

VARIACIONES MICROCLIMÁTICAS EN INVERNADERO: EFECTO SOBRE LAS RELACIONES HÍDRICAS E INTERCAMBIO DE GASES EN PIMENTÓN (*Capsicum annuum*)

GREENHOUSE MICROCLIMATIC VARIATIONS: EFFECTS ON WATER RELATIONS AND GAS EXCHANGE ON BELL PEPPER (*Capsicum annuum*)

Ramón E.-Jaimez¹, Ronald Da-Silva², Andreína D' Aubeterre², Josu Allende³, Fermín Rada⁴ y Rafael Figueiral³

¹Universidad de Los Andes. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Apartado 77. La Hechicera. Mérida, 5101. Venezuela. (rjaimez@ula.ve), ²Universidad Simón Bolívar. Escuela de Ingeniería Química. Sartenejas, Caracas, Venezuela. ³Vivero El Horticultor C.A., Urb. Sartenejas. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela. (horticultor@cantv.net). ⁴Universidad de Los Andes. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas. La Hechicera. Mérida, 5101. Venezuela (frada@ula.ve)

RESUMEN

En este estudio se compararon los efectos de días despejados con altas radiaciones ($1700 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y días nublados (por debajo de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) sobre el microclima en invernaderos y las relaciones hídricas e intercambio de gases en tres híbridos de *Capsicum annuum*. Las mediciones de microclima incluyeron temperatura y humedad relativa a 4, 2.5 y 1.5 m. En ambas condiciones de radiación, la temperatura y humedad relativa entre 1.5 y 4.0 m fueron similares; sin embargo, en días nublados las temperaturas fueron menores. A menor radiación se obtuvieron conductancias estomáticas más bajas disminuyendo las tasas de asimilación de CO_2 (A) y transpiración. Los potenciales hídricos foliares fueron significativamente menores en días con altas radiaciones en horas del mediodía. La relación entre la humedad y temperatura en el invernadero fue lineal, mientras que una regresión logarítmica se ajustó mejor a las relaciones entre el flujo de fotones fotosintéticos y A. Las humedades relativas obtenidas al mediodía en días soleados (47-50%) sugieren el uso de nebulizadores para evitar incrementos en el déficit de presión de vapor que conduzcan a cierres estomáticos.

Palabras clave: *Capsicum annuum*, fotosíntesis, potencial hídrico foliar, radiación, temperatura.

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de cultivos, el microclima y sus variaciones influyen en los procesos de intercambio de gases y relaciones hídricas (Nilsen y Orcutt, 1996). Estas variaciones no se pueden controlar en campo, pero en numerosos rubros hortícolas y ornamentales se ha evitado mediante el cultivo en invernadero.

ABSTRACT

The effects of sunny ($1700 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and cloudy days ($<1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) on microclimatic conditions and on gas exchange and water relations were studied in three hybrids of *C. annuum* under greenhouse conditions. Microclimatic measurements included temperature and humidity at 4, 2.5 and 1 m above soil surface. In both radiation conditions, temperatures and humidity at 4 to 1.5 m were similar, but temperature was lower on cloudy days. With lower radiation, stomatic conductance was lower, reducing CO_2 assimilation and transpiration rates. Leaf water potentials were significantly lower at mid-day on high radiation days. The relationship between humidity and temperature in the greenhouse was linear, while a logarithmic regression had better fit to the relationships between photosynthetic photon flow and CO_2 assimilation. The relative humidity recorded at mid-day on sunny days (47-50%) suggests the use of atomizers to prevent increments in vapor pressure deficits which induce stomata to close.

Key words: *Capsicum annuum*, photosynthesis, plant water potential, radiation, temperature.

INTRODUCTION

The microclimate and its variations affect the processes of gas exchange and water relationships during crop growth (Nilsen and Orcutt, 1996). These variations cannot be controlled in the field, but in a number of vegetable and ornamental crops they can be prevented by cultivation in a greenhouse.

The frequent increase in temperature inside greenhouses reduce relative humidity, increases water vapor pressure deficits (VPD) and, consequently, thermohydric stress in the crops. In the last decade techniques and equipment have been studied to allow more efficient

Recibido: Octubre, 2003. Aprobado: Noviembre, 2004.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 39: 41-50. 2005.

El frecuente incremento de la temperatura dentro de los invernaderos reduce la humedad relativa, aumenta los déficit de presión de vapor de agua (DPV) y un consiguiente estrés termo-hídrico en los cultivos. En la última década se ha estudiado técnicas y equipos que permitan un control más eficiente y económico de los flujos y mezclas de aire en invernaderos. Según Mastalerz (1977), la restricción en el movimiento del aire dentro de los invernaderos es más importante que el efecto invernadero, dado por el tipo de cubierta utilizado, en la determinación de la temperatura del aire interna. Esto ha llevado al desarrollo de modelos matemáticos que evalúan el comportamiento climático de los invernaderos en diferentes condiciones ambientales y de manejo de los flujos de aire mediante la apertura de ventanas laterales (Deltour *et al.*, 1985; Navas *et al.*, 1998; Kempkes *et al.*, 1998; Van de Brack *et al.*, 1998; Ferreira *et al.*, 2000).

El diseño de invernaderos se ha enfocado hacia el desarrollo de cultivos en ambientes con temperaturas relativamente extremas, como en verano e invierno en climas templados. En las regiones tropicales, donde los promedios de temperatura anual son superiores a 20 °C y sus variaciones diarias menores a 15 °C, los diseños de invernaderos debieran lograr sistemas de enfriamiento y de sombreo especialmente en los momentos de máxima radiación, complementados con la optimización de la apertura de las ventanas laterales.

