

EFFECTS OF SUBSTRATE MOISTURE CONTENT ON GROWTH AND PHYSIOLOGICAL RESPONSE OF CHILI PEPPER (*Capsicum annuum* L.)

EFFECTO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUSTRATO EN EL CRECIMIENTO Y LA RESPUESTA FISIOLÓGICA DEL CHILE (*Capsicum annuum* L.)

Youping Sun¹, Genhua Niu¹, Pedro Osuna-Avila^{2*}

¹Texas A&M AgriLife Research at El Paso, Texas A&M University System, 1380 A&M Circle, El Paso, TX 79927, USA. ²Universidad Autónoma De Ciudad Juárez, Plutarco Elias Calles # 1210, Fovissste Chamizal. Ciudad Juarez, Chihuahua 32310, Mexico. (posuna@uacj.mx).

ABSTRACT

Crops in semiarid ecosystems have to deal with adverse environmental factors such as water shortage. Therefore, the objective of this experiment was to evaluate growth and physiological responses of three chili pepper cultivars (*Capsicum annuum* 'CM-334', 'Jalapeño M', and 'NuMex Heritage 6-4') under controlled drought conditions in a greenhouse. We speculated that 'CM-334', a selection from wild population, would be more tolerant to drought condition than 'Jalapeño M' and 'NuMex Heritage 6-4'. The plants were irrigated at one of the four substrates volumetric water content (VWC) set points: 0.15 L·L⁻¹ (15 %), 0.25 L·L⁻¹ (25 %), 0.35 L·L⁻¹ (35 %), and 0.45 L·L⁻¹ (45 %) using a sensor based automated irrigation system. The experimental design was randomized complete block with three chili pepper cultivars, four VWC levels, two blocks (replicate), and four plants in each block. Two-way analysis of variance were used for data analysis, and Tukey's honest significant difference (HSD) was applied ($p \leq 0.05$). As VWC decreased from 45 to 15 %, height, stem diameter, fruit fresh weight (wt.), leaf, stem, root and total dry wt of all three cultivars decreased, but the reductions varied according to cultivar. Growth reduction was smallest in 'NuMex Heritage 6-4', followed by 'CM-334' and 'Jalapeño M' when compared VWC of 45 with 15 %. As VWC decreased, leaf net photosynthesis (Pn), transpiration (E), and stomatal conductance (gs) of 'CM-334' and 'Jalapeño M' decreased; however, those of 'NuMex Heritage 6-4' did not change. In addition, VWC did not impact the chlorophyll fluorescence (Fv/Fm), regardless of cultivar. Based on the growth and physiological responses to four VWCs, we conclude that 'NuMex Heritage 6-4' was

RESUMEN

Los cultivos en ecosistemas semiáridos tienen que enfrentarse a factores ambientales adversos, como la escasez de agua. Por lo tanto, el objetivo de este experimento fue evaluar el crecimiento y las respuestas fisiológicas de tres cultivares de chile (*Capsicum annuum* "CM-334", "Jalapeño M" y "NuMex Heritage 6-4") en condiciones de sequía controlada en un invernadero. Nosotros especulamos que "CM-334", una selección de la población silvestre, sería más tolerante a la condición de sequía que el "Jalapeño M" y "NuMex Heritage 6-4". Las plantas se regaron en uno de los cuatro puntos de ajuste del contenido volumétrico de agua (VWC): 0.15 L·L⁻¹ (15%), 0.25 L·L⁻¹ (25%), 0.35 L·L⁻¹ (35%), y 0.45 L·L⁻¹ (45%) utilizando un sistema de riego automatizado basado en sensores. El diseño experimental fue un bloque completo al azar con tres cultivares de chile, cuatro niveles de VWC, dos bloques (replicados) y cuatro plantas en cada bloque. Para el análisis de los datos se utilizó el análisis de varianza de dos vías y se aplicó la diferencia significativa honesta (HSD) de Tukey ($p \leq 0.05$). A medida que el VWC disminuyó de 45 a 15 %, la altura, el diámetro del tallo, el peso fresco de la fruta (peso), la hoja, el tallo, la raíz y el peso total seco de los tres cultivares disminuyeron, pero las reducciones variaron según el cultivar. La reducción del crecimiento fue menor en "NuMex Heritage 6-4", seguido de "CM-334" y "Jalapeño M" cuando se comparó el VWC de 45 % con un 15 %. Al reducir el VWC, la fotosíntesis neta de la hoja (Pn), la transpiración (E) y la conductancia estomática (g) de "CM-334" y "Jalapeño M" disminuyeron; sin embargo, los de "NuMex Heritage 6-4" no cambiaron. Además, el VWC no afectó la fluorescencia de la clorofila (F_v/F_m), independientemente del cultivar. Basado en el crecimiento y las respuestas fisiológicas a cuatro VWC, concluimos que 'NuMex Heritage 6-4' era más tolerante a la sequía y 'Jalapeño M' era el menos tolerante de los tres cultivares.

* Author for correspondence ♦ Autor responsable.

Received: September, 2017. Approved: June, 2018.

Published as ARTICLE in *Agrociencia* 53: 59-72. 2019.

more drought tolerant and 'Jalapeño M' was least tolerant among the three cultivars.

Key words: *Capsicum annuum* 'CM-334', *Capsicum annuum* 'Jalapeño M', *Capsicum annuum* 'NuMex Heritage 6-4', drought tolerance, gas exchange, volumetric water content.

INTRODUCTION

Chili pepper (*Capsicum annuum*) is one of the most important horticultural crops in the world (Guevara-Avenida *et al.*, 2014), commercially cultivated in Mexico, China, Korea, East Indian, the United States, and other countries (Ahmed *et al.*, 2014). It is planted for fresh fruits, processed food additives in typical Mexican dishes (García-Gaytán *et al.*, 2017), and as a worldwide hot sauce because of their unique pungency and fruit color (Yoo *et al.*, 2003). Chili peppers are primarily cultivated in warm and semi-arid countries where the scarcity of water resources and high irradiance and temperature during summer are often limiting factors for production (Dorji *et al.*, 2005; Cattivelli *et al.*, 2008). Knowledge of physiological and growth characteristics in response to drought stress in chili cultivars is crucial in pepper crop breeding and planning of cropping systems in different agroecosystems (Do *et al.*, 2008). There is an urgent need to evaluate existing or newly developed, or both, germplasm of crop plants for drought tolerance (Morison *et al.*, 2008; Sivritepe *et al.*, 2008).

Pepper is one of the most sensitive horticultural plants to deficit irrigation because of large transpiring leaf surface, high leaf stomatal conductance, and a shallow root system (Alvino *et al.*, 1994). Different species and cultivars vary in their sensitivity to drought stress. For example, Abayomi *et al.* (2012) concluded that the *C. annuum* 'Tatashe' is more drought tolerant than *C. frutescens* 'Rodo' and *C. frutescens* 'Shombo' in term of the reductions in the number and fresh wt. of fruits and drought susceptibility index (SI). Leaf expansion is affected early when water uptake is curtailed, but photosynthetic activity is much less affected (Taiz and Zeiger, 2015); besides, water deficit also limits leaf number, branch number, decreases the growth rate of shoots, and stimulates leaf abscission as well (Sun *et al.*, 2015). Mild water deficits affect the development of the root system (McMichael *et al.*, 2011). Root-to-shoot biomass ratio appears to

Palabras clave: *Capsicum annuum* 'CM-334', *Capsicum annuum* 'Jalapeño M', *Capsicum annuum* 'NuMex Heritage 6-4', tolerancia a la sequía, intercambio de gases, contenido volumétrico de agua.

INTRODUCCIÓN

El chile (*Capsicum annuum*) es uno de los cultivos hortícolas más importantes del mundo (Guevara-Avenida *et al.*, 2014) y se cultiva comercialmente en México, China, Corea, India del Este, Estados Unidos, y en otros países (Ahmed *et al.*, 2014). Se siembra para obtener fruta fresca, aditivos alimentarios procesados en platos típicos mexicanos (García-Gaytán *et al.*, 2017), y como salsa picante mundial debido a su sabor único y color del fruto (Yoo *et al.*, 2003). Los chiles se cultivan principalmente en países cálidos y semiáridos donde la escasez de recursos hídricos y la alta irradiancia y temperatura durante el verano son a menudo factores limitantes para la producción (Dorji *et al.*, 2005; Cattivelli *et al.*, 2008). El conocimiento de las características fisiológicas y de crecimiento en respuesta al estrés por sequía en cultivares de chile es crucial en el mejoramiento de cultivos de chile y en la planificación de sistemas de cultivo en diferentes agroecosistemas (Do *et al.*, 2008). Hay una necesidad urgente de evaluar el germoplasma existente o recientemente desarrollado, o ambos, de plantas de cultivo para la tolerancia a la sequía (Morison *et al.*, 2008; Sivritepe *et al.*, 2008).

