

Foliar temperature on husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) under water stress

Comportamiento de la temperatura foliar de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) bajo estrés hídrico

Pablo Zarazúa-Bolaños; Enrique Rico-García*; Adán Mercado-Luna;
Oscar Alatorre-Jacome; Perla Valeria Munguía-Fragoso; Genaro Martín Soto-Zarazúa

Departamento de Biosistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las Campanas s/n, colonia las Campanas, Querétaro, C.P. 76010, MÉXICO.

E-mail: ricog@uaq.mx, tel.: 01 52 442 3644443 (*Corresponding author).

Abstract

The efficiency of water use in intensive greenhouse production can mean reduction in fertilization costs and less environmental pollution, mainly salinization of soils. This efficiency depends on the type of control in the irrigation system, either periods, solar radiation, ambient temperature, water availability in the substrate or by algorithms that combine some of the variables mentioned. However, all these variables are exogenous to the crop and it is the crop which presents water demand and the need for nutrients; therefore, phytomonitoring systems measuring the variables of the crop should be used to control irrigation in greenhouses. This research studies the foliar temperature as a parameter that contributes to the control of an irrigation system. A husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) crop, grown on pumice stone, was subjected to different periods without irrigation 0, 24, 48 and 72 hours. Foliar temperature was measured using an infrared sensor. Thermal gradients between treatments were detected, indicating that foliar temperature of the crop can be used as extra variable for irrigation control. The correlation coefficient (R^2) between foliar temperature and greenhouse climate variables (relative humidity, solar radiation and ambient temperature) was calculated; for the first two R^2 was less than 0.47 and R^2 for air temperature values were between 0.65 and 0.75.

Keywords:
phytomonitoring,
infrared, statistical
correlations, irrigation.

Resumen

La eficiencia en el aprovechamiento del agua en la producción intensiva bajo invernadero puede significar reducción de costos en la fertilización y menor contaminación ambiental, principalmente de suelos por salinización. Esta eficiencia depende del tipo de control en el sistema de riego, ya sea tiempos, radiación solar, temperatura ambiente, disponibilidad de agua en el sustrato o por algoritmos que combinan algunas de las variables mencionadas. Sin embargo, todas estas variables son exógenas al cultivo y es éste el que presenta la demanda hídrica y la necesidad de nutrientes; por tanto, los sistemas de fitomonitorio, que miden las variables del cultivo, deberían utilizarse para controlar el riego en invernaderos. En esta investigación se estudia la temperatura foliar como parámetro que coadyuve al control de un sistema de riego. Se sometió un cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.), plantado en piedra pómez, a distintos tiempos sin riego: 0, 24, 48 y 72 horas. Se midió la temperatura foliar por medio de un sensor infrarrojo. Se detectaron gradientes térmicos entre los distintos tratamientos, lo que indica que la temperatura foliar del cultivo puede ser empleada como variable extra para el control del riego. Se calculó el coeficiente de correlación (R^2) entre la temperatura foliar y las variables del clima del invernadero: humedad relativa, radiación solar y temperatura ambiente; para las dos primeras R^2 fue menor de 0.47 y para la temperatura del aire R^2 mostró valores entre 0.65 y 0.75.

Palabras clave:
fitomonitorio,
infrarrojo, correlaciones
estadísticas, irrigación.



Introduction

The efficient use of water and fertilizers represent both economic advantages for producers and environmental advantages for society. This efficiency depends largely on the type of control used in the irrigation system. For this purpose, there are those that work by scheduling the irrigation periods, by measuring any physical characteristics (room temperature, solar radiation, relative humidity of the substrate or soil), and those that are controlled by algorithms and models that combine the measurement of some of the mentioned variables; or in extreme cases, only the experience of producers is taken into account (López-López, Arteaga-Rámirez, Vázquez-Peña, López-Cruz, & Sánchez-Cohen, 2010). However, all these factors are exogenous to the crop, and here is where the phenomenon of water demand and the need for nutrients occurs. Therefore, when using phytomonitoring systems, incorporating crop variables, they should also be used to control irrigation in greenhouses. Based on the evidence found by Ünlü, Kanber, Kapur, Tekin, and Levent (2011), it is known that there is a direct relationship between foliar temperature and soil water content.

This phenomenon is particularly important because it determines an index of measurable water stress on the plant. Dejonge, Taghvaeian, Thomas, and Comas (2015) found high correlation between the temperature of a maize crop and the foliar water potential ($R^2 = 0.895$).

Thus, it is possible to use the foliar temperature as an extra indicator of the plant water condition; which it is likely to be used for irrigation scheduling (Cremona, Stützel, & Kage, 2004). Additionally, it is desirable to determine the relation of foliar temperature and environmental variables (room temperature, relative humidity, and solar radiation); because these may explain the water stress of the plant and directly influence the moisture content in the soil (Alpi & Tognoni, 1991). However, there are methodological limitations for the use of foliar temperature as indirect estimator of other variables, because its measurement is complex because the temperature of leaves depends on the orientation, exposure to direct sunlight, age, among others considerations (Wang & Deltour, 2004). Therefore, situations are different for each leaf, making it difficult to determine a single value for the entire crop. The present research studies the case of foliar temperature as additional potential parameter for greenhouse irrigation control for husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.).

Materials and methods

Description of the study site

The research was conducted at the Campus Amazcala of the Faculty of Engineering of the Universidad

Introducción

La eficiencia en el aprovechamiento del agua y los fertilizantes representan tanto ventajas económicas para los productores como ambientales para la sociedad. Esta eficiencia depende en gran medida del tipo de control empleado en el sistema de riego. Para este propósito, existen aquellos que operan por tiempos de medición directa de alguna característica física (temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa del sustrato o suelo), y también los que son controlados por algoritmos y modelos que combinan la medición de algunas de las variables mencionadas; o en el extremo, solo se toma en cuenta la experiencia de los productores (López-López, Arteaga-Rámirez, Vázquez-Peña, López-Cruz, & Sánchez-Cohen, 2010). Sin embargo, todos estos factores son exógenos al cultivo, y es en éste en el que se presenta el fenómeno de la demanda hídrica y la necesidad de nutrientes. Por tanto, al utilizar sistemas de fitomonitorio, que incorporan las variables del cultivo, deberían usarse también para controlar el riego en invernaderos. Con base en la evidencia encontrada por Ünlü, Kanber, Kapur, Tekin, y Levent (2011) se conoce que existe relación directa entre la temperatura de la hoja y el contenido de agua en el suelo.