En Venezuela, el uso de invernaderos con sistemas automatizados es reciente. No existen evaluaciones que describan la dinámica microclimática en su interior para diferentes ambientes, ni hay información del efecto de estas variables en las relaciones de intercambio de gases e hídricas en cultivos. En contraste, hay amplia información sobre los efectos de condiciones microclimáticas en climas templados, en diferentes períodos del cultivo, lo cual en muchos casos no es extrapolable. Un ejemplo es el pimentón (*C. annuum*), del cual la mayor información se ha obtenido en climas templados (Wien, 1997; Bosland y Votava, 1999). En Venezuela, el pimentón y el tomate (*L. esculentum*) han sido los cultivos más sembrados en invernadero en los últimos cinco años, y se han introducido muchos híbridos sin previa evaluación en las diferentes regiones del país. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) Establecer las relaciones entre las diferentes variables microclimáticas dentro de un invernadero con ventilación cenital tipo ala de gaviota y aperturas laterales en condiciones contrastantes de radiación; 2) conocer los efectos de esta dinámica microclimática sobre las relaciones hídricas y de intercambio de gases en tres híbridos de pimentón.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó de julio a septiembre de 2002 en un invernadero en Sartenejas, Caracas, Venezuela (10° 30' N, 66° 53' O) a

and economical control of air flows and mixtures in greenhouses. According to Mastalerz (1977), the restriction of air movement within greenhouses is more important than the greenhouse effect in the determination of internal air temperature, due to the type of covering used. This has led to the development of mathematical models that evaluate the climatic performance of greenhouses in different environmental conditions and to the management of air flows through the opening of lateral vents (Deltour *et al.*, 1985; Navas *et al.*, 1998; Kempkes *et al.*, 1998; Van de Brack *et al.*, 1998; Ferreira *et al.*, 2000).

The design of greenhouses has centered on crop production in environments with relatively extreme temperatures, as in summer and winter in temperate climates. In the tropical regions where mean annual temperatures are above 20 °C and daily variations are lower than 15 °C, greenhouse designs should aim toward cooling systems and shading, especially at times of maximum radiation, complemented by optimization of lateral vent opening.

In Venezuela, the use of greenhouses with automated systems is recent. There are no studies that describe the interior microclimatic dynamics for different environments, nor is there information on the effect of these variables in the gas and water exchange relationships in crops. In contrast, there is ample information on the effects of microclimatic conditions in temperate climates in different cropping periods, which in many cases cannot be extrapolated. One example is bell pepper (*C. annuum*), for which most of the information has been obtained in temperate climates (Wien, 1997; Bosland and Votava, 1999). In Venezuela, bell pepper and tomato (*L. esculentum*) are the crops that have been most widely cultivated in greenhouses for the last five years; many hybrids have been introduced without previous assessment in different regions of the country. The objectives of this study were: 1) To establish the relationships among different microclimatic variables within a greenhouse with ventilation, gull wing type vents on the roof and lateral openings, in contrasting radiation conditions; 2) to determine the effects of this microclimatic dynamics on water and gas exchange relationships in three bell pepper hybrids.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted from July to September 2002 in a greenhouse in Sartenejas, Caracas, Venezuela (10° 30' N, 66° 53' W), at an altitude of 1260 m. The elliptic arc greenhouse had an area of 2610 m², constructed with galvanized steel material and comprises five modules of 65.25 m × 8.0 m each, oriented E-W. The dimensions of the respective modules are shown in Figure 1. Each module had a gull wing-shaped opening on the roof and

una altitud de 1260 m. El invernadero, de arco elíptico, tenía un área de 2610 m², construido con materiales de acero galvanizado y conformado por cinco módulos de 65.25 m × 8.0 m cada uno, orientados E-O. Las dimensiones de los respectivos módulos se muestran en la Figura 1. Cada uno de ellos contaba con una apertura cenital tipo ala de gaviota y estaban cubiertos con una película plástica tipo Agrilene de polietileno de 200 µm de espesor. Las ventanas a lo largo de los laterales del invernadero eran de polietileno anti-áfido (65.25 × 2 m) y constituían 10% de la superficie que lo cubría.

La temperatura promedio de la zona es 26 °C con mínimas y máximas promedio de 16 y 29 °C. El sistema automatizado para ventanas cenitales y laterales, se programó para que abrieran cuando la temperatura dentro de los invernaderos sobrepasara 23 °C y cerraran a temperaturas inferiores a 21 °C. Al momento de las mediciones las plantas tenían 95 d de haberse trasplantado y presentaban una altura aproximada de 1.90 m. Estaban conformadas a dos guías y sembradas sobre un sustrato orgánico previamente fermentado y esterilizado (70% material vegetal y 30% estiércol de caballo) a una densidad de 6 plantas m⁻². Las plantas recibían un promedio de 0.6 L d⁻¹ distribuidos en cuatro turnos. A través del riego se aplicó la fertilización tres veces por semana: 1:3:1 de N, P y K con 50 ppm de N las dos primeras semanas luego del trasplante; 1:1:1 con 100 ppm de N durante la etapa vegetativa; 1:0.5:3 con 100 ppm de N para la etapa de producción. La concentración de micronutrientes se mantuvo con un fertilizante comercial (%): B 0.01, Cu 0.02, Fe 0.05, Mn 0.05, Mo 0.001 y Zn 0.02.

Mediciones de variables ambientales

En el módulo central se colocaron termopares tipo K conectados a un termómetro digital (modelo EA10, Extech instruments, Waltham, MA, USA) protegidos de la radiación directa, a 4, 2.5 y 1.5 m de altura, distribuidos en cuatro sitios a lo largo del módulo. También se colocó un sensor de humedad relativa digital (modelo 407445, Extech Instruments) a 4 y 1 m de altura y termopares en el envés de tres hojas ya formadas ubicadas entre el tercer y cuarto nudo más joven de las mismas. Las mediciones se realizaron cada 2 h desde las 08:00 hasta las 16:30 entre el 19 y el 22 de julio. Del 30 de agosto al 5 de septiembre se colocaron, a 0.70, 1.50, 2.50 y 4 m, en el interior del módulo central, sensores automáticos de temperatura y humedad relativa (Modelo T175-H2, Testo, Flanders, NJ, USA) programados para medir cada 20 min. Otro sensor similar se colocó en el exterior a 1.5 m. Con los registros de temperatura del aire, foliares y de humedad relativa a 1.5 m, se calculó la diferencia de presión de vapor de agua (DPV) entre la hoja y el aire.