El chile es una de las plantas hortícolas más sensibles a la irrigación deficitaria debido a la gran superficie transpirante de la hoja, la elevada conductancia estomática de la hoja y un sistema radicular poco profundo (Alvino *et al.*, 1994). Las diferentes especies y cultivares varían en su sensibilidad al estrés por sequía. Por ejemplo, Abayomi *et al.* (2012) concluyeron que *C. annuum* 'Tatashe' es más tolerante a la sequía que *C. frutescens* 'Rodo' y *C. frutescens* 'Shombo', en términos de las reducciones en el número y el peso fresco de las frutas y el índice de susceptibilidad a la sequía (SI). La expansión de la hoja disminuye en una etapa temprana cuando se reduce el consumo de agua, pero la actividad fotosintética se ve mucho menos afectada (Taiz y Zeiger, 2015); además, el déficit de agua también limita el número de hojas, de ramas, disminuye la tasa de crecimiento de los brotes y estimula la abscisión de las hojas (Sun *et al.*, 2015).

be governed by a functional balance between water uptake by the root and photosynthesis by the shoot (Taiz and Zeiger, 2015). The reductions of growth and yield, especially the quantity and quality of fruits in chili pepper caused by drought stress was reported by Ahmed *et al.* (2014), Dagdelen *et al.* (2004), and Dorji *et al.* (2005). Grafting elite, commercial cultivars onto drought-tolerant rootstocks, is an important way to avoid or reduce losses in vegetable production caused by adverse soil conditions and environmental stresses, such as drought (Schwarza *et al.*, 2010). This technique was used for vegetable production for more than 50 years in several countries (Schwarza *et al.*, 2010). Determining the growth and physiological responses of plants grown under deficit irrigation is essential to select drought tolerant rootstocks for grafting.

Chili pepper 'Criollo de Morelos-334' ('CM-334') is native to the state of Morelos, Mexico (Guerrero and Laborede, 1980). It is an ideal rootstock (Bosland and Lindsey, 1991; Richins *et al.*, 2010; Dunn and Smart, 2015) with strong resistance to root wilt, one of the most important diseases affecting chili production in the world (Godínez-Vidal *et al.*, 2008; Sarath *et al.*, 2011). However, its tolerance to drought remains unclear. 'Jalapeño M' is one of the common used commercial cultivars (Carter and Stevens, 1998) and a most promising candidate for drought-prone cropping systems, as compared to chili cultivar 'Big Chili' (Do *et al.*, 2008). 'NuMex Heritage 6-4' produces pods with a smooth, thick flesh ranging from 15 to 20 cm in length and has high yield (Bosland, 2012).

The farmers may combine agricultural management along with varietal crops to overcome the scarcity of fresh water for irrigation (Azam *et al.*, 2016). Even in greenhouse, the chili production requires an efficient irrigation schedule for water conservation in the worldwide arid zones (Sharma *et al.*, 2017). Therefore, the objective of this study was to evaluate the relative drought tolerance of above-mentioned three chili peppers to varying substrate volumetric water contents in a greenhouse, in order to select drought tolerant rootstocks for chili pepper production. The hypothesis was that 'CM-334', a selection from landrace population would be more tolerant to drought condition than 'Jalapeño M' and 'NuMex Heritage 6-4'.

Los déficits leves de agua afectan el desarrollo del sistema radicular (McMichael *et al.*, 2011). La relación biomasa de raíz-brote parece estar gobernada por un equilibrio funcional entre la absorción de agua por la raíz y la fotosíntesis por el brote (Taiz y Zeiger, 2015). Ahmed *et al.* (2014), Dagdelen *et al.* (2004), y Dorji *et al.* (2005) reportaron sobre las reducciones de crecimiento y rendimiento, especialmente en la cantidad y calidad de las frutas de chile como resultado del estrés causado por la sequía. El injerto de élite, los cultivares comerciales en portainjertos tolerantes a la sequía, es una forma importante de evitar o reducir pérdidas en la producción de vegetales causadas por condiciones adversas del suelo y estrés ambiental, como la sequía (Schwarza *et al.*, 2010). Esta técnica se utilizó para la producción de hortalizas durante más de 50 años en varios países (Schwarza *et al.*, 2010). La determinación del crecimiento y las respuestas fisiológicas de las plantas cultivadas con riego deficitario constituyen un factor esencial para seleccionar portainjertos tolerantes a la sequía para el injerto.

El chile 'Criollo de Morelos-334' ('CM-334') es originario del estado de Morelos, México (Guerrero y Laborede, 1980). Es un portainjerto ideal (Bosland y Lindsey, 1991; Richins *et al.*, 2010; Dunn and Smart, 2015) con una fuerte resistencia al marchitamiento de las raíces, una de las enfermedades más importantes que afectan la producción de chile en el mundo (Godínez-Vidal *et al.*, 2008; Sarath *et al.*, 2011). Sin embargo, su tolerancia a la sequía no es clara. El "Jalapeño M" es uno de los cultivares comerciales más comunes (Carter y Stevens, 1998) y uno de los candidatos más prometedores para los sistemas de cultivo propensos a la sequía, en comparación con el cultivar de chile "Big Chili" (Do *et al.*, 2008). 'NuMex Heritage 6-4' produce vainas con una pulpa suave y gruesa que varía de 15 a 20 cm de largo y tiene un alto rendimiento (Bosland, 2012).

Los agricultores pueden combinar el manejo agrícola junto con los cultivos varietales para superar la escasez de agua dulce para riego (Azam *et al.*, 2016). Incluso en invernadero, la producción de chile requiere de un programa de riego eficiente para la conservación del agua en las zonas áridas de todo el mundo (Sharma *et al.*, 2017). Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la tolerancia relativa a la sequía de los tres chiles mencionados anteriormente a diferentes contenidos

MATERIALS AND METHODS

Plant materials and growing conditions

Seeds of chili pepper cultivars ('CM-334', 'Jalapeño M', and 'NuMex Heritage 6-4') were sown in 6-cell pack (4 × 4 × 5 cm) with Metro-Mix 360 (*Canadian sphagnum* peat moss 45-55 %, vermiculite, composed bark, dolomite lime; SunGro, Agawam, MA) on July 28, 2014. After seedlings emerged, plants were well watered with a nutrient solution, created by adding 0.72 g L⁻¹ of 15N-2.2P-12.5K (Peters 15-5-15; Scotts, Marysville, OA) to reverse osmosis water. The nutrient solution was used for irrigating plants during the entire experiment. On August 13, seedlings were transplanted into plastic pots (8.5 × 8.5 × 8.0 cm). On August 27, seedlings with two to four true leaves were transplanted into 5.8 L plastic containers with drainage (22.5 × 19.5 cm) with uniform amount of Metro-Mix 360. Thirty-two pots of healthy plants with uniform height in each cultivar were selected for experiment.

The temperature in the greenhouse was measured using T thermocouples (Omega Engineering, Inc., Stamford, CT) connected to a 21 X datalogger (Campbell Scientific Inc., Logan, UT). Day and night temperatures were 26.1 ± 4.7 °C and 21.6 ± 3.4 °C, respectively. Photosynthetic photon flux (PPF) was measured with a quantum sensor (Apogee Instruments, Logan, UT). Daily light integral inside the greenhouse was 14.0 ± 3.7 mol·m⁻²·d⁻¹. Plants were sprayed as needed with 5 mL g⁻¹ AVID 25 % EC (2 % Abamectin, Syngenta Crop Protection Inc., Greensboro, NC) or 70 % neem oil to control whitefly and aphid.

Experimental design and drought treatments

The experimental design was a randomized complete block with four treatments (VWC set points), two blocks, and four plants in each block. On September 2, 2014, the selected plants were arranged on benches following the experimental design and watered to container capacity. Containers were then irrigated using an automated irrigation system similar to that described by Nemali and van Iersel (2006). One 10HS capacitance sensor (Decagon, Pullman, WA) was inserted perpendicularly into the substrate in a randomly selected container in each treatment. The sensors were connected to a CR10 datalogger (Campbell Scientific, Logan, UT) through a AM416 multiplexer (Campbell Scientific) and the substrate moisture was measured every 5 min. A substrate-specific calibration equation converted voltage readings from the soil moisture sensors to substrate volumetric water content (VWC, L·L⁻¹) (VWC = -20.99 + 25.349 × voltage + 46.55 × voltage², R² = 0.984***). The datalogger compared

volumétricos de agua en el sustrato en un invernadero, a fin de seleccionar portainjertos tolerantes a la sequía para la producción de chile. La hipótesis fue que "CM-334", una selección de la población local, sería más tolerante a la condición de sequía que el "Jalapeño M" y el "NuMex Heritage 6-4".