Este fenómeno es particularmente importante, ya que determina un índice de estrés hídrico medible en la planta. Dejonge, Taghvaeian, Thomas, y Comas (2015) encontraron correlación alta entre la temperatura de un cultivo de maíz y el potencial hídrico de su hoja ($R^2 = 0.895$).

De esta manera, es posible utilizar la temperatura foliar como indicador extra del estado hídrico de la planta; el cual es factible de ser utilizado para la programación de riegos (Cremona, Stützel, & Kage, 2004). Adicionalmente, es deseable determinar la relación de la temperatura foliar con las variables ambientales (temperatura ambiental, humedad relativa y radiación solar); ya que éstas pueden explicar el estrés hídrico de la planta e influyen directamente en el contenido de humedad en el suelo (Alpi & Tognoni, 1991). No obstante, existen limitaciones metodológicas para el uso de la temperatura foliar como estimador indirecto de otras variables, ya que su medición es complicada debido a que la temperatura de las hojas depende de la orientación, exposición a la radiación solar directa, edad, entre otras consideraciones (Wang & Deltour, 2004). Por tanto, las situaciones son diferentes para cada hoja, por lo cual es difícil determinar un valor único para todo el cultivo. En esta investigación se estudia el caso de la temperatura foliar del cultivo como parámetro potencial extra para el control de riego bajo invernadero en el cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.).

Autónoma de Querétaro, which is located in the community of Amazcala in the municipality of El Marques, Querétaro, Mexico. The coordinates of the study area are 100° 16' WL, 20° 42' NL, at an altitude of 1,920 m. The average temperature in this place is 21 °C, with predominantly temperate semi-dry climate.

A chapel type greenhouse was used with an area of 108 m². It consists of a span whose dimensions are 9 m wide by 12 m long; gutter height of 4.2 m and aerial height of 6.2 m. Two side windows (7.5 m wide and 2.2 m high), and a roof window of 12 m wide and 0.5 m high, which opens and closes manually. They are covered with anti-aphid mesh to prevent insects from entering. This greenhouse is covered with diffuse plastics of 200 microns in thickness. The ground was covered with white mulch.

The greenhouse had an automated drip irrigation system. A Programmable Logic Controller (PLC) Allen-Bradley® 1760-L12AWA was used for the scheduling of irrigation. Self-compensating and antidrain drippers were used (one per plant), with a flow rate of 4 L·h⁻¹, connected to each other with a 16 mm hose.

Biological material

We use seeds of husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) variety Gran Esmeralda, which had 85 % germination rate. Planting was held on January 25, 2012, using as substrates “peat moss” at the bottom of the hole, and perlite, to cover the seed. We used expanded polystyrene trays with capacity of 200 holes. Before planting, trays disinfection was performed using FULL-GRO with a concentration of 2.5 to 3.5 mL·L⁻¹ of water. A seed was placed in each hole.

Transplanting

Transplanting took place on March 15, 2012, staying 50 days in nursery; this due to the adverse conditions in the environment for seed germination. Pumice stone was used as substrate for transplantation, it was added to the black polyethylene bags (10 to 12 L), and a seedling was placed in each bag.

Nutrient solution

To produce quality seedlings, they were irrigated with Steiner's universal nutrient solution at 50 % (Magdaleno-Villar et al., 2006), and this solution was kept until 35 days after transplanting (dat). Later, it was changed to Steiner solution at 100 %, and remained so until the end of the experiment.

Evaporation of the substrate

Before establishing the periods of the treatments, an experiment was performed to observe the evaporation

Materiales y métodos

Descripción del sitio de estudio

La investigación se desarrolló en el Campus Amazcala de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, el cual se encuentra en la comunidad de Amazcala en el municipio de El Marques, Querétaro, México. Las coordenadas del área de estudio son 100° 16' LO, 20° 42' LN a 1,920 m de altitud. La temperatura media en este municipio es de 21 °C, con clima predominante templado semiseco.

Se utilizó un invernadero experimental tipo capilla, con un área de 108 m². Está constituido por una nave cuyas dimensiones son 9 m de ancho por 12 m de largo; tiene 4.2 m de altura a la canaleta y 6.2 m de altura cenital. Cuenta con dos ventanas laterales de 7.5 m de ancho y 2.2 m de alto, y una cenital de 12 m de ancho y 0.5 m de alto, las cuales abren y cierran manualmente. Además, están cubiertas con malla antiáfidos para evitar la entrada de insectos. Dicho invernadero está cubierto por plástico difuso de 200 micras de espesor. El suelo cuenta con acolchado de color blanco.

El invernadero tuvo un sistema automatizado de riego por goteo. Para la programación de los riegos se utilizó un Controlador Lógico Programable (PLC) marca Allen-Bradley® modelo 1760-L12AWA. Se utilizaron goteros autocompensantes y antidrenantes (uno por planta), con un caudal de 4 L·h⁻¹, conectados entre sí con una manguera de 16 mm.

Material biológico

Se utilizó semilla de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) variedad Gran Esmeralda, que presentó 85 % de germinación. La siembra se llevó a cabo el 25 de enero de 2012, utilizando como sustratos “peat moss”, en el fondo del alveolo, y perlita, para cubrir la semilla. Se utilizaron charolas de poliestireno expandido de alta resistencia de 200 alveolos. Antes de la siembra se realizó la desinfección de charolas, utilizando FULL-GRO con una concentración de 2.5 a 3.5 mL·L⁻¹ de agua. Se colocó una semilla por alveolo.

Trasplante

El trasplante se llevó a cabo el 15 de marzo de 2012, permaneciendo 50 días en almácigo; esto debido a las condiciones adversas en el ambiente para la germinación de las semillas. Como sustrato para el trasplante se utilizó piedra pómez, el cual fue introducido en bolsas negras de polietileno (10 a 12 L), y en cada una de ellas se colocó una plántula.

of the substrate (pumice stone) inside the greenhouse, and based on the results determine the duration of each treatment. The test was conducted from April 3 to 9, 2012, taking 4 kg of dry substrate and saturating it in water for 24 h; then, it was drained until being superficially dry, it was placed in a black plastic bag and weighed with a scale (Avery Weigh-Tronix Model 3632B-50) inside the greenhouse. The weight was monitored by taking readings every hour to observe the evaporation of water contained in the substrate. After analyzing the results, treatments were established as mentioned in the experimental design.