Mediciones de intercambio de gases y relaciones hídricas

En plantas de tres híbridos, Commandant, Porto y Mandarín (Rogers/Syngenta, Boise, ID, USA) se realizaron las mediciones de intercambio de gases y relaciones hídricas: tasas de asimilación de CO₂ (A) y transpiración (E), conductancia estomática (gs),

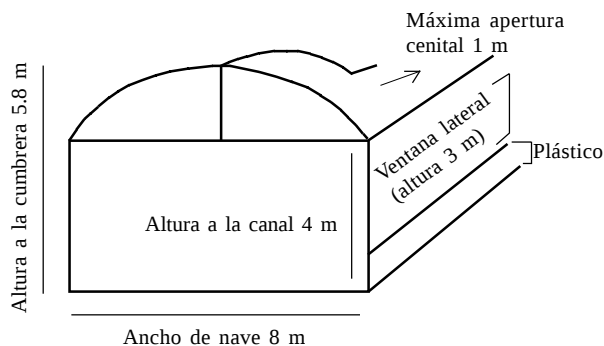


Figura 1. Dimensiones de la estructura de un módulo del invernadero con apertura cenital ala de gaviota.

Figure 1. Dimensions of the structure of a greenhouse module with gull-wing roof opening.

was covered with a plastic film, Agrilene polyethylene 200 µm thick. The lateral vents along the sides of the greenhouse were polyethylene, anti-aphid screen (65.25 × 2 m) and comprised 10% of the surface.

The average temperature of the area is 26 °C with average minimums and maximums of 16 and 29 °C. The automated system was programmed to open both roof and lateral vents when the temperature inside the greenhouse surpassed 23 °C and to close with temperatures below 21 °C. Measurements were taken 95 d after the plants had been transplanted and had an approximate height of 1.90 m. The plants had two main branches and were planted in a previously fermented and sterilized organic substrate (70% plant material and 30% horse manure) at a density of 6 plants m⁻². The plants were watered with an average of 0.6 L d⁻¹ distributed in four shifts. Fertilizer was applied three times a week through irrigation water: 1:3:1, N, P and K, with 50 ppm N the first two weeks after transplant; 1:1:1, with 100 ppm N during the vegetative stage; with 1:0.5:3, 100 ppm N for the production stage. The concentration of micronutrients was maintained with a commercial fertilizer (%): B 0.01, Cu 0.02, Fe 0.05 Mn 0.05, Mo 0.001, and Zn 0.02.

Measurement of environmental variables

Type K thermocouples were placed in the central module connected to a digital thermometer (model EA10, Extech Instruments, Waltham, MA., USA), protected from direct radiation, at 4, 2.5 and 1.5 m above the floor, distributed in four sites along the module. Also, digital relative humidity sensors (model 407445, Extech Instruments) were placed 4 and 1 m high, and thermocouples were placed on the underside of three fully-formed leaves located between the youngest third and fourth nodes. The measurements were taken every 2 h as of 08:00 until 16:30 from July 19 to 22. From August 30 to September 5, inside the central module, automatic sensors (Model T175-H2), Testo, Flanders, NJ, USA) were placed at 0.07, 1.50, 2.50 and 4 m high; they measured temperature and relative humidity and were programmed

flujo de fotones fotosintéticos (FFF) y CO_2 ambiental. Se usó un sistema portátil de intercambio de gases, operado en modo abierto (LCA-4, ADC LTD., Hoddesdon, Reino Unido); consiste en una cámara foliar, una unidad suministradora de aire y un analizador de gases infrarrojo. Las mediciones de intercambio de gases se hicieron cada 2 h desde las 08:00 hasta las 18:00 en seis plantas de cada híbrido seleccionadas aleatoriamente. Se tomaron tres medidas en dos hojas entre el tercer y cuarto nudo más joven de cada planta (36 medidas para cada híbrido). El potencial hídrico foliar se midió con una bomba de presión (Modelo SKPM 1400, SKYE, Powys, Reino Unido), entre las 08:00-09:00 (Ψ_L) y 12:00-13:00 h (Ψ_{Lm}). Las mediciones se realizaron en cuatro hojas ubicadas entre el tercer y quinto nudo debajo del ápice de cuatro plantas tomadas al azar. Las diferencias entre las dos condiciones de radiación para cada cultivar fue evaluada con una prueba de t ($p \leq 0.05$)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Humedad, temperatura y radiación: perfiles dentro del invernadero

En las variables estudiadas se observaron diferencias entre días soleados de alta radiación ($1700\text{--}1800 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) días con los días nublados, de baja radiación ($<1000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) por lo cual los resultados se presentan para ambas condiciones. Durante los días soleados, la temperatura en el invernadero fue superior que en el exterior aproximadamente en 2°C , pero entre las 12:00 y 14:00 horas la diferencia fue 3 a 3.5°C . Tal incremento implica que las temperaturas dentro de los invernaderos pueden alcanzar 33 a 34.5°C , mayor que el óptimo de A de los tres híbridos. En días nublados, la temperatura dentro de los invernaderos osciló entre 1.5 a 2°C por encima de la temperatura externa todo el día (Figura 2). En clima mediterráneo, en Portugal, dentro de los invernaderos hubo 5°C sobre la temperatura del exterior entre 11:00 y 14:00 horas; en horas nocturnas no hubo diferencias en las temperaturas (Pita, *et al.*, 1998). Kawashina y Nonaka (2000) encontraron una respuesta similar en verano.

Respecto al perfil de temperatura dentro del invernadero, en ninguna de las dos condiciones se registraron diferencias desde 1.5 hasta 4 m (Figura 3); sin embargo, las temperaturas fueron más bajas en días nublados. En ambas condiciones de radiación las temperaturas foliares fueron similares a las del aire obtenidas a 1.5 m. La ventilación lateral dada por las ventanas abiertas, permitió una mezcla bastante eficiente entre 1.5 a 4 m. No obstante, desde el momento de transplante hasta aproximadamente dos meses, las temperaturas a 0.75 m durante todo el día se mantuvieron 1°C más que en los estratos superiores (datos no mostrados). Las experiencias con ventilación natural han mostrado mayor eficiencia en relación

to record every 20 min. Another similar sensor was placed outside at 1.5 m. With the data on air and leaf temperature and relative humidity at 1.5 m, the difference in water vapor pressure (VPD) between leaf and air was calculated.