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales vegetales y condiciones de crecimiento

Las semillas de cultivares de chile ('CM-334', 'Jalapeño M' y 'NuMex Heritage 6-4') se sembraron en un paquete de 6 celdas (4 × 4 × 5 cm) con Metro-Mix 360 (musgo esfagno canadiense, 45-55 %, vermiculita, corteza compuesta, lima dolomita; SunGro, Agawam, MA) el 28 de julio de 2014. Después de que emergieron las plántulas, las plantas se regaron con una solución nutritiva, compuesta con agua de osmosis reversa y 0.72 g L⁻¹ de 15N-2.2P-12.5K (Peters 15-5-15; Scotts, Marysville, OA). La solución nutritiva se usó para regar las plantas durante todo el tiempo que duró el experimento. El 13 de agosto, las plántulas se trasplantaron a macetas de plástico (8,5 × 8,5 × 8,0 cm). El 27 de agosto, las plántulas con dos a cuatro hojas se trasplantaron a recipientes plásticos de 5.8 L (22.5 × 19.5 cm) con un drenaje consistente en una cantidad uniforme de Metro-Mix 360. Se seleccionaron 32 macetas de plantas sanas con una altura uniforme en cada cultivar.

La temperatura en el invernadero se midió utilizando termopares T (Omega Engineering, Inc., Stamford, CT) conectados a un registrador de datos 21 X (Campbell Scientific Inc., Logan, UT). Las temperaturas diurnas y nocturnas fueron 26.1 ± 4.7 °C y 21.6 ± 3.4 °C, respectivamente. El flujo de fotones fotosintéticos (PPF) se midió con un sensor cuántico (Apogee Instruments, Logan, UT). La integral de luz diurna dentro del invernadero fue 14.0 ± 3.7 mol · m⁻² · d⁻¹. Las plantas se rociaron según fuera necesario con 5 mL g⁻¹ de AVID al 25 % de EC (2 % de abamectina, Syngenta Crop Protection Inc., Greensboro, NC) o 70 % de aceite de neem para controlar la mosca blanca y el pulgón.

Diseño experimental y tratamientos para la sequía

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cuatro tratamientos (puntos de ajuste del VWC), dos bloques y cuatro plantas en cada bloque. El 2 de septiembre de 2014 las plantas seleccionadas se colocaron en bancos, según el diseño experimental, y se regaron a capacidad del contenedor. Los contenedores se irrigaron con un sistema de riego automatizado similar al descrito por Nemali and van Iersel (2006). Un sensor de

the VWC in each treatment with the VWC set point for that particular treatment. As soon as the VWC in a container dropped below the set point for irrigation, the datalogger sent a signal to the 16-channel SDM-CD16 AC relay controller (Campbell Scientific), which opened the solenoid valve (X-13551-72; Dayton Electric Co., Niles, IL) corresponding to that treatment for 40 s. Each container was watered with one dribble ring (Dramm, Manitowoc, WI) at a diameter of 15 cm with five emitter holes per ring. The dribble ring was connected to a pressure-compensated drip emitter (8 LPH; Netafim USA, Fresno, CA) with an average flow rate of 133.3 mL min⁻¹. Irrigation set points were VWC values of 0.15 L·L⁻¹ (15 %), 0.25 L·L⁻¹ (25 %), 0.35 L·L⁻¹ (35 %), and 0.45 L·L⁻¹ (45 %).

Measurement of growth variables

Plant height (cm), from the substrate surface to the apical leaves of the central axis, was recorded at harvest (October 21, 2014), and stem diameter (mm) was measured at the base of the stem. Shoots were cut off at the substrate surface, and then fruits and leaves of each plant were separated. The number of fruits was counted and the fresh wt of fruits was recorded. Roots were removed by carefully breaking apart the soil and cleaned with running tap water. The leaves, stems, fruits, and roots were dried at 65 °C for 4 d and dry wt was determined.

Gas exchange

Leaf net photosynthesis (P_n), transpiration (E), and stomatal conductance (g) of four plants per cultivar per treatment were measured on October 9, 2014, using a CIRAS-2 portable photosynthesis system (PP Systems, Amesbury, MA) with an automatic universal PLC6 broad leaf cuvette. The 3rd leaf counted from the top fruit of the plant downward was labeled for the measurements. The environmental conditions within the cuvette were maintained at leaf temperature of 25 °C, photosynthetic photon flux (PPF) of 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, and CO₂ concentration of 375 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Data were recorded when the environmental conditions and gas exchange parameters in the cuvette became stable. These measurements were taken on sunny days between 10:00 and 14:00 h.

Leaf greenness

Leaf greenness (or relative chlorophyll content) was measured (as the optical density, SPAD reading) in the middle of the shoot of all plants using a handheld chlorophyll meter (Minolta Camera Co., Osaka, Japan), on October 16, 2014.

capacitancia 10HS (Decagon, Pullman, WA) se insertó perpendicularmente en el sustrato en un recipiente seleccionado al azar en cada tratamiento. Los sensores se conectaron a un registrador de datos CR10 (Campbell Scientific, Logan, UT) a través de un multiplexor AM416 (Campbell Scientific) y la humedad del sustrato se midió cada 5 min. Una ecuación de calibración específica del sustrato convirtió las lecturas de voltaje de los sensores de humedad del suelo a el contenido volumétrico de agua del sustrato (VWC, L·L⁻¹) (VWC = -20.99 + 25.349 × voltaje + 46.55 × voltaje², R² = 0.984 ***). El registrador de datos comparó el VWC en cada tratamiento con el punto de ajuste de VWC para ese tratamiento en particular. Tan pronto como el VWC en un contenedor cayó por debajo del punto de ajuste para el riego, el registrador de datos envió una señal al controlador de relé de CA SDM-CD16 de 16 canales (Campbell Scientific), que abrió la válvula solenoide (X-13551-72; Dayton Electric Co., Niles, IL) correspondiente a ese tratamiento durante 40 s. Cada recipiente se regó con un anillo de goteo (Dramm, Manitowoc, WI) a un diámetro de 15 cm con cinco agujeros de emisión por anillo. El anillo de goteo se conectó a un emisor de goteo con compensación de presión (8 LPH; Netafim USA, Fresno, CA) con un caudal promedio de 133.3 ml min⁻¹. Los puntos de ajuste de riego fueron valores de VWC de 0.15 L·L⁻¹ (15%), 0.25 L·L⁻¹ (25%), 0.35 L·L⁻¹ (35%) y 0.45 L·L⁻¹ (45 %).

Medición de variables de crecimiento

La altura de la planta (cm), desde la superficie del sustrato hasta las hojas apicales del eje central, se registró en la cosecha (21 de octubre de 2014) y el diámetro del tallo (mm) se midió en la base del tallo. Los brotes se cortaron en la superficie del sustrato y luego se separaron los frutos y las hojas de cada planta. El número de frutas se contó y se registró su peso fresco. Las raíces se quitaron removiendo con cuidado el suelo y se limpiaron con agua corriente del grifo. Las hojas, tallos, frutos y raíces se secaron a 65 °C durante 4 d y se determinó el peso seco.

Intercambio de gases

La fotosíntesis neta (P_n), la transpiración (E) y la conductancia estomática (g) de cuatro hojas por cultivar por tratamiento se midieron el 9 de octubre de 2014, utilizando un sistema de fotosíntesis portátil CIRAS-2 (PP Systems, Amesbury, MA) con una cubeta automática de hoja ancha PLC6 universal. La tercera hoja contada desde el fruto superior de la planta hacia abajo se marcó para las mediciones. Las condiciones ambientales dentro de la cubeta se mantuvieron a una temperatura de la hoja de 25 °C, un flujo de fotones fotosintéticos (PPF) de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ y una concentración de CO₂ de 375 $\mu\text{mol mol}^{-1}$. Los datos se

Chlorophyll fluorescence

Leaf chlorophyll fluorescence (F_v/F_m) was estimated at 10:00 and 14:00 h on October 10, 2014, on healthy and fully expanded leaves using a Hansatech pocket PEA chlorophyll fluorometer (Hansatech Instruments Ltd., Norfolk, UK). The leaves were dark adapted for at least 30 min prior to F_v/F_m measurements. Minimal fluorescence values in the dark-adapted state (F_0) were obtained by application of a low intensity red measuring light source (627 nm), whereas maximal fluorescence values (F_m) were measured after applying a saturating light pulse of $3500 \mu\text{mol}^{-2} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, and maximum quantum use efficiency of PSII in the dark-adapted state was calculated as $F_v/F_m = (F_m - F_0) / F_m$. Performance index (Pi) were measured to examine the effect of VWC on leaf photosynthetic apparatus among three chili pepper cultivars.