Experimental design

Latin square design (Figure 1) was implemented using four treatments, which consisted of subjecting the plant to water stress without reaching the wilting point. Treatments consisted of leaving the plant without watering during different time periods. A total of eight plants were used per treatment, and four replications were performed using a total of 128 plants.

$T_3 R_1$	$T_1 R_2$	$T_2 R_3$	$T_4 R_4$
$T_4 R_1$	$T_2 R_2$	$T_3 R_3$	$T_1 R_4$
$T_1 R_1$	$T_3 R_2$	$T_4 R_3$	$T_2 R_4$
$T_2 R_1$	$T_4 R_2$	$T_1 R_3$	$T_3 R_4$

Figure 1. Treatments distribution inside the greenhouse.
Figura 1. Distribución de los tratamientos dentro del invernadero.

Three replications were performed at different phenological stage of the crop. Treatments for each of the replications are shown in Table 1.

Foliar temperature

A handheld camera model FLIR i5, FLIR® was used; which is a thermometer with infrared sensor that measures the temperature at distance, based on the detection of thermal electromagnetic radiation. It has lower thermal sensitivity of 0.1 °C and measuring range of 0 to + 250 °C, with accuracy ± 2 °C. The foliar temperature was measured manually each hour taking three measurements per plant (different leaves), and at different heights as a way to measure the foliar temperature. It is important to note that the measurement of all plants in the treatments took 20 minutes on average. The data obtained with the infrared sensor were stored in an Excel spreadsheet for further analysis.

Solución nutritiva

Para la obtención de plántulas de calidad se irrigaron con la solución nutritiva universal de Steiner al 50 % (Magdaleno-Villar et al., 2006), y se mantuvo esta solución hasta los 35 días después del trasplante (ddt). Posteriormente, se cambió a la solución de Steiner al 100 %, y así permaneció hasta el final del experimento.

Evaporación del sustrato

Antes de establecer cuáles serían los tiempos de los tratamientos se realizó un experimento con el fin de observar la evaporación del sustrato (piedra pómez) al interior del invernadero, y con base en los resultados determinar la duración de cada tratamiento. La prueba se realizó del 3 al 9 de abril de 2012, tomando 4 kg de sustrato seco y saturándolo en agua por 24 h; posteriormente, se dejó drenar hasta lograr que superficialmente se encontrara seco, se colocó en una bolsa negra de polietileno y se pesó con una báscula (Avery Weigh-Tronix modelo 3632B-50) al interior del invernadero. Se monitoreó su peso tomando lecturas cada hora con el fin de observar la evaporación del agua contenida en el sustrato. Una vez analizados los resultados se establecieron los tratamientos como se menciona en el diseño experimental.

Diseño experimental

Se implementó el diseño cuadrado latino (Figura 1) utilizando cuatro tratamientos, los cuales consistieron en someter a la planta a un estrés hídrico sin llegar al punto de marchitez permanente. Los tratamientos consistieron en dejar a la planta sin riego durante diferentes periodos de tiempo. Se utilizaron ocho plantas por tratamiento, y se realizaron cuatro repeticiones, utilizando un total de 128 plantas.

Se realizaron tres repeticiones del experimento a diferente etapa fenológica del cultivo. Los tratamientos para cada una de las repeticiones se muestran en el Cuadro 1.

Temperatura foliar

Se utilizó una cámara de mano modelo FLIR i5, marca FLIR®; el cual es un termómetro con sensor infrarrojo que mide la temperatura a distancia, basada en la detección de radiación térmica electromagnética. Cuenta con sensibilidad térmica menor de 0.1 °C y rango de medida de 0 a + 250 °C, con precisión ± 2 °C. La medición de la temperatura foliar se hizo cada hora de manera manual tomando tres mediciones por planta en hojas distintas, y a diferentes alturas como una forma de medir la temperatura del follaje. Es importante notar que la medición de todas las plantas en los tratamientos tomó 20 minutos en promedio. Los datos

Table 1. Duration of treatments for each replication of the experiment.
Cuadro 1. Duración de los tratamientos para cada repetición del experimento.

Treatments / Tratamientos	Replications of the experiment / Repeticiones del experimento		
	1	2	3
T1	Control	Control	Control
T2	16 hours without irrigation / 16 horas sin riego	16 hours without irrigation / 16 horas sin riego	24 hours without irrigation / 24 horas sin riego
T3	32 hours without irrigation / 32 horas sin riego	32 hours without irrigation / 32 horas sin riego	48 hours without irrigation / 48 horas sin riego
T4	48 hours without irrigation / 48 horas sin riego	48 hours without irrigation / 48 horas sin riego	72 hours without irrigation / 72 horas sin riego

1 Carried out from 10 to 13 April 2012 (26 to 29 dat). / 1 Realizada los días 10 al 13 de abril de 2012 (26 a 29 ddt).

2 Carried out from 16 to 19 May 2012 (62 to 65 dat). / 2 Realizada los días 16 al 19 de mayo de 2012 (62 a 65 ddt).

3 Carried out on 30, 31 May and 1, 2 June 2012 (76 to 79 dat). / 3 Realizada los días 30, 31 de mayo y 1, 2 de junio de 2012 (76 a 79 ddt).

For the first replication, 666 mL of water were applied as 100 % of irrigation; for the second 1,500 mL and measurements were made continuously, every hour, from 9:00 am on the first day to the end of each treatment (Table 1). For the third replication, 1,800 mL of water were applied as 100 % irrigation and measurements were made between 10:00 and 18:00 h, the first two days, and from 10:00 to 17:00 h the last two days due to rain after these hours, resulting in a decreasing of the temperature of the atmosphere, being very close to the foliar temperature. On this last replication, only the day period of frank solar radiation was measured. Leaf temperature measurements before application of treatments and at the end of each treatment were also conducted.

Measuring climate variables

To measure air temperature, relative humidity, solar radiation and wind speed outside the greenhouse, a Vantage Pro2 Wireless weather station Model 6152 DAVIS® was used. The station was installed outdoors at about 8 m high and 50 m away from the greenhouse.