Gas exchange and water relationships measurements

On plants of three hybrids, Commandant, Porto and Mandarin (Rogers/Syngenta, Boise, ID, USA), the following measurements of gas exchange and water relationships were performed: CO_2 assimilation (A) and transpiration (E) rates, stomatic conductance (gs), photosynthetic photon flow (FFF) and environmental CO_2 ; a portable gas exchange system (LCA-4, ADC LTD., Hoddesdon, United Kingdom) was used and operated in open mode. The system is composed of a leaf chamber, an air supply unit and an infrared gas analyzer. Gas exchange measurements were taken every 2 h as of 08:00 until 18:00 on six randomly selected plants of each hybrid. Three measurements were taken on two leaves between the youngest third and fourth node of each plant (36 measurements for each hybrid). Leaf water potential was measured with a pressure pump (Model SKPM 1400, SKYE, Powys, United Kingdom). This was determined between 08:00-09:00 h (Ψ_L) and 12:00-13:00 h (Ψ_{Lm}). Measurements were taken on four leaves located between the third and fifth node below the apex of four plants selected at random. The differences between the two conditions of radiation for each cultivar was evaluated with a t test ($p \leq 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSION

Humidity, temperature and radiation: profiles inside the greenhouse

Differences in the variables studied were observed between high radiation sunny days ($1700\text{--}1800 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and low radiation cloudy days ($<1000 \mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), and therefore results for both conditions are reported. During sunny days, temperature in the greenhouse was approximately 2°C higher than outside, but between 12:00 and 14:00 h the difference was 3 to 3.5°C . This increment implies that the temperatures inside the greenhouses can reach 33 to 34.5°C , which is above the optimal for A of the three hybrids. On cloudy days, the temperature inside the greenhouses oscillated between 1.5 and 2°C higher than external temperature all day (Figure 2). In the Mediterranean climate of Portugal inside the greenhouse the temperature was 5°C above the external temperature between 11:00 and 14:00 h; there were no differences in nighttime temperatures (Pita, *et al.*, 1998). Kawashina and Nonaka (2000) found a similar response in summer.

Regarding the temperature profile inside the greenhouse, in neither of the conditions were differences recorded from 1.5 to 4 m (Figure 3); however, the

con ventilaciones forzadas, debido a una mayor capacidad de mezcla del aire, lo cual se manifestó en menores diferencias de temperatura a varias alturas (Kawashima y Nonaka, 2000). Sin embargo, Willits (2000) planteó que la combinación de incrementos en los flujos de aire y paneles evaporativos son más eficientes para disminuir la temperatura.

No se registraron diferencias en la humedad relativa entre 1.5 a 4 m de altura durante el día. Los valores más bajos (47-50%) se obtuvieron a las 14:00 horas a 1.5 m coincidiendo con las máximas temperaturas y radiaciones registradas (Figura 3). La humedad relativa presentó una relación lineal con la temperatura dentro del invernadero; el 15% restante de la variación de la humedad no explicado por esta regresión indica que existen variables, como la transpiración y evaporación, que influyen en los cambios de humedad y temperatura dentro de los invernaderos (Figura 4). Esto coincide con los mayores DPV registrados (2.8 kPa), los cuales pudieron influir en cierres estomáticos, tal como se encontró en días de alta radiación (Figura 5b). Bakker (1989) obtuvo mayores producciones en pimentón con menores DPV durante las noches.

Las concentraciones de CO₂ en días soleados variaron entre 300 y 380 vpm, con una tendencia a decrecer con mayor temperatura y radiación; pero en condiciones de poca radiación las concentraciones de CO₂ oscilaron entre 350-410 vpm (Figura 3 c). La mayor variabilidad en la concentración de CO₂ en días soleados está relacionado con las mayores temperaturas y altas A (Figura 5 e). Los altos valores de CO₂ en las primeras horas de la mañana y en días de escasa radiación están asociados con las menores A durante estas horas (Figura 5 e, 5 e'). Nederhoff *et al.* (1992) reportaron comportamientos similares usando distintas concentraciones de CO₂ en invernadero en Holanda, entre abril y junio, en cultivos de pimentón.

Intercambio de gases y relaciones hídricas

En días soleados, los mayores valores de FFF (1700-1800 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) y de DPV (2.5-2.8 kPa) se obtuvieron entre las 12:00-13:30 horas (Figura 6 a, 6 b), coincidiendo con los momentos de mínima humedad relativa registrados (Figura 3). En la mayoría de las horas los tres híbridos mostraron tendencias y valores similares de A (Figura 5 e, 5 e'). Las mayores A (25-27 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) de los tres híbridos coincidieron con los momentos de máxima radiación. No obstante, en momentos de altas A registradas a las 13:30 hubo una disminución parcial en la conductancia estomática (220 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (Figura 5 c). En condiciones controladas y FFF de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, Pezeshki y Sundstrom (1988) reportaron 14 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para el cultivar de pimentón Resistant

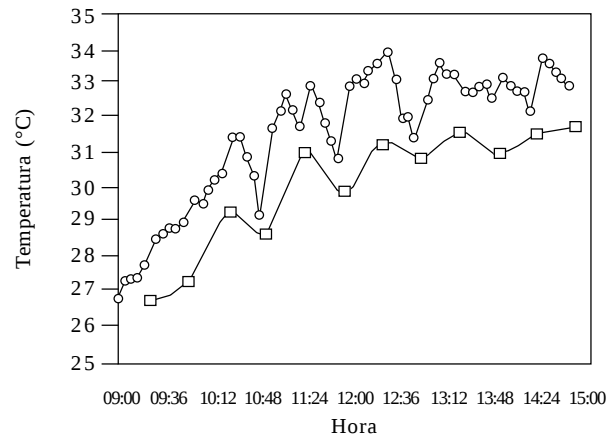


Figura 2. Dinámica de temperatura dentro (○) y fuera (□) del invernadero en un día soleado.

Figure 2. Dynamics of temperature within (○) and outside (□) the greenhouse on a sunny day.

temperatures were lower on cloudy days. In both conditions of radiation the leaf temperatures were similar to those of the air obtained at 1.5 m. Lateral ventilation through the open vents allowed a very efficient mixture between 1.5 and 4 m. Nevertheless, from the time of transplant up to approximately two months, the temperatures at 0.75 m were 1 °C higher than those in the upper strata during the entire day (data not shown). Experiences with natural ventilation have shown better efficiency than with forced ventilation due to a greater capacity for mixing air; this is manifested in the smaller differences in temperature at the different heights (Kawashima and Nonaka, 2000). However, Willits (2000) proposed that the combination of increments in air flows and evaporation panels are more efficient for reducing temperature.

