  se siguió el



**Figura 3.** Volúmenes de riego por tratamiento: (a) evolución semanal del promedio de riego diario (símbolos) y (b) promedios en el ciclo de cultivo de chile dulce (*Capsicum annuum*), hidropónico bajo invernadero (barras). Alajuela, Costa Rica. 2016.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (2)$$

La  $ET_c$  para cada tratamiento y repetición se determinó para periodos semanales, mediante el método lisimétrico de balance de agua en el sustrato, a partir de los volúmenes 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 ( $\theta_i$ ) y al final ( $\theta_f$ ) de cada semana. El volumen drenado y la  $\theta$  se midieron diariamente a las 6 a.m. antes del inicio del primer riego.

$$ET_c = R - D \pm \Delta\theta \quad (3)$$

El lisímetro, consistió en una bandeja de madera (1 m x 0,3 m x 0,05 m) impermeabilizada con plástico negro (230  $\mu$ m), con una pendiente de 1% y un agujero en el extremo inferior para recolectar el agua drenada. En cada bandeja se colocaron cuatro plantas en sus respectivas bolsas de cultivo perforadas en la base, para facilitar la evacuación del exceso de agua. La bandeja se cubrió con plástico plata/negro para evitar la evaporación del agua drenada desde los bordes.

procedimiento FAO-56 (ALLEN et al., 1998), que calcula la  $ET_c$  como el producto de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) por el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ).

$$ET_c = ET_o * K_c \quad (1)$$

A partir de la ecuación 1, se estimaron los  $K_c$  en las diferentes semanas, como el cociente valores de  $ET_c$  y de  $ET_o$ .

El contenido de humedad volumétrica en el sustrato ( $\theta = \%v/v$ ) se midió con un sensor de capacitancia "TDR" (Time Domain Reflectometry, Decagon Devices® mod. GS3) conectado a un "datalogger" (Decagon Devices® ProCheck). La medición de  $\theta$  se realizó en 3 puntos en la parte media del perfil del sustrato, en cada una de las 4 bolsas ubicadas en la bandeja de drenaje, y se utilizó el valor promedio de las 12 mediciones por repetición.

La evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) fue estimada utilizando el método Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN et al., 2006).

$$ET_o = \frac{\left[\frac{\lambda}{\lambda}\right] \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1+0,34 u_2)} \quad (4)$$

donde:  $ET_o$  es la evapotranspiración de referencia (mm/día),  $\lambda$  es el calor latente de vaporización para convertir el componente de radiación en la  $ET_o$  de  $MJ/m^2/día$  a  $mm/día$ ,  $R_n$  es la radiación neta ( $MJ m^{-2} día^{-1}$ ),  $G$  es el flujo de calor en el suelo ( $MJ m^{-2} día^{-1}$ ),  $T$  es la temperatura promedio del aire ( $^{\circ}C$ ),  $\Delta$  es la pendiente de la curva de presión a saturación

(kPa °C<sup>-1</sup>),  $\gamma$  es la constante psicométrica (kPa °C<sup>-1</sup>), es la presión de saturación del vapor (kPa),  $e_a$  es la presión de vapor promedio diaria (kPa) y  $u_2$  es la velocidad promedio del viento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>).

Adicionalmente, para efectos de comparación, en este estudio se utilizaron valores de referencia de  $K_c$  único ( $K_{cu}$ ) y  $K_c$  basal ( $K_{cb}$ ) de los Tablas 12 y 17, respectivamente, del manual FAO-56 (Allen et al., 2006). Para los  $K_{cu}$  inicial ( $K_{cui}$ ) y  $K_{cb}$  inicial ( $K_{cbi}$ ) se utilizaron valores de referencia  $K_{cui} = 0,6$  y  $K_{cbi} = 0,15$  de los Tablas 12 y 17, respectivamente, para el grupo de solanáceas, siguiendo la recomendación de que cuando no aparece el  $K_c$  del cultivo se utiliza el  $K_c$  del grupo de cultivos. Para los valores de  $K_c$  en la etapa media de crecimiento de los cultivos de chile dulce ( $K_{cm}$ ), se utilizó un  $K_{cum}$  de 1,15 y un  $K_{cbm}$  de 1,10, de acuerdo a las recomendaciones del manual FAO-56, considerando que fue un cultivo entutorado con una altura promedio de 2,0 m.

Para efectos de comparación, los valores de  $K_{cu}$  y  $K_{cb}$  de la etapa media ( $K_{cum}$  y  $K_{cbm}$ ) y de la etapa final de crecimiento ( $K_{cuf}$  y  $K_{cbf}$ ) de los Tablas 12 y 17 del manual FAO-56, fueron corregidos ( $K_{cum-c'}$ ,  $K_{cbm-c'}$ ,  $K_{cuf-c}$  y  $K_{cbf-c}$ ) de acuerdo a la altura promedio de los cultivos (2 m), velocidad de viento y humedad relativa según ALLEN et al. (2006):

$$K_{cu} \text{ y } K_{cb} = K_{cm} + [0,04 (U_2 - 2) - 0,04 (HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (5)$$

donde,  $K_{cm}$  es valor de  $K_c$  de la etapa media o final obtenido en los Tablas 12 o 17 del manual FAO-56,  $u_2$  es el valor medio diario de la velocidad del viento a 2 m de altura sobre el pasto para la etapa media del cultivo [m/s] con  $1 \text{ m s}^{-1} \leq u_2 \leq 6 \text{ m/s}$ ,  $HR_{min}$  valor medio diario de humedad relativa mínima durante la etapa media del cultivo [%] con  $20\% \leq HR_{min} \leq 80\%$ ,  $h$  altura media de las plantas (m) durante la etapa media del cultivo con  $0,1 \text{ m} < h < 10 \text{ m}$ .