The measurement of air temperature, relative humidity and solar radiation inside the greenhouse was carried out using a WatchDog® 1000 Series Micro Station, because this model has built-in sensors of temperature and relative humidity, and also four ports for external sensors. The data is safely stored in nonvolatile memory and data transfer is by means of direct cable connection. The software SpecWare 9 Basic is required for programming the micro station. Equipment specifications are temperature range: from -40 to 85 °C; precision: ± 0.6 °C in a range of -20 to 50 °C, otherwise ± 1.2 °C; relative humidity range: 0 – 100 % and precision: ± 3 % (25 °C, 10 - 90 %), otherwise ± 5 %. A Spectrum® Technologies sensor connected to the micro station was used for measuring solar

obtenidos con el sensor infrarrojo fueron almacenados en una hoja de Excel para su posterior análisis.

Para la primera repetición se aplicaron 666 mL de agua como el 100 % de riego; para la segunda 1,500 mL y las mediciones se hicieron de manera continua, cada hora, a partir de las 9:00 h del primer día hasta el final de cada tratamiento (Cuadro 1). Para la tercera repetición se aplicaron 1,800 mL de agua como el 100 % de riego y las mediciones se hicieron de 10:00 a 18:00 h los dos primeros días, y de 10:00 a 17:00 h los dos últimos días debido a que se presentó lluvia después de esas horas, ocasionando que la temperatura del ambiente disminuyera siendo muy cercana a la temperatura foliar. En esta última repetición solo se midió el periodo diurno de franca radiación solar. También se realizaron mediciones de temperatura foliar antes de la aplicación de los tratamientos y al término de cada uno de ellos.

Medición de las variables de clima

Para la medición de la temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento al exterior del invernadero, se utilizó una estación meteorológica Wireless Vantage Pro2 modelo 6152 marca DAVIS®. La estación se encuentra instalada a la intemperie a 8 m de altura, y a 50 m de distancia del invernadero, aproximadamente.

La medición de temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar al interior del invernadero, se realizó con micro estación WatchDog® serie 1000, ya que este modelo tiene integrados sensores de temperatura y humedad relativa, además cuenta con cuatro puertos para sensores externos. Los datos se almacenan de forma segura en una memoria no volátil y la transferencia de datos es con conexión directa por cable. Se requiere el software SpecWare 9 Basic para la programación de la

radiation. It measures the solar radiation between 300 and 1,100 nanometers. It has a range of 0-1500 W·m⁻² and accuracy of ± 5 %. All these data were captured every 15 minutes. The WatchDog® 1000 series micro stations and solar radiation sensor were placed in the middle of the greenhouse, at the height of the apex of the crop for the three measurements.

Statistical analysis

The simple linear regression method was used, and the correlation coefficient was calculated to determine the statistical adjustment between foliar temperature and climatic variables (temperature, humidity and solar radiation) inside the greenhouse, using Excel.

An analysis of variance and Tukey mean comparison with a significance level of 0.05 was performed to determine whether there are differences between the treatments provided. This took place at the beginning of each replication of the experiment, at the beginning and end of each treatment and at the end of each replication. The statistical package used was the Origin V8.

Results and discussion

Evaporation of substrate

Water retention in the soil was 25 %. The experiment was stopped after 169 hours. After 48 h, approximately, the substrate had lost 50 % of water retained (Figure 2). In the following 121 h only 40 % of the water was evaporated. The loss of 50 % of the water contained in the substrate was taken as criterion of irrigation. The periods to measure foliar temperature were established, based on this experiment.

It is important to mention that in this study, only the substrate without plant was considered, so it may be assumed that the period of loss of water in the substrate, with crops already established, would be accelerated due to evapotranspiration (evaporation of soil and transpiration of the crop); however, in the experiment, with crops, the periods increased from 48 to 72 h without the plant reaching its wilting point.

Foliar temperature

Data for the first two replications show no significant difference between the temperatures from the different treatments, primarily during night time due to the absence of solar radiation and low crop transpiration. Furthermore, it is considered that measurement errors occurred affecting the data; and for this reason, only the values of the third measurement, where measures were taken only during the period of frank solar radiation, are shown.

micro estación. Las especificaciones del equipo son rango de temperatura: de -40 a 85 °C; precisión: ± 0.6 °C en un rango de -20 a 50 °C, de lo contrario ± 1.2 °C; rango de humedad relativa: 0 - 100 % y precisión: ± 3 % (25 °C, 10 - 90 %), de lo contrario ± 5 %. Para la medición de la radiación solar se utilizó un sensor Spectrum® Tecnologías conectado a la micro estación. Mide la radiación solar entre 300 y 1,100 nanómetros. Tiene un rango de 0 a 1500 W·m⁻² y precisión de ± 5 %. Todos estos datos se capturaron con frecuencia de 15 minutos. La micro estación WatchDog® serie 1000 y el sensor de radiación solar se colocaron en el centro del invernadero, a la altura del ápice del cultivo para las tres mediciones.

Análisis estadístico

Se utilizó el método de regresión lineal simple, y se calculó el coeficiente de correlación para determinar el ajuste estadístico entre temperatura foliar y las variables climáticas (temperatura, humedad y radiación solar) al interior del invernadero, utilizando Excel.

Se realizó un análisis de varianza y de comparación de medias de Tukey con un nivel de significancia de 0.05, para determinar si existen diferencias entre los tratamientos establecidos. Esto se llevó a cabo al inicio de cada repetición del experimento, cuando iniciaron los tratamientos, al terminar cada uno de ellos y al final de cada repetición. El paquete estadístico que se utilizó fue el Origin V8.

Resultados y discusión

Evaporación del sustrato

La retención de agua en el sustrato fue del 25 %. El experimento se suspendió cuando habían transcurrido 169 h. A las 48 h, aproximadamente, el sustrato había perdido el 50 % de agua retenida (Figura 2). En las siguientes 121 h sólo se evaporó el 40 %. La pérdida del 50 % del agua contenida en el sustrato se tomó como criterio de riego. Basados en este experimento se plantearon los tiempos para la medición de la temperatura foliar.