No differences in relative humidity were recorded among heights from 1.5 to 4 m during the day. The lowest values (47-50%) were obtained at 14:00 h at 1.5 m, coinciding with the highest temperatures and radiations recorded (Figure 3). Relative humidity exhibited a linear relationship with temperature inside the greenhouse; the remaining 15% of the variation in humidity not explained by this regression indicates that there are variables, such as transpiration and evaporation, which influence changes in humidity and temperature within the greenhouse (Figure 4). This coincides with the highest VPD recorded (2.8 kPa), which could have influenced stomatic closing as was found on high radiation days (Figure 5 b). Bakker (1989) obtained higher production of bell peppers with lower VPD at night.

CO₂ concentrations on sunny days varied between 300 and 380 vpm, tending to decrease with higher temperatures and radiation, while under conditions of low radiation, CO₂ concentrations oscillated between

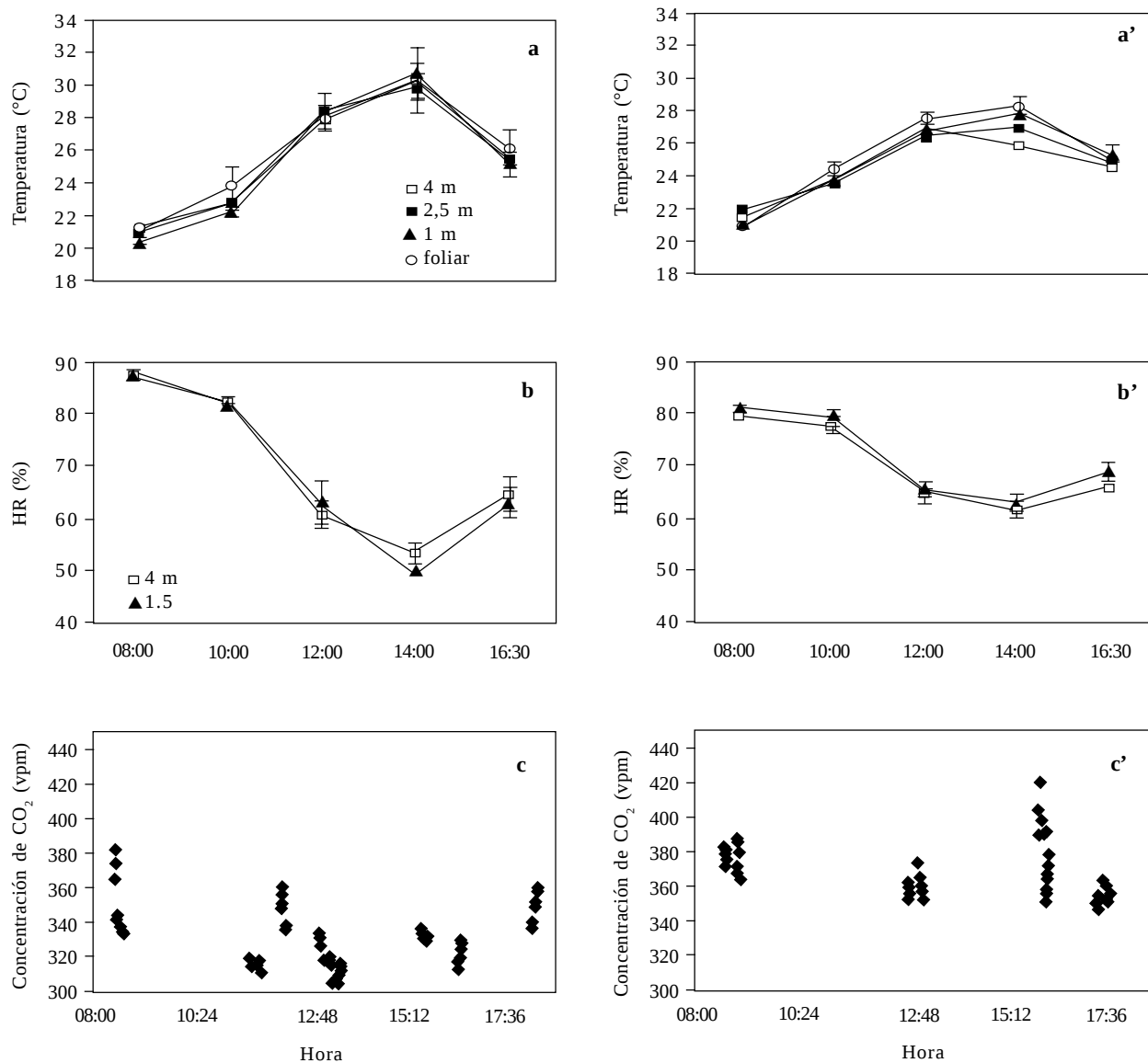


Figura 3. Perfiles diarios de: a) temperatura foliar y del aire; b) humedad relativa; c) concentración de CO₂ dentro del invernadero. Lado izquierdo (día soleado), lado derecho (días nublado). Las barras indican errores estándar.

Figure 3. Daily profiles of: a) leaf and, air temperature; b) relative humidity; c) CO₂ concentration inside the greenhouse. Left side (sunny day), right side (cloudy day). Bars indicate standard errors.

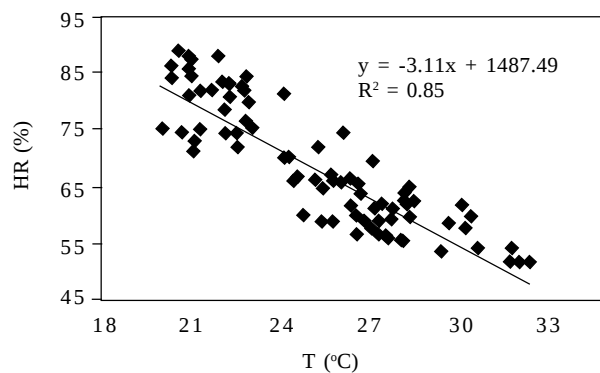


Figura 4. Relación lineal entre humedad relativa y temperatura del aire dentro del invernadero con apertura cenital tipo ala de gaviota.