Data analysis

All data were analyzed using a two-way analysis of variance. When the effects of volumetric water content were significant, Tukey's honest significant difference (HSD) test ($p \leq 0.05$) was used. All statistical analyses were performed using JMP (Version 12, SAS Institute Inc., Cary, NC).

RESULTS AND DISCUSSION

Volumetric water content

After the substrates dried to their respective treatment levels, the daily average VWC was maintained close to the set points throughout the experiment (Figure 1). The averaged VWCs, representing measurements from 20 to 46 d after treatments (DAT), were 17.5, 26.1, 36.2, and 46.2 % in treatments with irrigation set points of 15, 25, 35, and 45 %, respectively. It took about 5 d and three weeks from container capacity to reach the set point for the highest and lowest VWCs, respectively.

Plant growth

Plant height of 'CM-334' and 'Jalapeño M' irrigated at VWCs of 25, 35, or 45 % were 25 to 34 % and 154 to 172 % taller than those at VWC of 15 %, while for 'NuMex Heritage 6-4' plants, no significant differences were found in plant height among treatments (Table 1). Ahmed *et al.* (2014) reported that restricting the water supply (85, 75, and

registraron cuando las condiciones ambientales y los parámetros de intercambio de gases en la cubeta se estabilizaron. Estas mediciones se tomaron en días soleados entre las 10:00 y las 14:00 h.

Verdor de las hojas

El 16 de octubre de 2014 se midió el verdor de las hojas (o el contenido relativo de clorofila) (como la densidad óptica, lectura de SPAD) en el medio del brote de todas las plantas, usando un medidor de clorofila portátil (Minolta Camera Co., Osaka, Japón).

Fluorescencia de clorofila

La fluorescencia de la clorofila de la hoja (F_v/F_m) se estimó entre las 10:00 y las 14:00 h del 10 de octubre de 2014, en hojas sanas y totalmente expandidas utilizando un fluorómetro de clorofila PEA de bolsillo Hansatech (Hansatech Instruments Ltd., Norfolk, Reino Unido). Las hojas se adaptaron a la oscuridad durante al menos 30 min antes de las mediciones F_v/F_m . Los valores mínimos de fluorescencia en el estado adaptado a la oscuridad (F_0) se obtuvieron mediante la aplicación de una fuente de luz de medición roja de baja intensidad (627 nm), mientras que los valores máximos de fluorescencia (F_m) se midieron después de aplicar un pulso de luz de saturación de $3500 \mu\text{mol}^{-2} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$; y la eficiencia de uso cuántica máxima de PSII en el estado adaptado a la oscuridad se calculó como $F_v/F_m = (F_m - F_0) / F_m$. El índice de rendimiento (Pi) se midió para examinar el efecto del VWC en el aparato fotosintético de la hoja en tres cultivares de Chile.

Análisis de datos

Todos los datos se analizaron mediante un análisis de varianza de dos vías. Cuando los efectos del contenido volumétrico de agua fueron significativos, se utilizó la prueba de la diferencia significativa honesta (HSD) de Tukey ($p \leq 0.05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando JMP (Versión 12, SAS Institute Inc., Cary, NC).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido volumétrico de agua

Después de que los sustratos se secaron a sus respectivos niveles de tratamiento, el VWC promedio diario se mantuvo cerca de los puntos de ajuste a lo largo del experimento (Figura 1). Los VWC promediados, que representan mediciones de 20 a 46 días

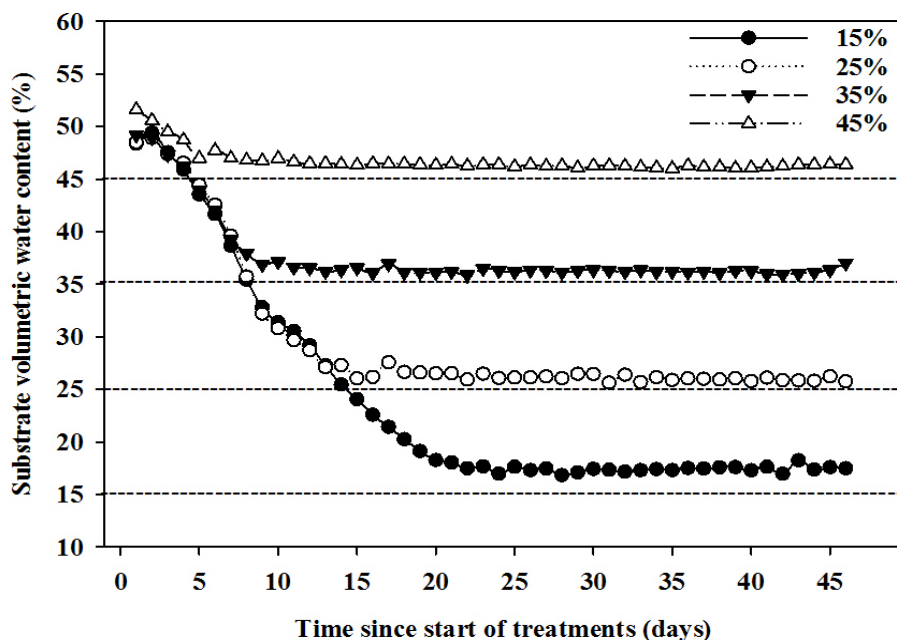


Figure 1. Average substrate volumetric water content (%) controlled by a soil moisture sensor based automatic irrigation system. Dashed lines indicate the substrate volumetric water content set points at which the containers were irrigated in the respective treatments.

Figure 1. Contenido promedio de agua volumétrica del sustrato (%) controlado por un sistema de riego automático a través de un sensor de humedad del suelo. Las líneas discontinuas indican los puntos de ajuste del contenido de agua volumétrico del sustrato en los cuales se irrigan los recipientes en los tratamientos respectivos.

Table 1. Plant height and stem diameter of three chili pepper cultivars ('CM-334', 'Jalapeño M', and 'NuMex Heritage 6-4') irrigated at four substrate volumetric water content set points for 49 d controlled by a soil moisture sensor based automatic irrigation system.

Cuadro 1. Altura de la planta y diámetro del tallo de tres cultivares de chile ('CM-334', 'Jalapeño M' y 'NuMex Heritage 6-4') irrigados en cuatro puntos de ajuste del contenido volumétrico de agua del sustrato durante 49 d, controlados por un sensor de humedad de suelos que opera gracias a un sistema de riego automático.

Species	Plant height (cm)				Stem diameter (mm)			
	15 %	25 %	35 %	45 %	15 %	25 %	35 %	45 %
CM-334	85.1b [†]	114.4a	110.9a	106.8a	9.5b	12.3ab	13.3a	15.3a
Jalapeño M	30.8b	80.9a	83.9a	78.1a	6.9c	12.6b	15.0a	15.9a
NuMex Heritage 6-4	63.8a	62.9a	79.4a	80.1a	10.2c	11.9bc	14.4a	13.3ab

[†]Means with different letters in a row are statistically different (Tukey's HSD; $p \leq 0.05$) ♦ Las medias con diferentes letras en una línea son estadísticamente diferentes (HSD de Tukey; $p \leq 0.05$).

55 % of water-holding capacity) caused a significant decrease in plant height of hot pepper (*C. annuum* 'Battle'). Similar result of plant height reduction by drought was reported by Liu *et al.* (2012) in a two-year field experiment on *C. annuum* 'Meiguohong'.