Debe notarse que en este ensayo sólo se consideró el sustrato sin planta, por lo que pudiera suponerse que el periodo de pérdida de agua en el sustrato, ya establecidos los cultivos, sería más acelerada debido a la evapotranspiración (en conjunto evaporación más la transpiración del cultivo); sin embargo, en el experimento, con cultivo, los tiempos se incrementaron de 48 a 72 h sin que la planta llegara a su punto de marchitez permanente.

Temperatura foliar

Los datos correspondientes a las dos primeras repeticiones no muestran diferencias significativas

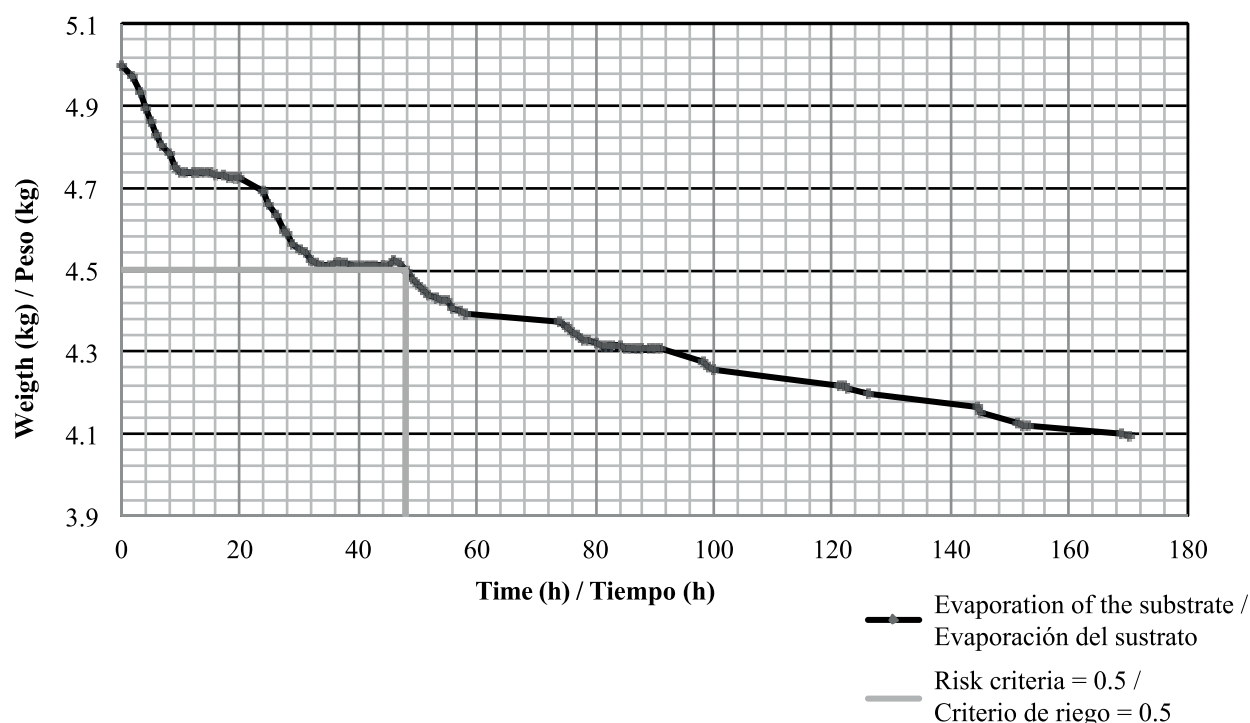


Figure 2. Evaporation of the substrate.

Figura 2. Comportamiento de la evaporación del sustrato.

Measurements of crop foliar temperature, before application of the treatments was uniform with no significant differences. Once the treatments were added, results show clear significant differences with no irrigation, increasing crop foliar temperature (Figure 3). This occurs due to the lack of irrigation, water stress, and the period of absence of irrigation; it is also evident during the hours of sunlight. Crop recovery was observed after irrigation was restored (Figure 4).

The statistical correlations between foliar temperature and greenhouse climate variables: relative humidity, solar radiation and ambient temperature showed small values for the first two: relative humidity with R^2 of 0.42, 0.47, 0.30 and 0.22, solar radiation with R^2 of 0.22, 0.24, 0.21 and 0.22 for treatments T1, T2, T3 and T4, respectively. 0.74, 0.75, 0.65 and 0.67 for T1, T2, T3 and T4 treatment (Figure 5). In the case of room temperature, the value R^2 was acceptable and consistent: 0.74, 0.75, 0.65 and 0.67 for the treatments T1, T2, T3 and T4 respectively (Figure 5). The latter are consistent with those observed by Elsayed, Rischbeck and Schmidhalter (2015) founding R^2 values of 0.70 for moderate water stress and R^2 of 0.53 for severe water stress on a barley crop.

It should be noted that at the beginning and end of the day thermal gradients between treatments are smaller (Figure 4); which may indicate some dependence

entre las temperaturas de los distintos tratamientos, principalmente durante el periodo nocturno debido a la ausencia de radiación solar y la baja transpiración de cultivo. Además, se considera que se cometieron errores de medición que desvían los datos, por lo que sólo se muestran los valores de la tercera medición en la que únicamente se midió durante el periodo de franca radiación solar.

Las mediciones de la temperatura foliar del cultivo, antes de la aplicación de los tratamientos, era uniforme, sin diferencias significativas. Una vez que se administraron los tratamientos los resultados indican claras diferencias significativas con la ausencia de riego, incrementándose la temperatura foliar del cultivo (Figura 3). Lo anterior ocurre debido a la ausencia de riego, estrés hídrico, y al tiempo de ausencia de riego; también es más evidente durante las horas de radiación solar. Asimismo se observó la recuperación del cultivo una vez que se le restituyó el riego (Figura 4).