Figure 4. Linear relationship between relative humidity and air temperature inside the greenhouse with gull wing type roof openings.

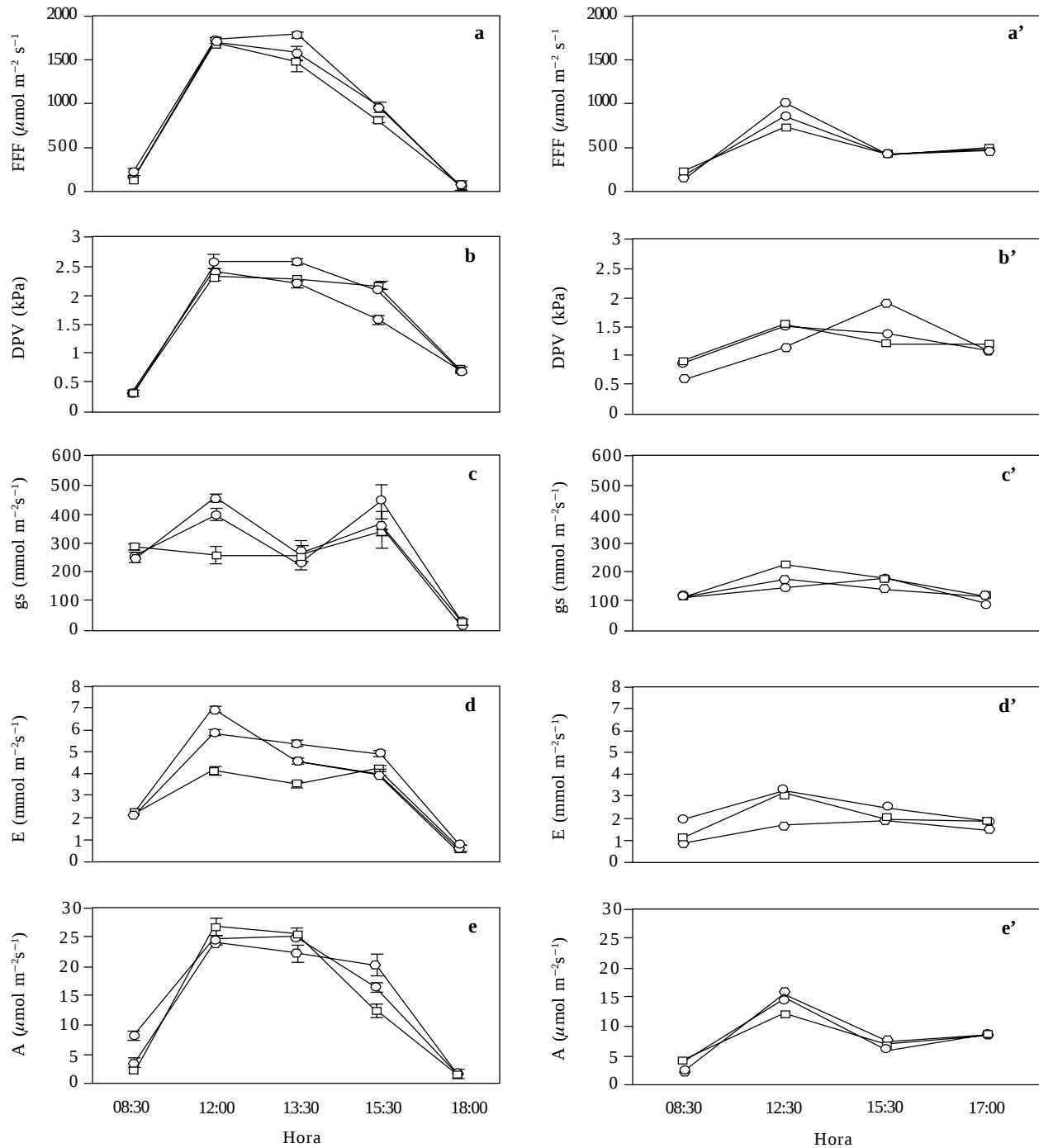


Figura 5. Patrones diarios de: a) flujo de fotones fotosintéticos (FFF); b) diferencia de presión de vapor de agua (VPD); c) conductancia estomatal (gs); d) transpiración (E); e) asimilación neta (A), en los híbridos Commandant ($\circ$), Mandarin ($\square$) y Porto ($\diamond$), en invernadero en ambiente tropical. Lado izquierdo (día soleado), lado derecho (día nublado). Las barras indican error estándar.

Figure 5. Daily patterns of: a) photosynthetic photons flow, (FFF); b) water vapor pressure difference (VPD); c) stomatal conductance (gs); d) evapotranspiration (E); e) net assimilation (A), in the hybrids commandant ($\circ$), Mandarin ($\square$) and Porto ($\diamond$) in a greenhouse in tropical environment. Left side (sunny day), right day (cloudy day). Bars indicate standard error.

Giant No 4, mientras que Zabri y Burrage (1998), a un FFF de $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, encontraron A similares. En el presente estudio, para FFF de $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ las A

350 and 410 vpm (Figure 3 c). The greatest variability in CO_2 concentration on sunny days is related to higher temperatures and high A (Figure 5 e). The high values

