

COMPARACIÓN DE CUBIERTAS DE INVERNADEROS EN RELACIÓN CON CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE TOMATE

GREENHOUSE COVER COMPARISON ON TOMATO GROWTH AND YIELD

Alejandro **Zermeño-González**^{1*}, Pedro Octavio **Kau-Pérez**¹, Juan Plutarco **Munguía-López**²,
Homero **Ramírez-Rodríguez**³, Martín **Cadena-Zapata**⁴

¹Departamento de Riego, ³Departamento de Horticultura, ⁴Departamento de Maquinaria Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila. 25315 México. (azermenog@hotmail.com), ²Centro de Investigación en Química Aplicada, Boulevard Enrique Reyna 140, Colonia San José de los Cerritos, Saltillo, Coahuila. 25194 México.

RESUMEN

El cultivo en invernadero permite obtener rendimientos mayores que los obtenidos a campo abierto, debido a un control mejor del ambiente. Bajo la hipótesis de que el color y las características del material de cubierta en invernadero de tipo túnel para producción de tomate afectan la transmisión de la radiación solar recibida por las plantas y por lo tanto crecimiento y rendimiento; el objetivo del estudio fue evaluar intensidad y distribución espectral de la radiación solar transmitida (Photosynthetic active radiation, PAR) a través de cuatro cubiertas de invernadero con características físicas y color diferentes, sobre contenido relativo de clorofila, tasa de fotosíntesis, crecimiento y rendimiento de un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Para medir la intensidad de la radiación solar (400 a 700 nm) transmitida por cada cubierta se hizo la instalación de sensores quantum en el interior de invernaderos de tipo túnel; se determinó con un espectro radiómetro la característica espectral en la misma banda de radiación solar. El efecto de las cubiertas se analizó con un diseño completamente al azar con las repeticiones por tratamiento dentro de cada invernadero. Las plantas en los túneles con cubiertas de polietileno difuso de alta densidad de pigmentación roja y azul recibieron menos radiación solar en la banda de 400 a 700 nm de longitud de onda. Además, la radiación de 400 a 550 nm recibida por las plantas en el invernadero con cubierta de pigmentación roja fue mucho menor que la recibida por plantas bajo otras cubiertas. Las plantas en el invernadero con cubierta de polietileno azul recibieron menos radiación solar de la amplitud 600 a 700 nm. Esto no afectó el contenido de clorofila ni la

ABSTRACT

Greenhouse cultivation allows higher yields than those obtained in the open field, due to better control of the environment. The hypothesis was that the colour and characteristics of the greenhouse cover material for tomato production affect the transmission of solar radiation received by the plants, and therefore growth and yield. The objective was to evaluate the intensity and spectral distribution of transmitted solar radiation (Photosynthetic active radiation, PAR) through four greenhouse covers with different physical characteristics and colour, on relative chlorophyll content, photosynthesis rate, growth and yield of a tomato crop (*Solanum lycopersicum* L.). To measure the intensity of solar radiation (400 to 700 nm) transmitted by each cover, quantum sensors were installed inside tunnel-type greenhouses; the spectral characteristic in the same solar radiation band was determined with a spectroradiometer. The effect of the covers was analysed with a completely randomized blocks design with treatment replicates within each tunnel greenhouse. Plants in greenhouses with red and blue diffuse high-density polyethylene covers received less solar radiation in the 400 to 700 nm wavelength band. Also, the radiation of 400 to 550 nm received by the plants in the greenhouse with the red cover was much lower than that received by plants under other covers. The plants in the blue polyethylene covered greenhouse received less solar radiation in the interval 600 to 700 nm. This did not affect the chlorophyll content nor the carbon dioxide assimilation rate. However, there was a significant increase ($p \leq 0.05$) in plant height, but with a smaller stem diameter. As well as there was a higher yield, expressed in number of fruits per plant, weight and larger fruit size in plants under polyethylene tunnels with red and blue pigmentation.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4137-9638>

Recibido: abril, 2020. Aprobado: septiembre, 2021.

Publicado en *Agrociencia* 55: 523-538. 2021.

tasa de asimilación de bióxido de carbono; sin embargo, hubo incremento significativo ($p \leq 0.05$) en altura de planta, pero con diámetro de tallo menor. Así como un rendimiento mayor, expresado en número de frutos por planta, peso y tamaño mayor de fruto en las plantas bajo túneles de polietileno con pigmentación roja y azul.