Stem diameters of the three chili pepper cultivars irrigated at VWCs of 35 and 45 % were significantly

después de los tratamientos (DAT), fueron de 17.5, 26.1, 36.2 y 46.2 % en tratamientos con puntos de ajuste de irrigación de 15, 25, 35 y 45 %, respectivamente. Alcanzar el punto de ajuste para los VWC más altos y más bajos, respectivamente, tomó aproximadamente 5 d y tres semanas, considerando la capacidad del contenedor.

greater than those at 15 % (Table 1). ‘Jalapeño M’ irrigated at VWCs of 35 and 45 % had the greatest increases in stem diameter by 8 mm (1.2 times) and 9 mm (1.3 times), respectively, compared with those at 15 %. Stem diameter of ‘CM-334’ plants irrigated at VWC of 45 % and ‘NuMex Heritage 6-4’ plants at VWC of 35 % increased by 41 and 62 %, respectively, compared with those at VWC of 15 %. A chili pepper plant with a greater diameter is more resistant to lodging that usually takes place in areas with high winds and heavy rainstorms (Noor and Caviness, 1980).

The amount of irrigation water significantly affected the number of fruits in ‘Jalapeño M’ and ‘NuMex Heritage 6-4’ but not ‘CM-334’ (Table 2). The number of fruits in ‘Jalapeño M’ irrigated at VWCs of 25, 35, or 45 % increased 8 to 13 times compared to that at 15 %, with the highest observed at VWC of 35 %. For ‘NuMex Heritage 6-4’, the number of fruits did not change as the VWC decreased from 45 to 25 %, but was lower as the VWC further decreased to 15 %. Mardani *et al.* (2017) concluded that at 20 % deficit irrigation level reduction on the pepper yield was not significant. The effects of VWC on fresh wt. of fruits of the three cultivars were similar to those on number of fruits. As VWC increased from 15 to 45 %, fresh wt. of fruits of ‘Jalapeño M’ increased approximately 442 to 728 %, while that of ‘NuMex Heritage 6-4’ increased 58 to 117 %. Similar results on fruit yield reduction by deficit irrigation were reported in other chili pepper cultivars (Dorji *et al.*, 2005; Ahmed *et al.*, 2014).

Crecimiento de la planta

La altura de las plantas de ‘CM-334’ y ‘Jalapeño M’ irrigadas a VWC de 25, 35 o 45 % fue de 25 a 34 % y de 154 a 172 % más altas que las de VWC de 15 %, mientras que para las plantas ‘NuMex Heritage 6-4’, no se encontraron diferencias significativas en cuanto a su altura entre los tratamientos (Cuadro 1). Ahmed *et al.* (2014) informaron que la restricción en el suministro de agua (85, 75 y 55 % de la capacidad de retención de agua) causó una disminución significativa en la altura de la planta de chile (*C. annuum* “Battle”). Liu *et al.* (2012) reportaron un resultado similar de una menor altura de la planta por la sequía en un experimento de campo de dos años en *C. annuum* “Meiguohong”.

Tiempo transcurrido desde el inicio de los tratamientos.

Los diámetros del tallo de las plantas de los tres cultivares de chile irrigados con VWC de 35 y 45 % fueron significativamente mayores que los de 15 % (Cuadro 1). El ‘Jalapeño M’ irrigado con VWC de 35 y 45 % experimentó los mayores incrementos en el diámetro del tallo, de 8 mm (1.2 veces) y 9 mm (1.3 veces), respectivamente, en comparación con los de 15 %. El diámetro del tallo de las plantas ‘CM-334’ irrigadas con VWC de 45 % y las plantas ‘NuMex Heritage 6-4’ con VWC de 35 % aumentó en un 41 y 62 %, respectivamente, en comparación con las de VWC de 15 %. Una planta de chile con un

Table 2. Number of fruits and fresh wt. of fruits of three chili pepper cultivars (‘CM-334’, ‘Jalapeño M’, and ‘NuMex Heritage 6-4’) irrigated at four substrate volumetric water contents for 49 d controlled by a soil moisture sensor based automatic irrigation system.

Cuadro 2. Número de frutos y peso fresco de frutos de tres cultivares de chile (‘CM-334’, ‘Jalapeño M’ y ‘NuMex Heritage 6-4’) irrigados con cuatro contenidos volumétricos de agua de sustrato durante 49 d, controlados por un sistema de riego automático a través de un sensor de humedad del suelo.

Species	Number of fruits				Fresh wt. of fruits (g)			
	15 %	25 %	35 %	45 %	15 %	25 %	35 %	45 %
CM-334	3.6a	7.0a	8.0a	13.5a	10.9a	7.7a	10.8a	20.7a
Jalapeño M	6.1c [†]	68.8b	88.8a	58.4b	41.3c	223.6b	318.8a	341.6a
NuMex Heritage 6-4	14.0b	19.3ab	19.4ab	22.1a	204.1c	322.9b	433.3ab	442.8a

[†]Means with different letters in a row are statistically different (Tukey’s HSD; p≤0.05) ♦ [†]Las medias con diferentes letras en una línea son estadísticamente diferentes (HSD de Tukey; p≤0.05).

Dry wt. of all plant parts was significantly affected by VWC, regardless of cultivar (Table 3). Leaf dry wt. of 'CM-334' and 'Jalapeño M' plants irrigated at VWC of 15 % decreased by 48 to 57 % and 65 to 74 %, respectively, compared to those at 25, 35, and 45 %. The leaf dry wt. of 'NuMex Heritage 6-4' plants irrigated at VWC of 15 % was 19 to 26 % less than that at VWCs of 45 and 35 %, respectively, but was similar to that at VWC of 25 %. Plants of 'CM-334' and 'Jalapeño M', irrigated at VWC 15 % reduced by 53 to 59 % and 78 to 81 %, respectively. 'NuMex Heritage 6-4' plants irrigated at 15 % had similar stem dry wt. to those at VWC of 25 %, but 46 to 47 % less than those at VWC of 35 and 45 %.

Root dry wt of 'Jalapeño M' and 'NuMex Heritage 6-4' were not different among VWCs of 25, 35, and 45 %. When VWC further decreased to 15 %, root dry wt reduced by 61 to 63 % and 38 to 53 %, respectively, for 'Jalapeño M' and 'NuMex Heritage 6-4' plants. Reductions in VWCs significantly decreased the root dry wt. of 'CM-334'. The drought stress in our study did not affect the fruit dry wt of both 'CM-334' and 'NuMex Heritage

diámetro mayor es más resistente al encamado que usualmente tiene lugar en áreas con fuertes vientos y tormentas (Noor y Caviness, 1980).

La cantidad de agua de riego afectó significativamente la cantidad de frutos en 'Jalapeño M' y 'NuMex Heritage 6-4' pero no en 'CM-334' (Cuadro 2). El número de frutos en 'Jalapeño M' irrigados con VWC de 25, 35 o 45 % aumentó de 8 a 13 veces en comparación con el 15 %, el mayor valor observado fue con VWC de 35 %. Para 'NuMex Heritage 6-4', el número de frutos no cambió a medida que el VWC disminuyó de 45 a 25 %, pero fue menor a medida que el VWC disminuyó aún más, a 15 %. Mardani *et al.* (2017) concluyeron que con un 20 % de déficit en el nivel de irrigación, la reducción en el rendimiento del chile no fue significativa. Los efectos de VWC en el peso fresco de los frutos de los tres cultivares fueron similares a los del número de frutos. Como el VWC aumentó de 15 a 45 %, el peso fresco de los frutos de 'Jalapeño M' aumentó aproximadamente de 442 a 728 %, mientras que el de 'NuMex Heritage 6-4' aumentó de 58 a 117 %. En otros cultivares de chile se reportaron resultados similares sobre la reducción del

Table 3. Leaf dry wt. (DW), stem DW, root DW, total DW, and root to shoot ratio of three chili pepper cultivars ('CM-334', 'Jalapeño M', and 'NuMex Heritage 6-4') irrigated at four substrate volumetric water contents for 49 d controlled by a soil moisture sensor based automatic irrigation system.

Cuadro 3. Peso seco de la hoja. (DW), DW del tallo, DW de la raíz, DW total y relación de raíz a brote de tres cultivares de chile ('CM-334', 'Jalapeño M' y 'NuMex Heritage 6-4') irrigados con cuatro contenidos volumétricos de agua de substrato durante 49 d, controlados por un sistema de riego automático operado con base en sensores de humedad del suelo.