Los  $K_c$  obtenidos en chile dulce según densidad de siembra y volumen de sustrato, que cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, fueron sometidos a un análisis de varianza, para determinar si hubo interacción o efectos independientes, de ambos factores. Cuando no hubo interacción ( $P > 0,05$ ), se analizaron los efectos principales, y se agruparon los datos por nivel del factor o de ambos factores, que fueron estadísticamente significativos ( $P < 0,05$ ). Para el análisis de la información se utilizó un modelo de

Análisis de Varianza para bloques completos al azar según DI RIENZO et al. (2012):

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \gamma_k + \epsilon_{ijk}, \text{ con } i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

dónde;  $Y_{ijk}$  = variable de respuesta medida en la  $ijk$ -ésima unidad experimental,  $\mu$  = media general,  $\alpha_i$  = efecto del  $i$ -ésimo nivel del factor densidad de siembra,  $\beta_j$  = 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,  $\gamma_k$  = efecto del  $k$ -ésimo bloque y  $\epsilon_{ijk}$  = error experimental asociado al  $ijk$ -ésimo valor medido en la  $ijk$ -ésima unidad experimental.

## Resultados y discusión

En el presente estudio, la  $ET_c$  y los  $K_c$  no mostraron tendencias diferentes en la evolución semanal de los promedios diarios entre ambas densidades de siembra conforme incrementó el volumen de sustrato, debido a la ausencia de interacción entre dichos factores ( $P > 0,05$ ). Sin embargo, dichas variables fueron afectadas de forma independiente por ambos factores ( $P < 0,05$ ), con el mayor efecto debido al factor densidad.

Puesto que los  $K_c$  se obtuvieron a partir de la relación  $ET_c/ET_o$  y la  $ET_o$  fue la misma para todos los tratamientos, todos los factores que afectaron la  $ET_c$  se reflejaron directamente en el comportamiento de los  $K_c$  en las diferentes semanas. En la Figura 4, se observa que los valores semanales del DPV, la  $R_s$  y la  $U_z$ , mostraron una tendencia semejante al patrón de comportamiento de los valores de la  $ET_o$ . La  $ET_o$  alcanzó valores más altos en las primeras cuatro semanas con un promedio de  $3,5 \text{ L m}^{-2}$ , coincidente con la época de verano (Figura 4). Posteriormente, disminuyó hasta la semana 7 correspondiente a la época de transición verano-invierno; y se mantuvo una tendencia hacia la estabilidad en el resto del ciclo durante el invierno, con un promedio de  $2,7 \text{ L m}^{-2}$ .

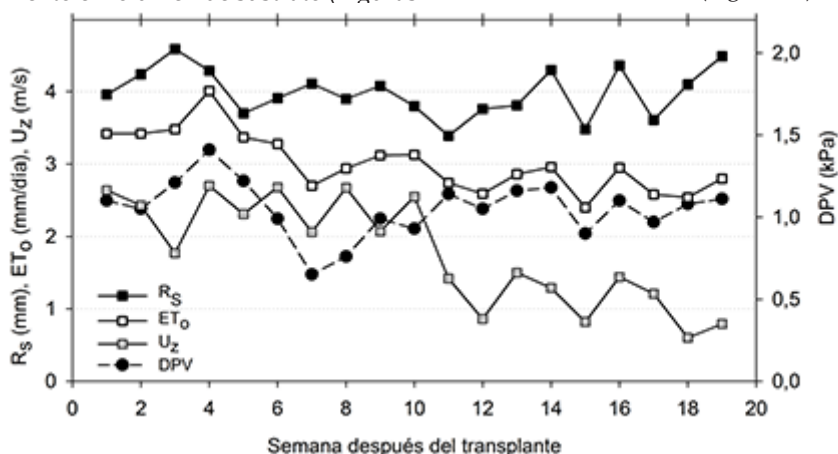
La evolución semanal de los promedios diarios de  $ET_o$  y de  $ET_c$  (5a, 5b) y de los  $K_c$  (5c, 5d), según densidad de siembra y volumen de sustrato en chile dulce bajo invernadero, evidencian el efecto de la  $ET_c$  sobre la relación  $ET_c/ET_o$  y los consecuentes valores de  $K_c$ . Así, a mayores valores de  $ET_c$  incrementa los  $K_c$  y viceversa, ya que en las diferentes semanas la  $ET_o$  fue igual en todas las densidades de



siembra y volúmenes de sustrato, mientras que la  $ET_c$  varió en función del nivel de ambos factores.