Las correlaciones estadísticas entre la temperatura foliar y las variables del clima del invernadero: humedad relativa, radiación solar y temperatura ambiente, mostraron valores pequeños para las dos primeras: humedad relativa con R^2 de 0.42, 0.47, 0.30 y 0.22, radiación solar con R^2 de 0.22, 0.24, 0.21 y 0.22 para los tratamientos T1, T2, T3 y T4, respectivamente. En el caso de temperatura ambiente se obtuvo el valor de R^2 aceptable y consistente: 0.74, 0.75, 0.65 y 0.67 para los

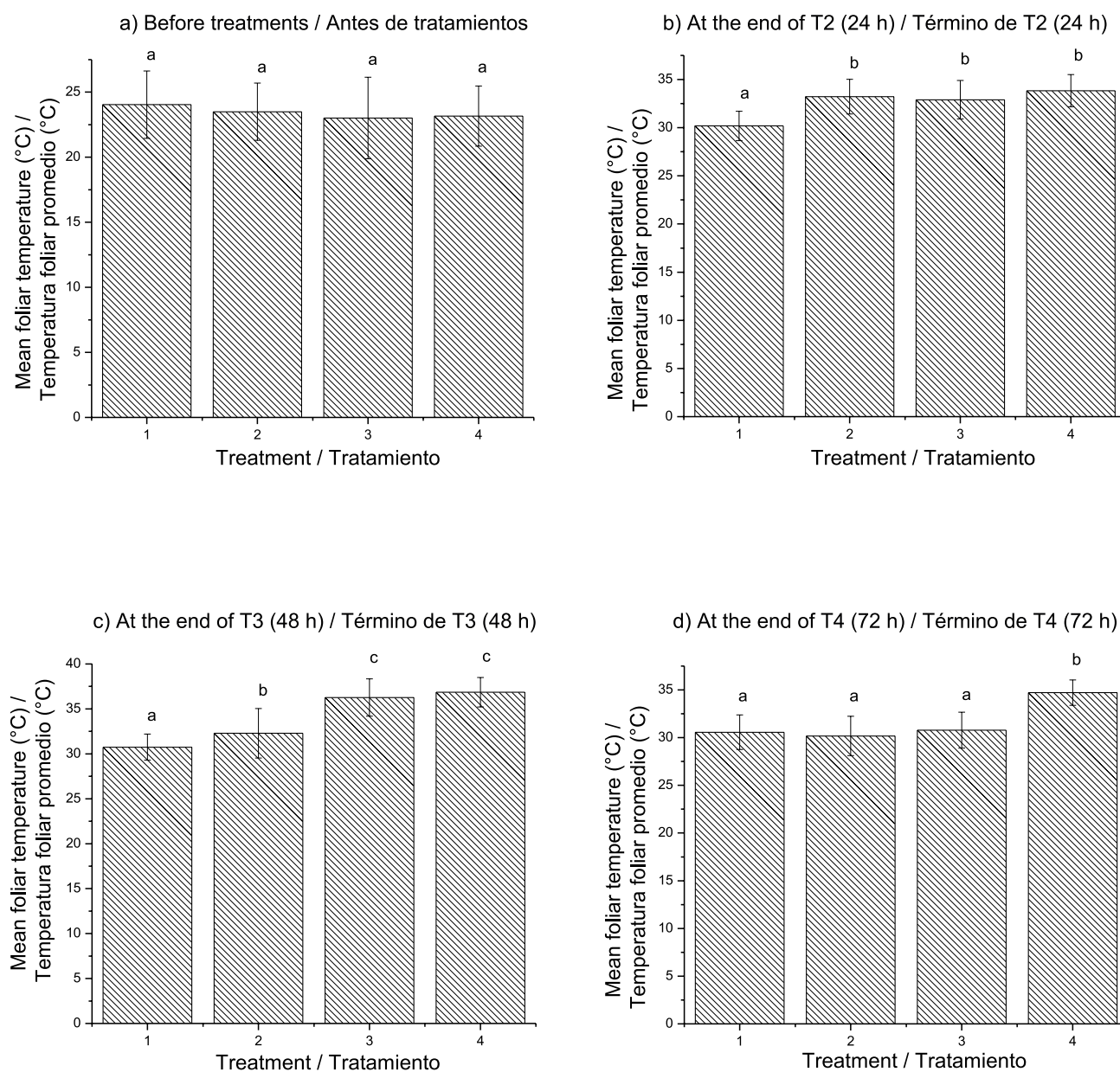


Figura 3. Análisis de varianza para las temperaturas de los tratamientos, antes y al término de cada uno de ellos.
Figure 3. Variance analysis for temperature before and at the end treatments.