Species	Treatment	Leaf DW (g)	Stem DW (g)	Root DW (g)	Fruit DW (g)	Total DW (g)	Root/shoot (%)
CM-334	15%	10.5b [†]	20.3c	3.0 c	1.3a	34.8 c	0.09a
	25%	20.3a	43.3b	5.2 bc	0.8 a	69.6 b	0.08a
	35%	24.3a	49.5ab	5.3 b	1.2 a	80.4 ab	0.07a
	45%	24.3a	52.7a	8.0 a	2.6 a	87.6 a	0.11a
Jalapeño M	15%	6.9 c	6.8 b	2.7 b	5.6 b	22.0 c	0.12a
	25%	21.8 ab	31.2 a	7.4 a	27.2 a	87.5 b	0.14a
	35%	26.7 a	36.3 a	7.7 a	34.9 a	105.7a	0.12a
	45%	20.0 b	31.3 a	7.0 a	31.4 a	83.7b	0.16a
NuMex Heritage 6-4	15%	16.8 b	13.4 b	3.3 b	23.5 a	57.0 c	0.11b
	25%	16.6 b	15.2b	5.4 ab	27.2 a	63.2bc	0.14ab
	35%	22.8 a	24.8 a	7.1 a	27.4 a	82.1ab	0.15a
	45%	20.8 ab	25.5 a	6.2 a	31.5 a	84.0a	0.13ab

[†]Means with different letters in a row are statistically different (Tukey's HSD; $p \leq 0.05$) ♦ Las medias con diferentes letras en una línea son estadísticamente diferentes (HSD de Tukey; $p \leq 0.05$).

6-4'. 'Jalapeño M' plants at VWC of 15 % had 80 to 84 % less fruit dry wt than those at VWCs of 25 to 45 %. Total dry wt of 'CM-334' and 'Jalapeño M' plants at VWC of 15 % was 50 to 60 % and 74 to 79 % less than those at VWCs of 25 to 45 %, while 'NuMex Heritage 6-4' at VWC of 15 % had only 105 to 32 % less (Table 3). Collectively, 'NuMex Heritage 6-4' had relatively smaller growth reduction compared to the other two cultivars, indicating that it is more drought tolerant.

Drought stress affects not only the above-ground part of plants, but also the under-ground part (Ma *et al.*, 2017). Root growth is inhibited by drought (Amelia *et al.*, 2011), and increased deficit irrigation reduced root dry wt of hot pepper, but root to shoot ratio was similar among treatments (Ahmed *et al.*, 2014). In our study, there was no difference in the root-to-shoot ratio in 'CM-334' and 'Jalapeño M' among VWC treatments (Table 3). For 'NuMex Heritage 6-4' plants, the root to shoot ratio was higher at VWC of 35 % than that at VWC of 15 %, whereas no differences were found among VWCs of 15, 25, and 45 %.

Physiological variables

The leaf net photosynthesis (P_n), stomatal conductance (g_s), and transpiration (E) of 'NuMex Heritage 6-4' were not influenced by VWC (Table 4). For 'CM-334' and 'Jalapeño M', P_n , g_s , and E did not change when VWC decreased from 45 to 25 % (Table 4). As VWC further decreased to 15 %, the P_n , g_s , and E of 'CM-334' decreased by 51 to 55 %, 69 to 73 %, and 49 to 51 %, respectively, while those of 'Jalapeño M' were reduced by 28 to 33 %, 54 to 66 %, and 43 to 51 %, respectively. Obviously, g_s is more susceptible to the drought stress than P_n . Cai *et al.* (2012) and Niu *et al.* (2006) also observed that reduction in g_s often occurs before P_n in plants under drought stress. Therefore, g_s could be used as an indicator to compare different species or cultivars for drought tolerance. In our study, 'NuMex Heritage 6-4' may be more drought tolerant than the other two cultivars since the drought stress applied did not change g_s .

According to Wang *et al.* (2004), SPAD readings strongly correlate with leaf chlorophyll contents. The SPAD readings of 'CM-334' measured at the end of our experiment did not differ among the VWC

rendimiento de la fruta por riego deficitario (Dorji *et al.*, 2005; Ahmed *et al.*, 2014).

El peso seco de todas las partes de la planta fue afectado significativamente por el VWC, independientemente del cultivar (Cuadro 3). El peso seco de la hoja de las plantas 'CM-334' y 'Jalapeño M' irrigadas con VWC de 15 % disminuyeron de 48 a 57 % y 65 a 74 %, respectivamente, en comparación con las de 25, 35 y 45 %. El peso seco de las hojas de las plantas 'NuMex Heritage 6-4' irrigadas con VWC de 15 % fue 19 a 26 % menos que las irrigadas con VWC de 45 y 35 %, respectivamente, pero fue similar a la del VWC de 25 %. Las plantas de 'CM-334' y 'Jalapeño M', irrigadas con VWC de 15 % se redujeron 53 a 59 % y 78 a 81 %, respectivamente. Las plantas 'NuMex Heritage 6-4' irrigadas al 15 % tenían un peso seco del tallo similar al de las de VWC del 25 %, pero 46 a 47 % menos que las de VWC de 35 y 45 %.

El peso seco de la raíz de "Jalapeño M" y "NuMex Heritage 6-4" no fue diferente entre los VWC de 25, 35 y 45 %. Cuando el VWC disminuyó aún más, al 15 %, el peso seco de la raíz se redujo de 61 a 63 % y 38 a 53 %, respectivamente, para las plantas 'Jalapeño M' y 'NuMex Heritage 6-4'. Las reducciones en el VWC disminuyeron significativamente el peso seco de la raíz de "CM-334". El estrés por sequía en nuestro estudio no afectó el peso seco de la fruta de "CM-334" y "NuMex Heritage 6-4". Las plantas de 'Jalapeño M' con VWC de 15 % tuvieron 80 a 84 % menos peso seco en frutos que las de VWC de 25 a 45 %. El peso seco total de las plantas 'CM-334' y 'Jalapeño M' con VWC de 15 % fue de 50 a 60 % y 74 a 79 % menos que las de VWC de 25 a 45 %, mientras que 'NuMex Heritage 6-4' con VWC de 15 % tuvieron solo 105 a 32 % menos (Cuadro 3). En conjunto, 'NuMex Heritage 6-4' tuvo una reducción del crecimiento relativamente menor en comparación con los otros dos cultivares, lo que indica que es más tolerante a la sequía.

El estrés por sequía afecta no solo a la parte aérea de las plantas, sino también a la parte que queda bajo tierra (Ma *et al.*, 2017). El crecimiento de la raíz se inhibe por la sequía (Amelia *et al.*, 2011), y el mayor déficit de riego redujo el peso seco de la raíz del chile, pero la relación raíz-brote fue similar en los tratamientos (Ahmed *et al.*, 2014). En nuestro estudio, no hubo diferencias en la relación raíz-brote en "CM-334" y "Jalapeño M" en los tratamientos con

Table 4. Leaf net photosynthesis (P_n), stomatal conductance (g_s), transpiration rate (E), and relative chlorophyll content (SPAD) of three chili pepper cultivars ('CM-334', 'Jalapeño M', and 'NuMex Heritage 6-4') irrigated at four substrate volumetric water content thresholds for 49 d controlled by a soil moisture sensor based automatic irrigation system.

Cuadro 4. Fotosíntesis neta de la hoja (P_n), conductancia estomática (g_s), tasa de transpiración (E) y contenido relativo de clorofila (SPAD) de tres cultivares de chile ('CM-334', 'Jalapeño M' y 'NuMex Heritage 6-4') regados según cuatro umbrales de contenido volumétrico de agua del sustrato durante 49 d controlados por un sistema de riego automático a través de un sensor de humedad del suelo.

Species	Treatment	P_n	g_s	E	SPAD
CM-334	15 %	7.4b [†]	123.2b	3.3b	51.9a
	25 %	15.1a	392.5ab	6.8a	53.4a
	35 %	16.1a	416.5ab	6.5a	54.8a
	45 %	16.4a	448.8a	6.5a	55.0a
Jalapeño M	15 %	11.2b	302.0b	4.5b	62.8a
	25 %	19.9a	649.5ab	7.9a	53.9b
	35 %	20.8a	878.5a	9.0a	51.2b
	45 %	19.2ab	782.6a	9.2a	47.7b
NuMex Heritage 6-4	15 %	18.4a	676.5a	7.8a	53.8a
	25 %	18.9a	676.8a	8.1a	48.8ab
	35 %	17.6a	645.5a	7.6a	45.1b
	45 %	16.9a	788.5a	8.5a	46.4ab

[†]Means with different letters in a row are statistically different (Tukey's HSD; $p \leq 0.05$) ♦ Las medias con diferentes letras en una línea son estadísticamente diferentes (HSD de Tukey; $p \leq 0.05$).

treatments (Table 4). Compared with 'Jalapeño M' plants at VWC of 15 %, significant decreases in SPAD readings were found in 'Jalapeño M' plants at VWC of 25, 35, or 45 %. 'NuMex Heritage 6-4' plants irrigated at VWC of 35 % had lower SPAD readings than those at VWC of 15 %, but there were no differences among VWCs of 15 and 25 and 45 %. These results agreed with the findings of Ommen *et al.* (1999) that chlorophyll content of wheat leaf significantly increased as the drought stress increased. However, Nezamia *et al.* (2008) reported that the reduction of soil water availability to 60 % of field capacity (FC) decreased SPAD readings of *Helianthus annuus* (sunflower) as compared to control (100 % FC), whereas further water reduction to 30 % of FC increased SPAD readings.