Los valores de  $ET_c$  y  $K_c$  incrementaron, en mayor magnitud conforme aumentó la densidad de siembra (Figuras 5a y 5c) y en menor magnitud conforme aumentó el volumen de sustrato (Figuras

5b y 5d). Considerando los promedios de  $ET_c$  y  $K_c$  de todo el ciclo, indistintamente del volumen de sustrato, estos disminuyeron 36% y 33%, respectivamente, al pasar de un cultivo con 2,4 plantas  $m^{-2}$  a otro con 1,4 plantas  $m^{-2}$ . Al considerar el volumen de sustrato (Figura 5b) independientemente de

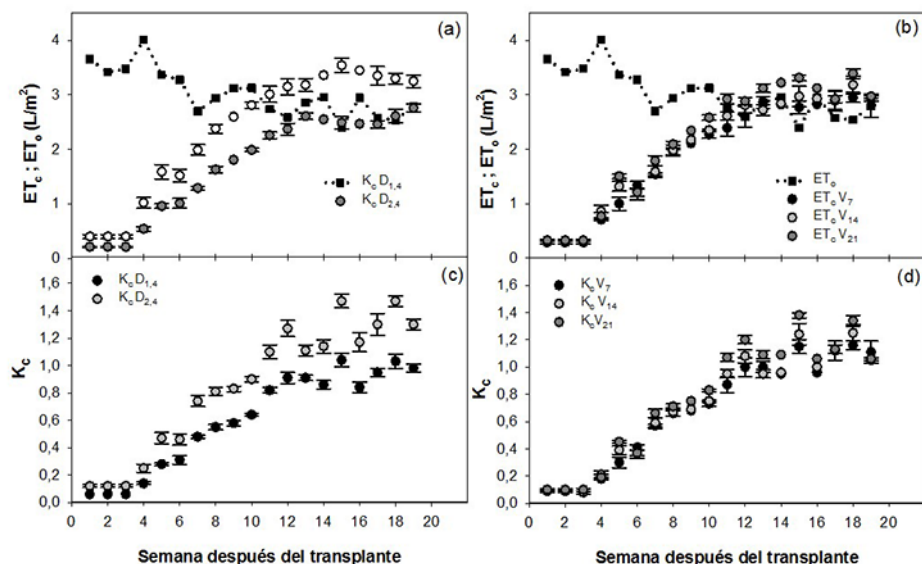


**Figura 4.** Evolución semanal de la integral de radiación solar ( $R_S$ ), evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ), velocidad de viento ( $U_z$ ) y déficit de presión de vapor (DPV), durante el ciclo del cultivo de chile dulce "Dulcítico" (*Capsicum annuum*), hidropónico en invernadero. Alajuela, Costa Rica. 2016.

la densidad de plantación, tanto la  $ET_c$  como los  $K_c$  mostraron pequeñas diferencias entre los volúmenes de 7 L y 14 L; sin embargo, el efecto se incrementó al aumentar el volumen a 21 L de sustrato planta<sup>-1</sup>. Los promedios estacionales de  $ET_c$  y de  $K_c$  incrementaron

en una proporción similar (11,5%) al pasar de un cultivo con 7 L de sustrato a otro con 21 L.

Al analizar el comportamiento de los valores de  $ET_c$  y de  $K_c$  durante el ciclo de cultivo independientemente de la densidad de siembra



**Figura 5.** Promedio diario semanal de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) y la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ) (a, b), y de los coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) (c, d), de chile dulce (*Capsicum annuum*) hidropónico bajo invernadero según densidad de siembra ( $D_{1,4}$ ,  $D_{2,4}$ ) y volumen de sustrato ( $V_7$ ,  $V_{14}$ ,  $V_{21}$ ). Alajuela, Costa Rica. 2016.

y del volumen de sustrato, en general dichos valores fueron bajos en las primeras tres semanas, incrementaron linealmente ( $R^2= 0,97$ ) durante la etapa de desarrollo (semanas 4 a 12), y mostraron una ligera tendencia hacia la estabilidad por el resto del ciclo (semanas 12 a 19). En este periodo, en la semana 15 se presentaron los valores máximos de  $ET_c$  y consecuentemente de  $K_c$ , en ambas densidades y en los tres volúmenes de sustrato (Figura 5c, 5d). Los valores más elevados de  $ET_c$  y  $K_c$  fueron, en el mismo orden: 2,6 L m<sup>-2</sup> y 1,04 en la densidad de 1,4 plantas m<sup>-2</sup>, y 3,5 L m<sup>-2</sup> y 1,47 a 2,4 plantas m<sup>-2</sup>. En relación al sustrato, los mayores valores de  $ET_c$  y  $K_c$  fueron, respectivamente, 2,87 l m<sup>-2</sup> y 1,15 con 7 L de sustrato/planta, 2,97 L m<sup>-2</sup> y 1,27 en 14 L planta<sup>-1</sup> y 3,31 L m<sup>-2</sup> y 1,37 a un volumen de 21 L planta<sup>-1</sup>.