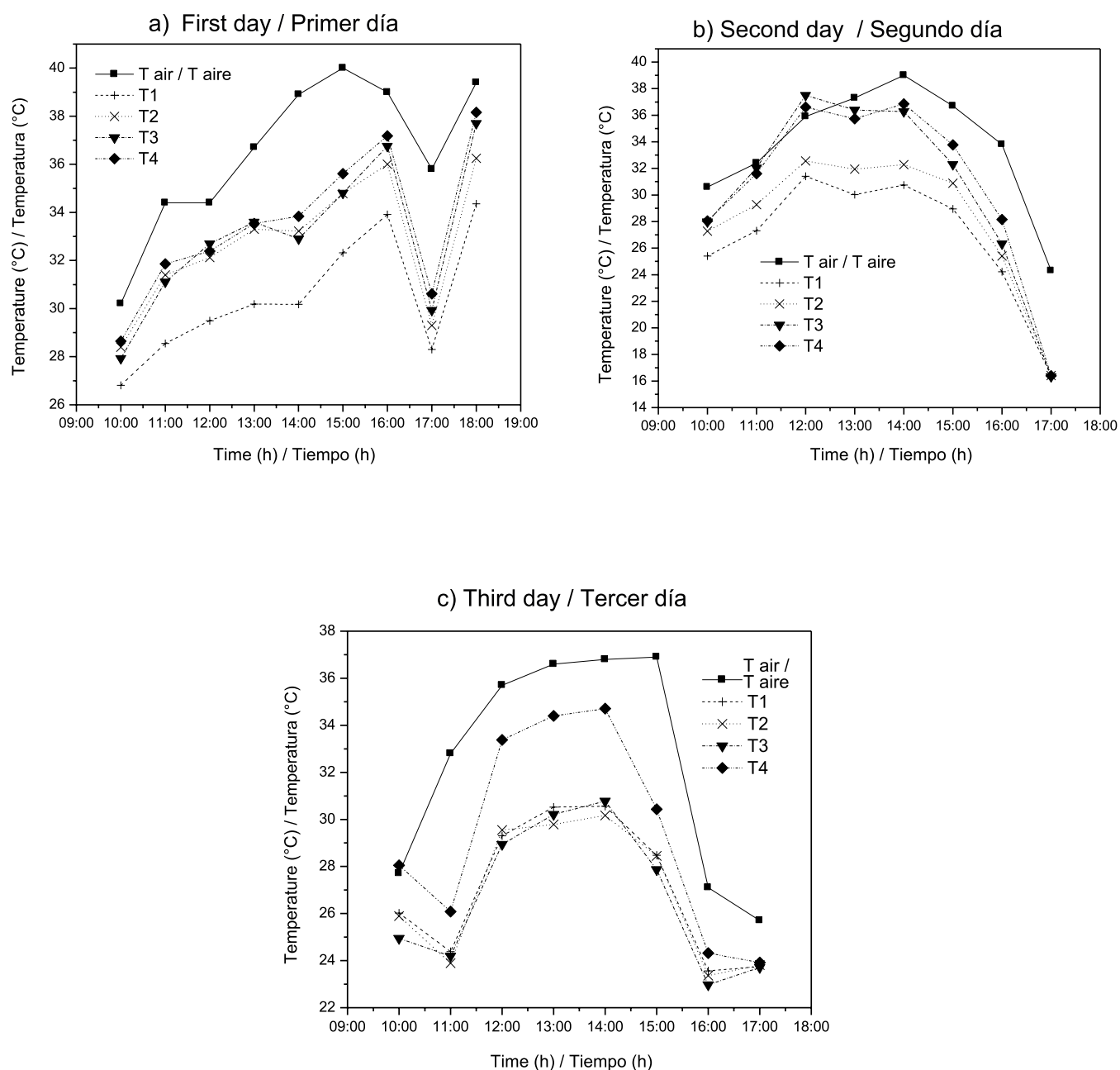


Figure 4. Temperature behavior for treatments on the third replication of the experiment.

Figura 4. Comportamiento de la temperatura foliar en cada tratamiento durante la tercera repetición del experimento.

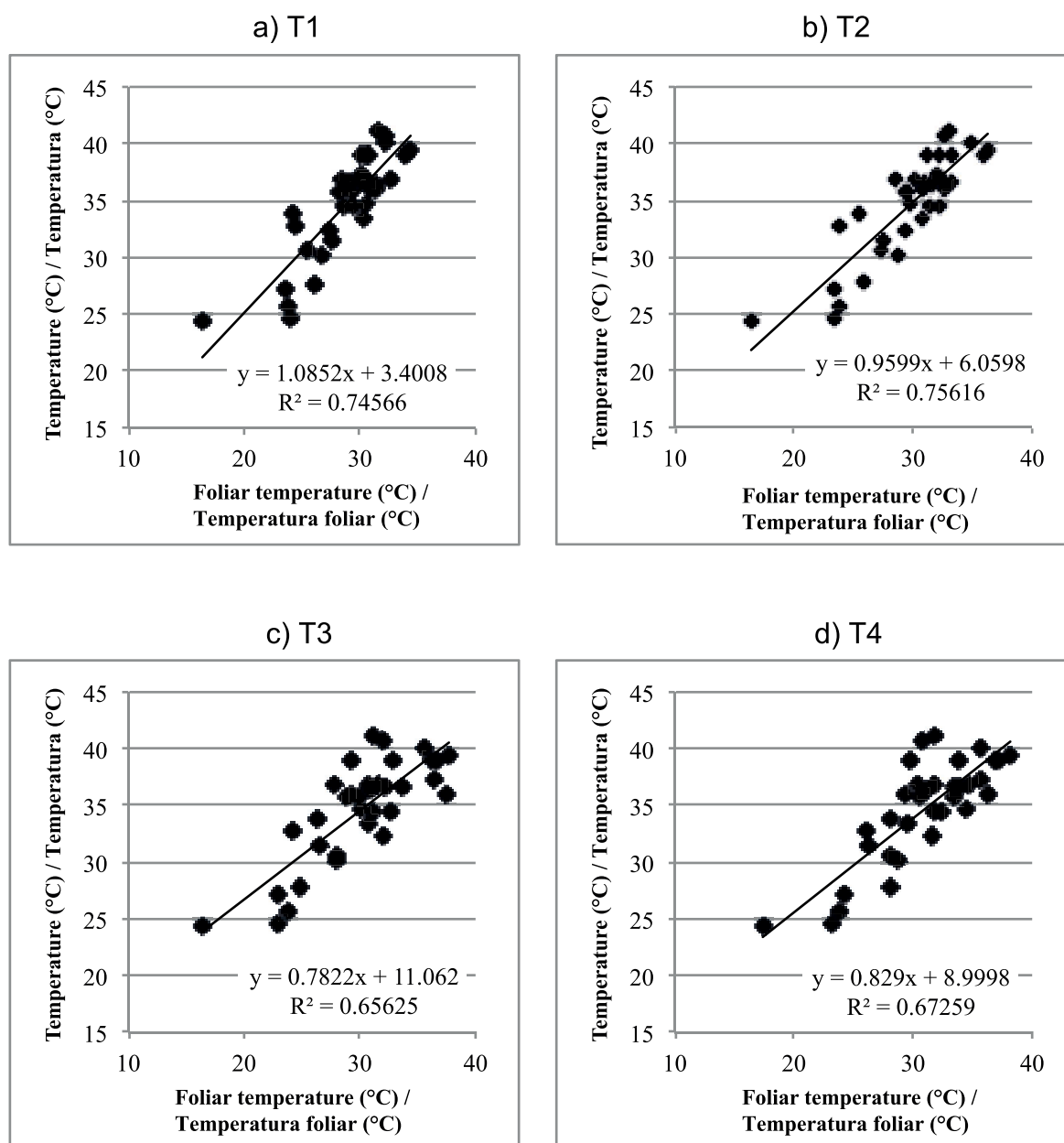


Figure 5. Linear regression models for foliar temperature and air temperature.

Figura 5. Modelos de regresión lineal entre la temperatura foliar y temperatura del aire.

between the crop temperature and solar radiation. However, the statistical correlation is very small, $R^2 \approx 0.22$, but some consistency in its value is noted.