VWC (Cuadro 3). Para las plantas 'NuMex Heritage 6-4', la relación de raíz a brote fue mayor con VWC de 35 % que en VWC de 15%, mientras que no se encontraron diferencias entre los VWC de 15, 25 y 45 %.

Variables fisiológicas

La fotosíntesis de la red de la hoja (P_n), la conductancia estomática (g_s) y la transpiración (E) de 'NuMex Heritage 6-4' no fueron influenciadas por VWC (Cuadro 4). Para 'CM-334' y 'Jalapeño M', P_n , g_s y E no cambiaron cuando el VWC disminuyó de 45 a 25 % (Cuadro 4). A medida que el VWC disminuyó aún más, a 15 %, el P_n , g_s y E de 'CM-334' disminuyeron de 51 a 55 %, 69 a 73 % y 49 a 51 %, respectivamente, mientras que los de 'Jalapeño M' se redujeron de 28 a 33 %, 54 a 66 %, y 43 a 51 %, respectivamente. Obviamente, g_s es más susceptible al estrés por sequía que P_n . Cai *et al.* (2012) y Niu *et al.* (2006) también observaron que la reducción en g_s a menudo ocurre antes de P_n en plantas bajo estrés por sequía. Por lo tanto, g_s podría usarse como un indicador para comparar diferentes especies o cultivares para la tolerancia a la sequía. En nuestro estudio, 'NuMex Heritage 6-4' puede ser más tolerante a la sequía que los otros dos cultivares ya que el estrés por sequía aplicado no cambió g_s .

Según Wang *et al.* (2004), las lecturas de SPAD tienen una correlación fuerte con el contenido de clorofila de las hojas. Las lecturas de SPAD de 'CM-334' medidas al final de nuestro experimento no difirieron entre los tratamientos con VWC (Cuadro 4). En comparación con las plantas "Jalapeño M" con VWC de 15 %, se encontraron disminuciones significativas en las lecturas de SPAD en las plantas de "Jalapeño M" con VWC de 25, 35 o 45 %. Las plantas de 'NuMex Heritage 6-4' irrigadas con VWC de 35 % tuvieron lecturas de SPAD más bajas que las de VWC de 15 %, pero no hubo diferencias entre los VWC de 15, 25 y 45%. Estos resultados concordaron con los hallazgos de Ommen *et al.* (1999) en que el contenido de clorofila de la hoja de trigo aumentó significativamente a medida que aumentaba el estrés por sequía. Sin embargo, Nezamia *et al.* (2008) informaron que la reducción de la disponibilidad de agua en el suelo a 60 % de la capacidad de campo (FC) disminuyó las lecturas de SPAD de *Helianthus annuus* (girasol) en comparación con el testigo (100 %

The F_v/F_m measured both in the morning and in the afternoon, was not affected by VWC but varied among cultivars (data not shown). There was also no significant difference in P_i among different VWC treatments (data not shown). These results indicate that maximum quantum efficiency of PS II photochemistry (F_v/F_m) parameter was unaffected by the drought stress in this study (Maxwell and Johnson, 2000, Zhen *et al.*, 2014). Starman and Lombardini (2006), Naumann *et al.* (2009) also reported that chlorophyll fluorescence did not change during drought stress. Understanding the precise water requirements of crops is the key to improving water use efficiency (Garland *et al.*, 2012) especially in optimizing plant growth, improving irrigation efficiency, and increasing profitability (Belayneh *et al.*, 2013).

CONCLUSIONS

The controlled drought provided by the automated irrigation system at VWC of 15 % negatively affected the growth and yield of the three-chili cultivars. VWC of 25 % seems to be a threshold for the drought stress of the three-chili cultivars in arid regions. Growth reduction in response to drying substrate varied with cultivar. 'NuMex Heritage 6-4' was more drought tolerant and 'Jalapeño M' was the least tolerant among the three cultivars. Therefore, although 'CM-334' is widely used as a resistant rootstock for soil pathogen diseases, it may not be utilized as a rootstock for resistance to drought conditions.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by the National Institute of Food and Agriculture of Department of Agriculture (USDA) Hatch project TEX090450 and Texas A&M AgriLife Research. The contents are solely the responsibility of the authors and does not necessarily represent the official views of the funding agencies.

LITERATURE CITED

Abayomi, Y. A., M. O. Aduloju, M. A. Egbewunmi, and B. O. Suleiman. 2012. Effects of soil moisture contents and rates of NPK fertilizer application on growth and fruit yields of pepper (*Capsicum* spp.) genotypes. *Intl. J. Agr. Sci.* 2: 651-663.

FC), mientras que una mayor reducción de agua a 30 % de FC aumentó las lecturas de SPAD.

El F_v/F_m , medido tanto en la mañana como en la tarde, no fue afectado por el VWC, pero varió entre los cultivares (datos no mostrados). Tampoco hubo diferencias significativas en P_i entre los diferentes tratamientos de VWC (datos no mostrados). Estos resultados indican que la eficiencia cuántica máxima del parámetro de fotoquímica PS II (F_v/F_m) no se vio afectada por el estrés por sequía en este estudio (Maxwell y Johnson, 2000, Zhen *et al.*, 2014). Starman y Lombardini (2006), Naumann *et al.* (2009) también reportaron que la fluorescencia de la clorofila no cambió durante el estrés por sequía. Comprender los requisitos de agua precisos de los cultivos es clave para mejorar la eficiencia del uso del agua (Garland *et al.*, 2012), especialmente para optimizar el crecimiento de las plantas, mejorar la eficiencia del riego y aumentar la rentabilidad (Belayneh *et al.*, 2013).

CONCLUSIONES

La sequía controlada proporcionada por el sistema de riego automatizado con VWC de 15 % afectó negativamente el crecimiento y rendimiento de los tres cultivares de chiles. El VWC de 25 % parece ser un umbral para el estrés por sequía de los tres cultivares de chiles en las regiones áridas. La reducción del crecimiento en respuesta al sustrato de secado varió de un cultivar a otro. El 'NuMex Heritage 6-4' fue más tolerante a la sequía y el 'Jalapeño M' fue el menos tolerante de los tres cultivares. Por lo tanto, aunque 'CM-334' se usa ampliamente como patrón resistente para enfermedades de patógenos del suelo, no se puede utilizar como patrón de resistencia a condiciones de sequía.

—End of the English version—

---*---

Ahmed, A. F., H. J. Yu, X. Y. Yang, and W. J. Jiang. 2014. Deficit irrigation affects growth, yield, vitamin C content, and irrigation water use efficiency of hot pepper grown in soilless culture. *HortScience* 49: 722-728.

Alvino, A., M. Centritto, and F. De Lorenzi. 1994. Photosynthesis response of sunlit and shade pepper leaves at different positions in the canopy under two water regimes. *Austral. J. Plant Physiol.* 21: 377-391.