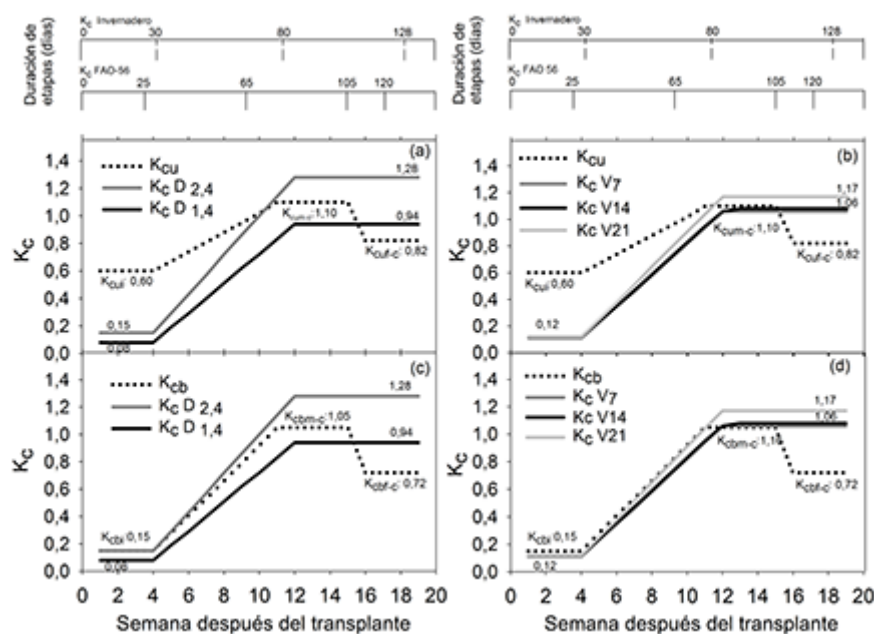
En el periodo de las semanas 12 a 19, la tendencia hacia la estabilización en la  $ET_c$  (Figura 5a, 5b) se reflejó en pequeñas variaciones promedios entre semanas de  $\pm 0,1$  y  $\pm 0,3$  L m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup>, según densidad de siembra y volúmenes de sustrato, respectivamente. Dicho comportamiento se reflejó en los valores de  $K_c$  por lo cual en la Figura 6 se presentan valores promedios de  $K_c$  en la etapa inicial (semanas 1 a 4) y en la etapa media (semanas 12 a 19)

de cada cultivo según densidad de siembra (Figuras 6a y 6c) y volumen de sustrato (Figuras 6b y 6d). Los  $K_c$  al final del ciclo no fueron reportados, debido a que a una misma densidad e igual volumen de sustrato, las variaciones entre promedios diarios de  $K_c$  desde las semanas 12 a 19 fueron ligeras, sin una clara tendencia a disminuir los valores de  $K_c$  hacia el final del experimento.

Adicionalmente, para efectos comparativos, se presentan valores de  $K_c$  único ( $K_{cu}$ ) y  $K_c$  basal ( $K_{cb}$ ), en las etapas inicial, media y final del ciclo de cultivo de chile dulce a campo abierto (Figura 6), de los Tablas 12 y 17 del manual FAO-56 (ALLEN et al., 2006).

Al aumentar la densidad de siembra de 1,4 a 2,4 plantas/m<sup>2</sup>, los  $K_c$  ( $K_{c1,4}$  y  $K_{c2,4}$ ) incrementaron un 61%, 37% y 30% en las etapas inicial, en desarrollo y etapa media de cultivo, respectivamente (Figura 6). Por otra parte, al aumentar el volumen de sustrato los mayores aumentos en los  $K_c$  se presentaron al pasar de un cultivo con 7 l de sustrato/planta ( $K_{c7}$ ) a otro con 21 l ( $K_{c21}$ ), con incrementos de 12%, 14% y 10% durante dichas etapas de cultivo, respectivamente.

En relación a los  $K_c$  FAO-56 considerando promedios de todo el ciclo de cultivo, en general los  $K_{cum-c}$  sobreestimaron los  $K_c$  obtenidos en chile dulce



**Figura 6.** Coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) en chile dulce (*Capsicum annuum*) hidropónico bajo invernadero, según densidad de siembra (a, c:  $D_{1,4}$  y  $D_{2,4}$ ) y volumen de sustrato (b, d:  $V_7$ ,  $V_{14}$  y  $V_{21}$ ); y coeficientes único ( $K_{cu}$ ) y basal ( $K_{cb}$ ) en la etapa inicial ( $K_{cui}$ ,  $K_{cbi}$ ), corregidos en las etapas media ( $K_{cum-c}$ ,  $K_{cbm-c}$ ) y final ( $K_{cuf-c}$ ,  $K_{cbf-c}$ ) del cultivo de chile dulce a campo abierto según FAO-56. Alajuela, Costa Rica. 2016.

hidropónico bajo invernadero un 49% a 1,4 plantas  $m^{-2}$ , 15% a 2,4 plantas  $m^{-2}$ , y 41%, 24% y 25% en los volúmenes de 7 L, 14 L y 21 L de sustrato/planta, respectivamente (Figuras 6a y 6b). Aunque de forma similar, los  $K_{cbm-c}$  sobreestimaron los  $K_c$  obtenidos, las diferencias se redujeron apreciablemente, excepto para los cultivos con 2,4 plantas  $m^{-2}$  y con 21 L de sustrato/planta, que fueron 19% y 9% superiores al  $K_{cbm-c}$  FAO-56, respectivamente (Figuras 6c y 6d).

Al analizar los  $K_c$  FAO-56 por etapas de cultivo, la mayor sobreestimación de los  $K_c$  obtenidos en chile dulce bajo invernadero se presentó en las etapas de inicio y de desarrollo (Figuras 6a y 6b), donde los  $K_{cui}$  fueron superiores hasta un 100% a los  $K_c$  obtenidos a 1,4 plantas  $m^{-2}$  y 87% en el tratamiento con un volumen de 7 L planta $^{-1}$ . Durante la etapa media de los cultivos, los valores de  $K_{cum-c}$  y  $K_{cbm-c}$  mostraron mayores diferencias respecto a los  $K_c$  obtenidos según el factor densidad (Figura 6a, 6c) y menores debido al factor volumen (Figura 6b, 6d). En relación al factor densidad, los valores de  $K_{cum-c}$  y  $K_{cbm-c}$  FAO-56 fueron inferiores al cultivo de mayor densidad y superiores al cultivo de menor densidad. Respecto al volumen de sustrato, dichos  $K_c$  únicamente fueron inferiores al tratamiento con 21 L sustrato/planta, siendo similares a los  $K_c$  en los cultivos con 7 y 14 L de sustrato/planta.