For more data compression it must be considered that solar radiation during the three days of measurement inside the greenhouse were: first day 400, 600 and 100 $W \cdot m^{-2}$; second day, 400, 600 and 0 $W \cdot m^{-2}$; third day, 380, 600 and 50 $W \cdot m^{-2}$; for the start of the day, time of increased solar radiation and end of the day, respectively. For the relative humidity inside the greenhouse were: first day, 25 to 18 %; second day, 50 to

tratamientos T1, T2, T3 y T4 respectivamente (Figura 5). Estos últimos son consistentes con los observados por Elsayed, Rischbeck, y Schmidhalter (2015) donde encontraron valores de R^2 de 0.70 para estrés hídrico moderado y R^2 de 0.53 para estrés hídrico severo en un cultivo de cebada.

Nótese que al inicio y final del día los gradientes térmicos entre los distintos tratamientos son más pequeños (Figura 4); lo que puede indicar cierta dependencia entre la temperatura del cultivo y la radiación solar. Sin embargo, la correlación estadística es muy pequeña,

10 %; third day 50 to 18 %, always decreasing from the start to the end of the day. In this case one can see low values of humidity, which may explain that the crop temperature was always below room temperature in case of irrigation treatments. However, for treatments with no irrigation, foliar temperature tended to room temperature, without overcoming it; this could be due to a weak crop transpiration due to lack of water in the substrate.

Conclusions

The results confirm that the crop temperature can be used as a parameter indicating the water needs of the crop, and hence as a technical phytomonitoring.

Our results suggest to continuously measure the temperature of the crop with high-precision sensors, either with contact sensors or using photometric techniques, to identify minimum gradients and establish irrigation ranges. Although that was the main goal in this paper, we failed because the foliar temperature was measured discontinuously (hourly). Moreover, there was time shift of the measurements from one treatment to another, even with the plants of the same treatment due to the use of a single infrared meter. That may explain the low correlation found between foliar temperature and climate variables.

Acknowledgements

The authors thank the Faculty of Engineering of the Universidad Autónoma de Querétaro, for the funding to carry out this research.

End of English version

References / Referencias

- Alpi, A. & Tognoni, F. (1991). *Cultivo en invernadero*. Tercera edición. Mundi Prensa. España.
- Cremona, M. V., Stützel, H., & Kage, H. (2004). Irrigation scheduling of Koklrabi (*Brassica oleracea* var. Gongylodes) using crop water stress index. *HortScience*, 39(2), 276-279. Recuperado de <http://hortsci.ashspublications.org/content/39/2/276.full.pdf+html>
- Dejonge, K. C., Taghvaeian, S., Thomas, J. T., & Comas, L. C. (2015). Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize. *Agricultural Water Management*. 156, 51-62. doi: 10.1016/j.agwat.2015.03.023
- Elsayed, S., Rischbeck, P., & Schmidhalter, U. (2015). Comparing the performance of active and passive reflectance sensors to assess the normalized

$R^2 \approx 0.22$, pero se nota cierta consistencia en su valor.

Para mayor compresión de los datos debe considerarse que la radiación solar durante los tres días de medición al interior del invernadero fueron: primer día 400, 600 y 100 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; segundo día, 400, 600 y 0 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; tercer día, 380, 600 y 50 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; para el inicio del día, hora de mayor radiación solar y final del día, respectivamente. En el caso de la humedad relativa al interior del invernadero fueron: primer día, 25 a 18 %; segundo día, 50 a 10 %; tercer día, 50 a 18 %, siempre disminuyendo del inicio del día al final. Para este caso se pueden ver valores bajos de humedad, lo que puede explicar que la temperatura del cultivo siempre estuvo por debajo de la temperatura ambiente para el caso de los tratamientos con riego. Sin embargo, para los tratamientos a los que se les suspendió el riego la temperatura foliar tendía a la temperatura ambiente, sin llegar a superarla; esto se pudiera explicar por una débil transpiración del cultivo debido a la falta de agua en el sustrato.

Conclusiones

Los resultados corroboran que la temperatura del cultivo se puede emplear como un parámetro que indique las necesidades hídricas del cultivo, y por tanto, como una técnica de fitomonitorio.

Nuestros resultados sugieren medir de manera continua la temperatura del cultivo con sensores de alta precisión, ya sean de contacto o por técnicas fotométricas, de manera que se puedan identificar gradientes mínimos y establecer rangos de riego. Aun cuando en el presente trabajo ese era el objetivo principal, no se lograron identificar ya que la temperatura foliar se medía de manera discontinua (cada hora). Además, existía desplazamiento en el tiempo de las mediciones de un tratamiento a otro, incluso dentro de las plantas del mismo tratamiento, debido a la utilización de un único medidor infrarrojo. Este mismo hecho puede explicar la baja correlación que se encontró entre la temperatura foliar con las variables de clima.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, por el financiamiento interno para llevar a cabo esta investigación.

Fin de la versión en español

- relative canopy temperature and grain yield of drought-stressed barley cultivars. *Field Crops Research*, 177, 148-160. doi: 10.1016/j.fcr.2015.03.010
- López-López, R., Arteaga-Rámirez, R., Vázquez-Peña, M. A., López-Cruz, I. L., & Sánchez-Cohen, I. (2010). Evapotranspiración del cultivo de tomate de cascara (*Physalis ixocarpa* Brot.) estimada mediante el potencial mátrico del suelo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(2), 157-168. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802010000200009&script=sci_arttext
- Magdaleno-Villar, J. J., Peña-Lomelí, A., Castro-Brindis, R., Castillo-González, A. M., Galvis-Spinola, A., Ramírez-Pérez, F., & Hernández-Hernández, B., (2006). Efecto de soluciones nutritivas sobre el desarrollo de plántulas de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 12(2), 223-229. Recuperado de http://www.chapingo.mx/revistas/horticultura/-contenido.php?_articulo=71&idrevistas=1&id_revistas_numero
- Ünlü, M., Kanber, R., Kapur, B., Tekin, S., & Levent, K. D. (2011). The crop water stress index (CWSI) for drip irrigated cotton in a semi-arid region of Turkey. *African Journal of Biotechnology*, 10(12), 2258-2273. doi: 10.5897/AJB10.1675
- Wang, S., & Deltour, J. (2004). Leaf temperature modeling of greenhouse grown tomatoes. *International Agricultural Engineering Journal*, 13(1&2), 64-70. Recuperado de <http://public.wsu.edu/~sjwang/aej4leaf.pdf>