- Amelia, H., R. P. G. Veeresh, O. T. Rolando, L. M. Kenneth, and S. Rachid. 2011. Variation in root system architecture and drought response in rice (*Oryza sativa*): phenotyping of the Oryza SNP panel in rainfed lowland fields. *Field Crop Res.* 120: 205-214.
- Azam, M., M. Norman, N. A. Abbasi, A. Ramzan, M. Imran, A. Hayat, H. Abbas, and A. Akram. 2016. Effect of foliar application of micro-nutrient and soil condition on growth and yield of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Sci., Technol. Develop.* 35: 75-81.
- Belayneh, B. E., J. D. Lea-Cox, and E. Lichtenberg. 2013. Costs and benefits of implementing sensor-controlled irrigation in a commercial pot-in-pot container nursery. *HortTechnology* 23: 760-769.
- Bosland, P. W. 2012. 'NuMex Heritage 6-4' New Mexican chile pepper. *HortScience* 47: 675-676.
- Bosland, P. W., and D. L. Lindsey. 1991. A seedling screen for *Phytophthora* root rot of pepper, *Capsicum annuum*. *Plant Dis.* 75: 1048-1050.
- Cai, X., T. Starman, G. Niu, C. Hall, and L. Lombardini. 2012. Response of selected garden roses to drought stress. *HortScience* 47: 1050-1055.
- Carter, A. K., and R. Stevens. 1998. Using ethephon and GA₃ to overcome thermos inhibition in 'Jalapeño M' pepper seed. *HortScience* 33: 1026-1027.
- Cattivelli, L., F. Rizza, F. W. Badeck, E. Mazzucotelli, A. N. Mastrangelo, E. Francia, C. Marè, A. Tondelli, and A. M. Stanca. 2008. Drought tolerance improvement in crop plants: An integrated view from breeding to genomics. *Field Crops Res.* 105: 1-14.
- Dagdelen, N., E. Yilmaz, F. Sezgin, and T. Gurbuz. 2004. Effect of water stress at different growth stages on processing pepper (*Capsicum annuum* cv. Kapijia) yield water use and quality characteristics. *Pak. J. Biol. Sci.* 7: 2167-2172.
- Do, T., T. Carey, K. Rajasekaran, and H. Ratnayaka. 2008. Physiological, growth, and leaf surface characteristics toward understanding drought tolerance in big chili and Jalapeño pepper. *HortScience* 43: 1275-1276.
- Dorji, K., M. H. Behboudiana, and J. A. Zegbe-Domínguez. 2005. Water relations, growth, yield, and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial rootzone drying. *Scientia Horticulturae* 104: 137-149.
- Dunn, A. R., and C.D. Smart. 2015. Interactions of *Phytophthora capsici* with resistant and susceptible pepper roots and stems. *Phytopathology* 105: 1355-1361. Doi: 10.1094/PHYTO-02-15-0045.
- García-Gaytán, F., F. C. Gómez-Merino, L.I. Trejo-Téllez, G.A. Baca-Castillo, and S. García-Morales. 2017. The chilhuacle chili (*Capsicum annuum* L.) in Mexico: description of the variety, its cultivation and uses. Review article. *Int. J. Agron.* ID 564680. <https://doi.org/10.1155/2017/5641680>.
- Garland, K. F., S. E. Burnett, M. E. Day, and M. W. van Iersel. 2012. Influence of substrate water content and daily light integral on photosynthesis, water use efficiency, and morphology of *Heuchera americana*. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 137: 57-67.
- Godínez-Vidal, D., M. Rocha-Sosa, E. B. Sepúlveda-García, J. Lara-Reyna, R. Rojas-Martínez, and E. Zavaleta-Mejía. 2008. Phenylalanine ammonia lyase activity in chili CM-334 infected by *Phytophthora capsici* and *Nacobbus aberrans*. *Eur. J. Plant Pathol.* 120: 299-303.
- Guerrero, M. A., and J. A. Laborede. 1980. Current status of pepper breeding for resistance to *Phytophthora capsici* in Mexico. Synopses of the IVth meeting of the *Capsicum* working group of Eucarpia. I.V.T., Wageningen, The Netherlands. pp: 52-56.
- Guevara-Avenidaño, E., L. R. Mauricio, O. A. Pablo, G. I. A. Lourdes, T. Ángel, and M. H. María. 2014. Effect of rhizobacteria indole producing on the development of *Capsicum annuum* var. Jalapeño M. *Int. Res. J. Biological Sci.* 3: 22-27.
- Liu, H., H. Yang, J. Zheng, D. Jia, J. Wang, Y. Li, and G. Huang. 2012. Irrigation scheduling strategies based on soil matric potential on yield and fruit quality of mulched-drip irrigated chili pepper in Northwest China. *Agric. Water Manage.* 115: 232-241.
- Ma, X., G. Wang, W. Zhao, M. Yang, N. Ma, F. Kong, X. Dong, and Q. Meng. 2017. SICOR131M1: A novel cold-regulation gene from tomato, enhances drought stress tolerance in tobacco. *J. Plant Physiol.* 216: 88-99.
- Maxwell, K., and G. N. Johnson. 2000. Chlorophyll fluorescence – A practical guide. *J. Expt. Bot.* 51:659-668.
- Mardani, S., S.H. Tabatabaei, and M. Pessakli. 2017. *J. Plan Nutrition*. Doi.org/10.1080/01904167.2016.1269342.
- McMichael, B. L., D. M. Oosterhuis, and J. C. Zak. 2011. Stress response in cotton root systems. *In: Stress Physiology in Cotton*. Cordova, Tennessee. pp: 97-112.
- Morison, J. I. L., N. R. Baker, P. M. Mullineaux, and W. J. Davies. 2008. Improving water use in crop production. *Philos. Trans. R. Soc. B. Biol. Sci.* 363: 639-658.
- Naumann, J. C., D. R. Young, and J. E. Anderson. 2009. Spatial variations in salinity stress across a coastal landscape using vegetation indices derived from hyperspectral imagery. *Plant Ecol.* 202: 285-297.
- Nemali, K. S., and M. W. van Iersel. 2006. An automated system for controlling drought stress and irrigation in potted plants. *Scientia Horticulturae* 110:292-297.
- Nezamia, A., H. R. Khazaiea, Z. B. Rezazadehb, and A. Hosseinic. 2008. Effects of drought stress and defoliation on sunflower (*Helianthus annuus*) in controlled conditions. *Desert* 12: 99-104.
- Niu, G., D. S. Rodriguez, and Y. T. Wang. 2006. Impact of drought and temperature on growth and leaf gas exchange of six bedding plant species under greenhouse conditions. *HortScience* 41: 1408-1411.
- Noor, R. B., and C. E. Caviness. 1980. Influence of induced lodging on pod distribution and seed yield in soybeans. *Agron. J.* 72: 900-906.
- Ommen, O. E., A. Donnelly, S. Vanhoutvin, M. Vanouijen, and R. Manderscheid. 1999. Chlorophyll content of spring wheat flag leaves grown under elevated CO₂ concentration and other environmental stress within 'ESPACE-Wheat' project. *Eur. J. Agron.*10: 197-203.
- Richins, R. D., S. Micheletto, and M. A. O'Connell. 2010. Gene expression profiles unique to chile (*Capsicum annuum* L.) resistant to *Phytophthora* root rot. *Plant Sci.* 178: 192-201.
- Sarath, B. B., S. R. Pandravada, R. D. V. J. Prasada Rao, K. Anitha, S. K. Chakrabarty, and K. S. Varaprasad. 2011. Global sources of pepper genetic resources against arthropods, nematodes and pathogens. *Crop Protection* 30: 389-400.

- Sharma, H., M. K. Shukla, P. W. Bosland, and R. Steiner. 2017. Soil moisture sensor calibration, actual evapotranspiration, and crop coefficients for drip irrigated greenhouse chile peppers. *Agric. Water Manage.* 179: 81-91.
- Schwarza, D., Y. Roupaelb, G. Collac, and J. H. Venemad. 2010. Grafting as a tool to improve tolerance of vegetables to abiotic stresses: Thermal stress, water stress and organic pollutants. *Scientia Horticulturae* 127: 162-171.
- Sivritepe, N., U. Erturk, C. Yerlikaya, I. Turkan, M. Bor, and F. Ozdemir. 2008. Response of the cherry rootstock to water stress induced *in vitro*. *Biol. Plant.* 52: 573-576.
- Starman, T., and L. Lombardini. 2006. Growth, gas exchange, and chlorophyll fluorescence of four ornamental herbaceous perennials during water deficit conditions. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 131: 469-475.
- Sun, Y., G. Niu, J. Zhang, and P. Del Valle. 2015. Growth responses of an interspecific cotton breeding line and its parents to controlled drought using an automated irrigation system. *J. Cotton Sci.* 19: 290-297.
- Taiz, L., and E. Zeiger. 2015. *Plant Physiology and Development*. 6th ed. Sinauer Associates, Inc., Publishers, Sunderland, MA. 896 p.
- Wang, Q., J. Chen, and Y. Li. 2004. Nondestructive and rapid estimation of leaf chlorophyll and nitrogen status of peace lily using a chlorophyll meter. *J. Plant Nutr.* 27: 557-569.
- Yoo, E. Y., S. Kim, Y. H. Kim, C. J. Lee, and B. D. Kim. 2003. Construction of a deep coverage BAC library from *Capsicum annuum* 'CM334'. *Theor. Appl. Genet.* 107: 540-543.
- Zhen, S. Y., S. E. Burnett, M. E. Day, and M. W. van Iersel. 2014. Effects of substrate water content on morphology and physiology of Rosemary, Canadian columbine, and Cheddar pink. *HortScience* 49: 486-492.