En este estudio, por primera vez se reportan valores de  $K_c$  para el primer híbrido nacional "Dulcítico" de chile dulce, en respuesta al volumen de sustrato y a la densidad de plantas, bajo un manejo hidropónico y en invernadero, con el empleo de valores de  $ET_c$  obtenidos directamente por método lisimétrico, y de  $ET_o$  estimada por el método Penman-Monteith FAO-56 con datos de clima del interior del invernadero. Según la relación  $ET_c/ET_o$ , las variaciones de la  $ET_c$  entre semanas al modificar la densidad de plantas y el volumen de sustrato, se reflejaron directamente en los valores de  $K_c$ . Mientras la  $ET_o$  fue la misma para todos los tratamientos, la  $ET_c$  semanal varió en función de la arquitectura y características morfo-fisiológicas del dosel vegetal como consecuencia de la densidad de siembra y el volumen de sustrato. Los resultados obtenidos evidencian la importancia de determinar  $K_c$  que consideren diferentes aspectos del cultivo; de lo contrario se puede incurrir en aportes deficitarios o excesivos de agua.

El marcado efecto de la densidad de siembra sobre la  $ET_c$  y consecuentemente sobre los  $K_c$ , probablemente estuvo relacionado con una mayor transpiración en el cultivo a 2,4 plantas  $m^{-2}$ .

Diferentes estudios (TAIZ y ZEIGER 2006; QIU et al., 2013; DI-BENEDETTO and TOGNETTI, 2016; AMINIFARD et al., 2010) han demostrado que al aumentar la densidad de plantas incrementa la tasa de transpiración debido al aumento del área foliar (AF) y del número de hojas por unidad de superficie. En chile dulce bajo túneles de plástico, JOLLIFFE y GAYE (1995) encontraron que el IAF incrementó desde 1,5  $m^2 m^{-2}$  hasta 4  $m^2 m^{-2}$  al aumentar la densidad de 1,4 plantas  $m^{-2}$  a 11 plantas  $m^{-2}$ . Por otra parte, SILVA et al. (2010) determinaron que el efecto de la densidad de plantación sobre el IAF del cultivo de chile dulce y su consecuente efecto sobre la  $ET_c$  está principalmente determinado por la distancia entre plantas cuando la distancia entre hileras es superior a 1,5 m, ya que se anula el efecto de la competencia entre hileras.

En el presente estudio los valores de  $ET_c$  y  $K_c$  incrementaron conforme aumentó el volumen de sustrato, probablemente relacionado con el hecho de que a mayor volumen de sustrato aumenta el contenido de agua total disponible (ATD) por planta (HURLEY et al., 1998), lo cual favorece un mayor crecimiento del cultivo (LUO et al., 2015). Al respecto, diferentes estudios han demostrado que a mayor volumen de sustrato incrementa la transpiración debido al aumento del AF, el número y tamaño de la hoja y mayor respuesta estomática (KHARKINA et al., 1999; ISMAIL et al., 2002), lo cual probablemente está asociado a un mayor volumen de ATD por planta.

En este estudio, independiente de la densidad, el ATD incrementó apreciablemente un 149% al pasar de un volumen de 7 L a 21 L de sustrato (datos no presentados), lo cual según LUO et al. (2015) favorece el crecimiento del cultivo, un mayor consumo de agua y consecuentemente un aumento del  $K_c$ . Según MORENO-RESÉNDEZ et al. (2015) una reducción del volumen de sustrato disminuye la disponibilidad de oxígeno, agua y nutrientes para la planta, limitando el crecimiento radical y consecuentemente el IAF y el tamaño y número de hojas. En un cultivo de chile hidropónico bajo invernadero, BAR-TAL et al. (1995) demostraron que el aumento del volumen de sustrato favorece el crecimiento radical y el AF, y consecuentemente la transpiración. Además, probablemente un mayor contenido de ATD por planta favoreció la morfología radicular, ya que según MORAL et al. (2014) se promueve una mayor longitud radicular con menor diámetro de raíces, lo cual es un indicador de una formación más eficiente de pelos radiculares, lo que da a la planta mayor capacidad

de absorción de agua y nutrientes y por tanto mayor crecimiento foliar. En cultivo de chile dulce bajo invernadero, FERNÁNDEZ et al. (2005) demostraron que la  $ET_c$  incrementó al aumentar el volumen de ATD por planta mediante aportes crecientes de riego.

En relación a los  $K_c$  FAO-56, se demostró que en general los  $K_{cu}$  sobreestimaron los  $K_c$  obtenidos en chile dulce hidropónico bajo invernadero, mientras que en el caso de los  $K_{cb}$  las diferencias se redujeron apreciablemente, excepto en los cultivos con mayores densidades y volúmenes de sustrato ( $K_{c2,4}$ ,  $K_{c21L}$ ). Existen diferentes aspectos que explican las diferencias entre los  $K_c$  de FAO-56 y los  $K_c$  obtenidos en el cultivo hidropónico bajo invernadero. Los  $K_c$  FAO-56, fueron generados para el cultivo en suelo a campo abierto, sin embargo, han sido usados indiscriminadamente, sin considerar la variabilidad en las condiciones específicas del cultivo en las diferentes regiones. Existen diferencias apreciables en clima, materiales genéticos y en las prácticas de cultivo, que demanda el cultivo hidropónico bajo invernadero en comparación al cultivo en suelo y a campo abierto.