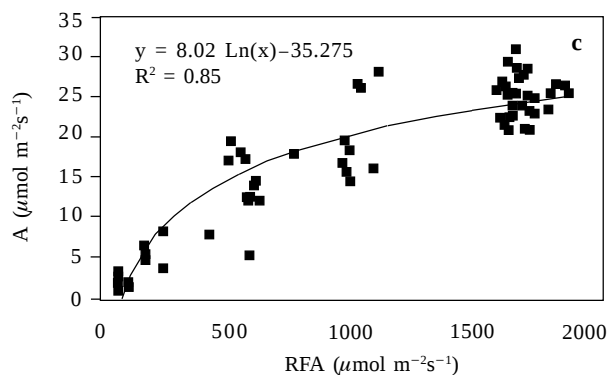
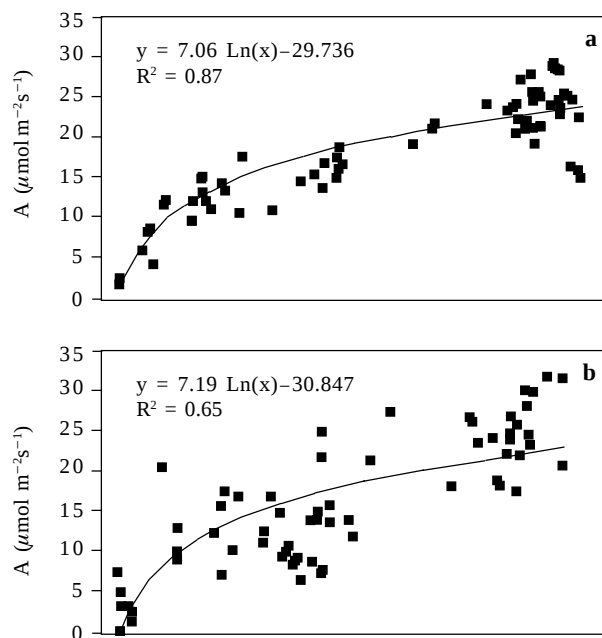


Figura 6. Relaciones logarítmicas establecidas entre radiación fotosintéticamente activa (RFA) y tasa de asimilación neta (A) en invernadero para los híbridos Commandant (A), Mandarin (B) y Porto (C).

Figure 6. Logarithmic relationships established between photosynthetically active radiation (RFA) and rate of net assimilation (A) in a greenhouse for the hybrids Commandant (A), Mandarin (B) and Porto (C).

oscilaron entre 19 y 20 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ en los tres cultivares evaluados.

Las mayores E ($7.3 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) se obtuvieron en horas del mediodía y disminuyeron progresivamente hasta el final de la tarde (Figura 5 d). En días nublados, los DPV fueron menores a 2.0 kPa. Asimismo, las gs alcanzaron valores máximos de $200 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, lo cual influyó en menores A, que alcanzaron un máximo de $15 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ y E menores a $3.7 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. No hubo diferencias en estas variables entre los tres híbridos bajo esta última condición.

Existió una buena correlación logarítmica entre FFF y A para los tres híbridos (Figura 6). Los puntos de compensación fueron muy similares: 67, 72 y $81 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para Commandant, Mandarin y Porto. La saturación de A está alrededor de $1500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ para los tres híbridos; entonces, con estas condiciones se puede disminuir la radiación entrante mediante alguna técnica de sombreado. Esto reduciría las temperaturas en horas del mediodía y evitaría aumentos del DPV.

No se presentaron diferencias en los Ψ_{Li} ; sin embargo los Ψ_{Lm} fueron diferentes ($p \leq 0.05$) entre los días soleados y nublados para los tres híbridos. Los valores oscilaron entre -0.53 – -0.59 y -1.35 – -1.38 MPa, para la mañana y mediodía, mientras que en días nublados los Ψ_{Lm} se mantuvieron entre -1.10 y -1.20 MPa para los tres híbridos (Cuadro 1). Los Ψ_{Lm} fueron mayores que los valores para los cuales se ha reportado cierre estomático total para pimentón (-1.8 MPa, Horton *et al.*, 1982; -1.5 MPa, Aloni *et al.*, 1991). Es probable que los altos valores de DPV (2.5–2.8 kPa) y Ψ_{Lm} , entre las 12:00 y 14:00 h, influyeran en el cierre estomático parcial al

for CO_2 in the first hours of the morning and on days with little radiation is associated with lower A during these hours (Figure 5 e and 5 e'). Nederhoff *et al.* (1992) reported similar behavior using different concentrations of CO_2 in greenhouses in Holland between April and June in the cultivation of bell pepper.

Gas exchange and water relationships

On sunny days, the highest values of FFF (1700 – $1800 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) and VPD (2.5–2.8 kPa) were recorded between 12:00–13:30 h (Figure 5 a, 5 b), coinciding with the instances of lowest recorded relative humidity (Figure 3). During most of the hours, the three hybrids exhibited similar trends and values of A (Figure 5 e, 5 e'). The highest A (25 – $27 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) of the three hybrids coincided with the instances of highest radiation. Nevertheless, with high recorded A at 13:30, there was a partial reduction in stomatic conductance ($220 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) (Figure 5 c). Under controlled conditions and FFF of $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, Pezeshki and Sundstrom (1988) reported $14 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ for the bell pepper cultivar Resistant Giant No 4, while Zabari and Burrage (1998) did so at a FFF of $1500 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, observing similar A. In our study, at FFF of $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, A values oscillated between 19 and $20 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ in the three cultivars evaluated.

The highest E values ($7.3 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) were found during mid-day hours, but these decreased progressively toward the end of the afternoon (Figure 5 d). On cloudy days, the VPD values were below 2.0 kPa. Also gs values reached a maximum of $200 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, coinciding in

mediodía, especialmente en días soleados. Al parecer la cantidad y distribución del riego usado evitó disminuciones drásticas en potenciales hídricos durante el mediodía.

CONCLUSIONES

En las condiciones del estudio los incrementos del DPV no influyen en cierres estomáticos severos, ya que se encontraron altas A en horas de máxima radiación, lo cual indica que la cantidad de riego establecido satisface los requerimientos de los híbridos evaluados. Sin embargo, es necesario analizar la posibilidad de usar un sombreamiento parcial que evite alta radiación dentro de los invernaderos, sobre la cual A se satura. Sería conveniente explorar el uso de nebulizadores a fin de reducir el DPV y las temperaturas dentro de los invernaderos, en especial entre las 11:30 y 15:00 horas en días de alta radiación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por el Convenio entre Viveros El Horticultor, Caracas y la Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

LITERATURA CITADA

- Aloni, B., J. Daie, and L. Karni. 1991. Water relations, photosynthesis and assimilate partitioning in leaves of pepper (*Capsicum annuum*) transplants: Effects of water stress after transplanting. J. Hort. Sci. 66: 75-80.
- Bakker, J. C. 1989. The effects of air humidity on growth and fruit production of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). J. Hort. Sci. 64: 41-46.
- Bosland, P., and E. Votava. 1999. Peppers: Vegetable and Spice Capsicums. CABI Publishing. 204 p.
- Deltour J., D. De Halleux, J. Nijskens, S. Coutisse, and A. Nisen. 1985. Dynamic modelling of heat and mass transfer in greenhouse. Acta Horticulturae 174: 119-126.
- Ferreira, P. M., E. B. Ruano A., and E. A. Faria. 2000. Design and implementation of a real time data acquisition system for the

lower A values, which reached a maximum of $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and E values were below $3.7 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. There were no differences in these variables among the three hybrids under this condition.