Palabras clave: productividad de hortalizas, invernadero tipo túnel, cubierta de polietileno, radiación solar, pigmentación, *Solanum lycopersicum*.

INTRODUCCIÓN

El uso de plásticos con materiales y características diferentes puede reducir las limitaciones que el ambiente impone al establecimiento y desarrollo de cultivos en invernadero. La agricultura protegida ha tenido un gran desarrollo en México y el mundo, gracias a las ventajas que proporciona en comparación con la agricultura a cielo abierto; por un control ambiental mejor, eficiencia del agua y rendimiento mayores por unidad de superficie (González *et al.*, 2017). El uso de plásticos ha mejorado los métodos de producción agrícola con aplicaciones diferentes en forma de películas para acolchado, micro túneles, túneles e invernaderos (García-Enciso *et al.*, 2015). Las películas de polietileno son las cubiertas de uso más común debido a su flexibilidad y propiedades absorbentes de la radiación infrarroja, lo cual confiere funcionamiento mejor en condiciones ambientales diferentes (Rizo, 2015).

La radiación que incide de manera directa sobre el dosel vegetal es un factor importante que influye en crecimiento y desarrollo de las plantas. Por ello los materiales de cobertura deben tener transmisividad alta en el espectro de la radiación fotosintéticamente activa (PAR, 400 a 700 nm). Los materiales que en apariencia proporcionan mayor difusividad de la radiación solar transmitida al interior del invernadero son los que tienen un aspecto blanco lechoso; como las películas de polietileno, la fibra de vidrio y las cubiertas de revestimiento de invernadero de doble pared. El uso de cubiertas de invernadero de color y características diferentes modifica la intensidad y calidad de la radiación que reciben las plantas (Holcman y Sentelhas, 2012) lo cual afecta el crecimiento y rendimiento.

En un cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* L.) Ramos-López *et al.* (2017) observaron transmisividad mayor de la radiación fotosintéticamente

Key words: vegetable productivity, greenhouse tunnel, polyethylene cover, solar radiation, pigmentation, *Solanum lycopersicum*.

INTRODUCTION

The use of plastics with different materials and characteristics can reduce the limitations that the environment imposes on the establishment and development of greenhouse crops. Protected agriculture has experienced great development in Mexico and the world due to the advantages it provides compared to agriculture in the open field; because of a better environmental control, higher water efficiency, and higher yield per area unit (González *et al.*, 2017). The use of plastics has improved agricultural production methods with different applications in the form of mulch films, micro tunnels, tunnels and greenhouses (García-Enciso *et al.*, 2015). Polyethylene films are the most commonly used covers due to their flexibility and infrared radiation absorbing properties, which confers better performance in different environmental conditions (Rizo, 2015).

The incident radiation on the plant canopy is an important factor that influences the growth and development of plants. Therefore, the covering materials must have high transmissivity in the spectrum of photosynthetically active radiation (PAR, 400 to 700 nm). The materials that appear providing greater diffusivity of solar radiation transmitted into the greenhouse are those with a milky white appearance; such as polyethylene films, fiberglass, and double-walled greenhouse cladding covers. The use of greenhouse covers of different colours and characteristics modifies the intensity and quality of the radiation received by the plants (Holcman and Sentelhas, 2012), which affects the growth and yield.

In a shell tomato crop (*Physalis ixocarpa* L.) Ramos-López *et al.* (2017) observed a higher transmissivity of the photosynthetically active radiation (PAR) under a transparent cover, which resulted in a higher fruit yield compared to the PAR transmitted under a white cover. In tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Maximka, stem elongation, chlorophyll content and fruit yield were higher in greenhouses covered with red and yellow polyethylene films than under a colourless or blue cover (Gmizo *et al.*, 2012).

The tomato, native of South America and domesticated in Mexico, is an important horticultural

activa (PAR) bajo una cubierta transparente que dio como resultado rendimiento de fruto mayor, respecto a la PAR transmitida en una cubierta de color blanco. En plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) cv. Maximka la elongación del tallo, el contenido de clorofila y rendimiento del fruto fue mayor en invernaderos cubiertos con películas de polietileno de color rojo y amarillo que bajo cubierta incolora o de color azul (Gmizo *et al.*, 2012).