Aunque el  $K_c$  considera las características morfo-fisiológicas del cultivo, estas cambian producto de la interacción entre genotipo, técnica de cultivo, clima y manejo agronómico. Por tanto, la  $ET_c$  y consecuentemente los  $K_c$  varían según la técnica de producción, el genotipo, el clima y las prácticas de manejo agronómico, ya que estas determinan las características morfológicas y fisiológicas de las plantas, tales como altura y arquitectura de la planta, distribución del dosel vegetal, número y tamaño de hojas y la densidad estomática, entre otros.

El clima en invernadero respecto a campo abierto, presenta una apreciable reducción en radiación solar y velocidad de viento (FERNÁNDEZ et al., 2007), lo cual consecuentemente disminuyó la  $ET_c$  y consiguientemente los  $K_c$  del cultivo de chile dulce hidropónico bajo invernadero.

En cultivos en invernadero, en general se utilizan cultivares de hábito de crecimiento indeterminado, que permiten ciclos de cultivo más largos, comparado con materiales de crecimiento determinado a campo abierto. El híbrido de chile dulce "Dulcítico" tiene un hábito de crecimiento indeterminado que le permite extender su ciclo de producción por largos periodos (ECHANDI, 2012). Esto se evidenció en el comportamiento de la altura de las plantas (datos no presentados), que no fue afectada por la interacción ( $P>0,05$ ) ni de forma independiente, por ambos factores.

Independientemente de la densidad de siembra y del volumen de sustrato, la altura mostró una tendencia a incrementar linealmente desde la semana 1 (10,4 cm) hasta alcanzar una altura promedio de todos los tratamientos de 227 cm al final del cultivo.

Una mayor altura de las plantas está directamente asociada al consumo hídrico (ALLEN et al. 2006), ya que está relacionada con la resistencia aerodinámica y los flujos turbulentos del cultivo. Al respecto, ALLEN Y PEREIRA (2009) plantearon la determinación de un coeficiente de densidad ( $K_d$ ), que describe el incremento del  $K_c$  con el aumento de la altura (h) del cultivo, debido al incremento del índice de área foliar (IAF) y consecuentemente la cantidad de radiación solar interceptada. La forma de la curva  $K_d$  es curvilínea con el IAF o fracción de cobertura del suelo, debido a los efectos de la microadvección de la energía convectiva y radiativa del suelo expuesto y la altura de la vegetación. Los autores plantean que a medida que aumenta la h, habrá mayor microadvección y radiación de calor desde el suelo hacia el dosel vegetal, que a su vez aumenta el intercambio turbulento dentro del dosel, para la misma cantidad de suelo cubierto, lo cual consecuentemente aumenta la magnitud relativa de  $K_{cb}$  o  $K_c$ .

El comportamiento de crecimiento indeterminado explica porque a partir de la semana 12, se presentó una tendencia hacia la estabilización de los valores de  $ET_c$  y consecuentemente en los  $K_c$ , sin una clara tendencia a disminuir los  $K_c$  hacia el final del experimento. Una vez que los cultivos alcanzaron el máximo desarrollo, el  $K_c$  se mantuvo ligeramente constante durante el resto del ciclo, debido a que los cultivos finalizaron en óptimas condiciones fitosanitarias, de crecimiento, floración, fructificación y llenado de frutos, y antes de que la senescencia provocara una disminución del  $K_c$ , lo que probablemente podría haber permitido un ciclo de cultivo más largo.

Otra diferencia apreciable entre los valores de  $K_c$  FAO-56 y  $K_c$  obtenidos en chile dulce es la duración de las etapas de cultivo. En el método FAO-56 la duración de las etapas de cultivo para los distintos valores de  $K_c$  son fijas y obtenidas en condiciones específicas, sin considerar que la duración del ciclo de los cultivos varía entre regiones, época climática, genotipo y manejo agronómico del cultivo. Al respecto, ORGAZ et al. (2005) demostraron que la duración de etapas de crecimiento de cultivo fijas, no son adecuadas para estimar requerimientos hídricos en cultivos bajo invernadero. La pendiente de la curva de  $K_c$  depende de la tasa de crecimiento del cultivo durante la etapa de desarrollo, que es afectada directamente

por la temperatura del aire (ALLEN et al., 2006). Se ha demostrado que los valores de  $K_c$  para cultivos bajo invernadero fueron superiores a los del cultivo al aire libre, debido a las prácticas de cultivo, tales como entutorado, deshojas, podas, densidad de siembra, riego y nutrición, y a la disminución de la radiación solar y la velocidad del viento en el interior del invernadero (ORGAZ et al. 2005). En cultivo de chile dulce bajo invernadero, FERNÁNDEZ et al. (2001), ORGAZ et al. (2005) y SHARMA et al. (2017), obtuvieron valores de  $K_c$  máximos de 1,3 a 1,4, similares a los obtenidos en este estudio a 2,4 plantas/m<sup>2</sup> y superiores a los  $K_c$  FAO-56 para cultivos en campo abierto.