There was a good logarithmic correlation between FFF and A for the three hybrids (Figure 6). The compensation points were very similar: 67, 72 and $81 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for Commandant, Mandarin and Porto, respectively. Saturation of A was around $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ for the three hybrids, indicating that with these conditions radiation entering can be reduced by some means of shading. This would lower the temperatures at mid-day and prevent increases in VPD.

There were no differences in Ψ_{Li} ; however, the Ψ_{Lm} for sunny days were different ($p \leq 0.05$) from those for cloudy days for the three hybrids. The values oscillated between -0.53 -0.59 and -1.35 -1.38 MPa, in the morning and at mid-day, while on cloudy days Ψ_{Lm} stayed around -1.10 and -1.20 MPa for the three hybrids (Table 1). The Ψ_{Lm} were above the values for which total stomatic closing has been reported for bell pepper (-1.8 MPa, Horton *et al.*, 1982; -1.5 MPa, Aloni *et al.*, 1991). It is likely that the high VPD values (2.5-2.8 kPa) and Ψ_{Lm} , between 12:00 and 14:00 h, influenced partial stomatic closing at mid-day, especially on sunny days. Apparently, the quantity and distribution of irrigation prevented drastic reductions in water potentials at mid-day.

CONCLUSIONS

Under the conditions of this study, the increases in VPD did not cause severe stomatic closing since high A values were recorded during the hours of maximum radiation, indicating that the quantity of irrigation supplied satisfied the requirements of the evaluated hybrids. However, it is necessary to analyze the possibility of using partial shading to prevent high radiation within greenhouses, above which A is

Cuadro 1. Potencial hídrico foliar inicial medido entre 8:00 y 8:30 horas (Ψ_{Li} , MPa) y mínimo (Ψ_{Lm} , MPa) medido entre 13:00 y 14:00 h para tres cultivares de pimentón en invernadero. Los datos son promedios de cuatro mediciones $\pm$ error estándar.
Table 1. Initial leaf water potential measured between 8:00 and 8:30 h (Ψ_{Li} , MPa) and minimum (Ψ_{Lm} , MPa) measured between 13:00 and 14:00 h for three cultivars of bell pepper in a greenhouse. The data are averages of four measurements $\pm$ standard error.

Hora	Híbrido			
	Tipo de día	Commandant	Mandarín	Porto
08:00-08:30	Soleado	$-0.59 \pm 0.06a$	$-0.58 \pm 0.06a$	$-0.53 \pm 0.03a$
	Nublado	$-0.64 \pm 0.05a$	$-0.53 \pm 0.04a$	$-0.58 \pm 0.02a$
13:00-14:00	Soleado	$-1.34 \pm 0.03a$	$-1.37 \pm 0.06a$	$-1.36 \pm 0.02a$
	Nublado	$-1.20 \pm 0.02b$	$-1.28 \pm 0.02b$	$-1.21 \pm 0.02b$

a,b: Promedios con diferente letra en cada hora son estadísticamente diferentes (Student t, $p \leq 0.05$).

- identification of dynamic temperature models in a hydroponic greenhouse. *Acta Horticulturae* 519: 191-197.
- Horton, R., F. Beese, and P. Wierenga. 1982. Physiological response of Chile Pepper to trickle irrigation. *Agronomy J.* 74: 551-554.
- Kawashina, H., and M. Nonaka. 2000. Characteristics of the thermal environment in sloping greenhouse. *Acta Horticulturae* 519:181-189.
- Kempkes, F. L., J. C. Baker, and N. J. Van de Braak. 1998. Control and modelling of vertical temperature distribution in greenhouse crops. *Acta Horticulturae* 456: 363-370.
- Mastalerz, J. W. 1977. *The Greenhouse Environment*. J. Wiley and Sons. New York. 629 p.
- Navas, L. M., S. De la Plaza, J. L. García, J. M. Duran, and N. Retamal. 1998. Formulation and sensitivity analysis of a dynamic model of the greenhouse climate validation for a mild mediteranean climate. *Acta Horticulturae* 456:305-312.
- Nederhoff, E. M., A. A. Rijsdijk, and R. de Graaf. 1992. Leaf conductance and rate of crop transpiration of greenhouse grown sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) as affected by carbon dioxide. *Scientia Horticulturae* 52: 283-301.
- Nilsen, E., and D. M. Orcutt. 1996. *Physiology of Plant Under Stress. Abiotic Factors*. John Wiley and Sons, New York. 689 p.
- Pezeshki, S. R., and F. J. Sundstrom. 1988. Effect of soil anaerobiosis on photosynthesis of *Capsicum annuum* L. *Scientia Horticulturae* 35: 27-35.

saturated. It is recommended that the use of atomizers be explored to achieve reductions in VPD and temperatures inside the greenhouses, especially between 11:30 and 15:00 h on high radiation days.

—End of the English version—



- Pita, G., M. Pontes, and L. Vargues. 1998. A Mediterranean greenhouse energy balance. *Acta Horticulturae* 456: 375-382.
- Van De Braak, N. J., F. L. Kempkes, and J. G. Breuer. 1998. Application of simulation models to optimize the control of thermal screens. *Acta Horticulturae* 456: 363-370.
- Wien, H. C. 1997. Peppers. In: *The Physiology of Vegetable Crops*. Wien, H. C. (ed) CABI Publishing. pp: 259-295.
- Willits, D. H. 2000. Constraints and limitations in greenhouse cooling: challenges for the next decade. *Acta Horticulturae* 534: 57-67.
- Zabri, A. W., and S. W. Burrage. 1998. The effects of vapour pressure deficit (VPD) and enrichment with CO₂ on photosynthesis, stomatal conductance, transpiration rate and water use efficiency (WUE) of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) grown by NFT. *Acta Horticulturae* 458: 351-356.