El tomate, originario de Sudamérica y domesticado en México, es un cultivo hortícola importante en el mundo debido a los beneficios económicos que genera su comercialización (Délices *et al.*, 2019). En 2018 la producción mundial de tomate fue 182.56 millones de toneladas (Mega gramos, Mg) (Statista, 2020). China e India son los principales productores, México ocupa el noveno lugar mundial con una producción de 4.5 millones de Mg. México es el exportador principal de tomate en el mundo; contribuyó con 24.1% de las exportaciones totales en 2018 (ITC-TRADEMAP, 2019). En 2019 los principales estados productores de tomate en México fueron Michoacán, Durango, Coahuila y Baja California con 63 931 Mg (Forbes, 2020). En el país se tienen más de 51 179 ha de agricultura protegida, de las cuales 12 694 ha son invernaderos y 38 486 ha corresponden a malla sombra y macro túnel.

El tomate es el cultivo principal en México cuya producción (21%) ocurre bajo invernadero (TecnoAgro, 2020). Con estos antecedentes se planteó la hipótesis de que el color y las características del material de cubierta de invernadero para producción de tomate afecta la radiación recibida por las plantas; el objetivo de este estudio fue evaluar intensidad y distribución espectral de la radiación solar transmitida a través de cuatro cubiertas de invernadero con características físicas y color diferentes, sobre contenido relativo de clorofila, tasa de fotosíntesis, crecimiento y rendimiento de un cultivo de tomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en la propiedad denominada rancho Nueva Rosita, Cedral, San Luis Potosí, México (23° 51' 9" N, 100° 41' 26" O; altitud 1750 m), el clima que predomina en la localidad es seco-templado, con temperatura media anual de 16.8 °C y precipitación media anual de 420 mm (INAFED, 2018).

crop in the world due to the economic benefits generated by its commercialization (Délices *et al.*, 2019). In 2018 worldwide tomato production was 182.56 million tons (Mega grams, Mg) (Statista, 2020). China and India are the main producers; Mexico ranks ninth in the world with a production of 4.5 million Mg. Mexico is the leading tomato exporter in the world that contributed 24.1% of total exports in 2018 (ITC-TRADEMAP, 2019). In 2019, the main tomato producing states in Mexico were Michoacán, Durango, Coahuila and Baja California with 63 931 Mg (Forbes, 2020). The country has more than 51 179 ha of protected agriculture, out of which 12.694 ha are greenhouses and 38 486 ha correspond to shade mesh and macro tunnel.

Tomato is the main crop in Mexico, whose production (21%) occurs in greenhouse (TecnoAgro, 2020). With this background, the hypothesis was that the colour and characteristics of the greenhouse cover material for tomato production affect the radiation received by the plants. The objective of this study was to evaluate the intensity and spectral distribution of solar radiation transmitted through four greenhouse covers with different physical characteristics and colour, on the relative chlorophyll content, photosynthesis rate, growth and yield of a tomato crop.

MATERIALS AND METHODS

Description of the study area

The study established in the property 'Rancho Nueva Rosita', Cedral, San Luis Potosí, Mexico (23° 51' 9" N, 100° 41' 26" W; altitude 1750 m), the climate is mostly dry-temperate, with an average annual temperature of 16.8 °C, and an average annual rainfall of 420 mm (INAFED, 2018).

Greenhouse cover features

Four oval-shaped 21×8×5.5 m (length × width × height) greenhouses were built, each one separated by 12 m in north-south orientation, with the door on the north side. Four diffuse high-density polyethylene covers with 70% transmissivity, 85% diffusivity and 180 µm thickness were evaluated. One of the tunnels was covered with milky white polyethylene of a commercial type (0.94 g cm⁻³); another one with polyethylene from a formulation designed and patented by the Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA)

Características de las cubiertas de invernaderos

Cuatro invernaderos de forma ovalada se construyeron de 21×8×5.5 m (longitud × amplitud × altura) con 12 m de separación, en orientación norte-sur y con puerta en el lado norte. En ellos se evaluaron cuatro películas de polietileno difuso de alta densidad con 70% de transmisividad, 85% de difusión y un espesor de 180 µm. Uno de los túneles se cubrió con polietileno de tipo comercial (0.94 g cm⁻³) color blanco lechoso; otra con polietileno de una formulación diseñada y patentada por el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA) con propiedades de termorregulación. Y cada una de las restantes con un tipo de cubierta también formulada por el CIQA, con pigmentación de color rojo o azul. Las películas se elaboraron con base en la formulación de aditivos de la Patente Mexicana No. 311701 desarrollada por el CIQA, con aditivos para reflectancia mayor de radiación de onda corta, lo cual permite la salida de la radiación infra roja.