En la presente investigación, durante las etapas de inicio y desarrollo de los cultivos, los  $K_{cum-c}$  FAO-56 fueron sustancialmente superiores a los  $K_c$  obtenidos en chile dulce, mientras que las diferencias fueron mínimas en el caso de los  $K_{cbm-c}$ . Esto se debe a que los valores de  $K_c$  FAO-56 no consideran el efecto reductor de la evaporación y la transpiración, debido a diferentes factores tales como el sistema de cultivo (campo abierto, invernadero, en suelo o sin suelo), el genotipo y las prácticas de cultivo (podas, tutorado, deshojas, etc.). En cultivo en suelo la  $ET_c$  y consecuentemente los  $K_c$  considera la transpiración y la evaporación desde la superficie húmeda y expuesta del suelo ( $f_w$ ) en un suelo sin cobertura artificial (ALLEN et al., 2006). Por el contrario, 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) debido a que la superficie húmeda y expuesta del sustrato se reduce sensiblemente al estar cubierto con plástico, donde solo una pequeña área por donde emerge la planta está expuesta a evaporación.

Considerando que en cultivo hidropónico la  $f_w$  se reduce prácticamente a cero debido a que el sustrato está cubierto con plástico, los  $K_{cb}$  FAO-56 corregidos se ajustan mejor al componente de transpiración del  $K_c$  dual, ya que representa las condiciones estándar de una superficie de suelo seca (ALLEN et al., 2006); similar a lo que ocurre en cultivo hidropónico con un sustrato cubierto.

Otro aspecto, que podría influir en la  $ET_c$  y el consecuente valor de  $K_c$ , es que el manejo del riego difiere entre cultivos en suelo y en sustrato, debido a que la dinámica del agua en ambos medios de cultivo cambia como consecuencia de las diferencias en características físicas, químicas e hidráulicas. Los sustratos, análogo a un suelo, se componen de aire, agua, y sólidos (fracción orgánica y/o mineral), con la diferencia de que la parte sólida del sustrato es muy inferior, mientras que la fracción de aire y agua es apreciablemente mayor que en el suelo. Estas características distintivas junto a un menor volumen del medio de cultivo hidropónico, hacen que se requieran riegos cortos y más frecuentes, a diferencia del suelo cuyo intervalo de riego puede ser de 1 a varios días dependiendo de la textura.

## Conclusión

La densidad de siembra y el volumen de sustrato afectaron los  $K_c$  del cultivo hidropónico de chile dulce bajo invernadero. El microclima y las prácticas culturales propias del sistema de cultivo en sustrato bajo invernadero, reflejaron marcadas diferencias entre los  $K_c$  FAO-56 a campo abierto y los  $K_c$  obtenidos en las diferentes etapas fenológicas del cultivo de chile dulce en invernadero.

## Referencias

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, Y.M. **Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Estudio FAO N° 56. Riego y drenaje. Roma, Italia. FAO. 2006.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S. **Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height**. *Irrig. Sci.*, v.28, p.17-34, 2009.
- AMINIFARD, M.H.; AROIEE, H.; KARIMPOUR, S.; NEMATI, H. **Growth and yield characteristics of paprika pepper (*Capsicum annum* L.) in response to plant density**. *Asian J. Plant Sci.*, v.9, n.5, p.276-280, 2010.
- MORAL, R.; PICÓ, B.; BARBER, J.X.; MININNI, C.; AGULLÓ, E.; PÉREZ-MURCIA, M.D.; PÉREZ-ESPINOSA, A.; PAREDES, C.; BUSTAMANTE, Y.M.A. **Uso del escaneo de raíces para estimar la calidad de sustratos alternativos a la turba**. En Ansorena, J.; Merino, D. (ed.). Barcelona; ESP. *Actas de Horticultura; XI Jornadas*

- de Sustratos. Sociedad Española de ciencias Hortícolas (SECH). 2014. p.49-54.
- BAR-TAL, A.; FEIGIN, A.; SHEINFELD, S.; ROSENBERG, R.; STERNBAUM, B.; RYLSKI, I.; PRESSMAN, E. **Root restriction and N-NO<sub>3</sub> solution concentration effects on nutrient uptake, transpiration and dry matter production of tomato**. *Sci. Hortic.*, v.63, p. 195-208, 1995.
- CHRISTIANSEN, J.E.. **Irrigation by Sprinkling**. University of California, Berkeley, CA, USA. 1942. Bull. 670.
- DI-BENEDETTO, A.; TOGNETTI, J. **Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos**. *RIA*, v.42, n.3, p. 258-282, 2016.
- DI-RIENZO, J.A.; MACCIAVELLI, R.E.; CASANOVES, F. **Modelos lineales mixtos: aplicaciones en InfoStat**. Universidad de Córdoba, Córdoba, ARG. 2012.
- ELLIOTT, J.; DERYNG, D.; MÜLLER, C.; FRIELER, K.; KONZMANN, M.; GERTEN, D.; GLOTTER, M.; FLÖRKE, M.; WADA, Y.; BEST, N.; EISNER, S.; FEKETE, B.M.; FOLBERTH, C.; FOSTER, I.; GOSLING, S.N.; HADDELAND, I.; KHABAROV, N.; LUDWIG, F.; MASAKI, Y.; OLIN, S.; ROSENZWEIG, C.; RUANE, A.C.; SATOH, Y.; SCHMID, E.; STACKE, T.; TANG, Q.; WISSER, D. **Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change**. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, v.111, p. 3239-3244, 2014.
- FAOSTAT (United Nations Food and Agriculture Organization). *Crops*. FAOSTAT, Rome, ITA. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (consultado el 10/12/2018) 2017.
- FERNÁNDEZ, M.D.; ORGAZ, F.; FERERES, E.; LÓPEZ, J.C.; CÉSPEDES, A.; PÉREZ, J.; BONACHELA, S.; GALLARDO, M. **Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español**. Cajamar (Caja Rural Intermediterránea). Almería, ESP. 2001.
- FERNÁNDEZ, M.D.; BONACHELA, S.; ORGAZ, F.; THOMPSON, R.B.; LÓPEZ, J.C.; GRANADOS, M.R.; GALLARDO, M.; FERERES, E. **Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate**. *Irrig. Sci.*, v.28, p.497-509, 2010.
- FERNÁNDEZ, M.D.; BONACHELA, S.; ORGAZ, F.; THOMPSON, R.B.; LÓPEZ, J.C.; GRANADOS, M.R.; GALLARDO, M.; FERERES, E. **Erratum to: Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate**. *Irrig. Sci.*, v.29, p. 91-92, 2011.
- FERNÁNDEZ, M.D.; GALLARDO, M.; BONACHELA, S.; ORGAZ, F.; THOMPSON, R.B.; FERERES, E. **Water use and production of a greenhouse pepper crop under optimum and limited water supply**. *J. Hort. Sci. Biotechnol.*, v.80, p. 87-96, 2005.
- FERNÁNDEZ, M.D.; GONZÁLEZ, A.M.; CARREÑO, J.; PÉREZ, C.; BONACHELA, S. **Analysis of on-farm irrigation performance in Mediterranean greenhouses**. *Agric. Water Manag.*, v.89, p. 251-260, 2007.
- HURLEY, M.B.; ROWARTH, J.S.; TROUGHT, M.C.T.; BARNES, M.F.; ROWE, R.N. **Variations in water availability and temperature in the root environment during root volume restriction studies**. *N. Z. J. Crop Hortic. Sci.*, v.26, n.2, p.127-134, 1998.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos Agropecuarios). VI Censo nacional agropecuario. San José, CRC. INEC. 45 p. 2015.
- ISMAIL, M.R.; DAVIES, W.J.; AWAD, D.M.H. **Leaf growth and stomatal sensitivity to ABA in droughted pepper plants**. *Sci. Hort.*, v.96, p.313-327, 2002.
- JOLLIFFE, P.A.; GAYE, M.M. **Dynamics of growth and yield component responses of bell peppers (*Capsicum annuum* L.) to row covers and population density**. *Sci. Hortic.*, v.62, n.3, p.153-164, 1995.
- KHARKINA, T.G.; OTTOSEN, C.O.; ROSENQVIST, E. **Effects of root restriction on the growth and physiology of cucumber plants**. *Physiol. Plant.*, v.105, p.434-441, 1999.
- LUO, H.H.; TAO, Y X.P.; HU, Y.; ZHANG, Y.L.; ZHANG, W.F. **Response of cotton root growth and yield to root restriction under various water and nitrogen regimes**. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, v.178, p.384-392, 2015.
- MORENO-RESÉNDEZ, A.; HERNÁNDEZ-GARCÍA, R.; RODRÍGUEZ-DIMAS, N.; REYES-CARRILLO, J.L.; MÁRQUEZ-QUIROZ, C.; PRECIADO-RANGEL, P. **Development of "Serrano" pepper in vermicompost**

- perlite substrates under shade net conditions.** *Emirates J. Food Agric.*, v.27, p.897-902, 2015.
- ORGAZ, F.; FERNÁNDEZ, M.D.; BONACHELA, S.; GALLARDO, M.; FERERES, E. **Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse.** *Agric. Water Manag.*, v.72, p.81-96, 2005.
- QIU, R.; SONG, J.; DU, T.; KANG, S.; TONG, L.; CHEN, R.; WU, L. **Response of evapotranspiration and yield to planting density of solar greenhouse grown tomato in northwest China.** *Agric. Water Manag.*, v.130, p.44-51, 2013.
- ROJAS, J.; PANIAGUA, Y.F. **Comportamiento agronómico de *Capsicum annum* L. *Lycopersicon esculentum* M. y *Cucumis melo* L. bajo cultivo protegido hidropónico utilizando la solución universal de Steiner.** 2015. Tesis Lic., Instituto Tecnológico de Costa Rica, ITCR, San Carlos, CRC.
- SHARMA, H.; SHUKLA, M.K.; BOSLAND, P.W.; STEINER, R. **Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chile peppers.** *Agric. Water Manag.*, v.179, p.81-91, 2017.
- SILVA, P.I.B. da; NEGREIROS, M.Z. de; DE FREITAS, M.K.K.C. de; DE FREITAS, F.C.L. de; SOUSA, N.G.H., de; SILVA, P.S.L. e; GRANGEIRO, E L.C. **Crescimento de pimentão em diferentes arranjos espaciais.** *Pesqu. Agropecu. Bras.*, v.45, n.2, p.32-139, 2010.
- SOTO, F. **Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero.** *Agron. Costarricense*, v.42, n.2, p.59-73, 2018.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology.** 3a edition. Sinauer Associates Inc., Sunderland, MA, USA. 2006.
- TILMAN, D.; CASSMAN, K.G.; MATSON, P.A.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. **Agricultural sustainability and intensive production practices.** *Nature*, v.418, p.671-677, 2002.
- UNE (Una Norma Española) - EN (European Norm) - 13041. **Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación de las propiedades físicas: densidad aparente seca, volumen de aire, volumen de agua, valor de contracción y porosidad total.** Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), Madrid, ESP. 2007.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). **The United Nations World Water Development report. Water and jobs.** Paris, FRA. UNESCO, 2016.