Establecimiento del cultivo

Para el estudio se estableció un cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) de crecimiento indeterminado, híbrido Cedral 2012 (Zeraim Gadera-Syngental, Inc). Las plantas se trasplantaron 15d después de germinación (15 julio, 2018) en bolsas de plástico (Cocopeat, 9L de capacidad) rellenas con sustrato hidropónico de musgo y fibra de coco. Las bolsas se establecieron en un arreglo de triangular separadas 50 cm. Dos franjas de plantas se establecieron separadas 3m respecto al centro en cada invernadero (61 plantas por línea). Las plantas se fertilizaron y regaron con un sistema de fertirriego por goteo con cinco riegos diarios de solución nutritiva (el estándar para el cultivo de tomate sin suelo) en un tiempo promedio de 13 min.

Instrumentación y mediciones

La característica espectral de la radiación solar fotosintéticamente activa, (PAR, 400 - 700 nm) que incidió y se transmitió a través de cada cubierta se determinó con un espectroradiómetro (modelo PS-100, Apogge Inst., Logan, Utah, USA). La medición se realizó en condiciones de cielo despejado al medio día (20-30 julio, 2018) con el sensor orientado primero hacia el zenit y después con el sensor colocado debajo de cada cubierta.

La PAR incidente y transmitida bajo cada cubierta se midió con los sensores quantum (modelo SQ-512, Apogge Inst., Logan, Utah, USA) colocados en campo abierto y bajo el centro de cada túnel (a 1.20 m sobre la superficie del suelo). Cada sensor se conectó a un concentrador electrónico de datos (modelo CR1000, Campbell, Sci., Logan, Utah, USA), el cual registra

with thermoregulatory properties. And each of the others with a type of cover also formulated by CIQA, with red or blue pigmentation. The covers were made based on the additive formulation of Mexican Patent No. 311701 developed by CIQA, with additives for greater reflectance of the short-wave radiation, which allows the exit of infrared radiation.

Establishing the crop

For the study, a tomato crop (*Solanum lycopersicum* L.) of indeterminate growth, hybrid Cedral 2012 (Zeraim Gadera-Syngental, Inc) was established. Tomato transplant was made 15d after germination (July 15, 2018) in plastic bags (Cocopeat, 9L capacity) filled with hydroponic substrate of moss and coconut fibre. The bags were set up in a triangular arrangement, 50 cm apart. Two plant strips were established 3m apart from the centre in each greenhouse (61 plants per line). The plants were fertilized and watered with a drip fertigation system, with five daily irrigations of nutrient solution (the hydroponic tomato crop standard) for a 13 min average time.

Instrumentation and measurements

The spectral characteristic of the photosynthetically active solar radiation (PAR, 400-700 nm) incident and transmitted through each cover was determined with a spectroradiometer (model PS-100, Apogge Inst., Logan, Utah, USA). Measurement was carried out in clear sky conditions at noon (July 20-30, 2018) with the sensor oriented first towards the zenith, and then with the sensor positioned under each cover.

Incident and transmitted PAR under each cover was measured with quantum sensors (model SQ-512, Apogge Inst., Logan, Utah, USA) placed in the open field and under the centre of each tunnel (at 1.20 m above the ground surface). Each sensor was connected to a datalogger (model CR1000, Campbell, Sci., Logan, Utah, USA), which records measurements per second, obtaining averages every 30 min. Data recording was made continuously during the growth cycle of the crop (August 10 to December 7, 2018).

Air temperature was measured with temperature sensors installed inside each tunnel (Therm 107, Campbell, Sci., Logan, Utah, USA). Air temperature in the open field was determined with a temperature and relative humidity probe (model HC2S3, Campbell, Sci., Logan, Utah). These sensors were also connected to the CR1000 datalogger to record readings every second and 30-min averages.

Plant growth and fruit yield

Once every 15d during the crop growth cycle, the relative chlorophyll content of the leaves was measured with a portable

mediciones por segundo, con obtención de promedios cada 30 min. El registro se hizo en forma continua durante el ciclo de crecimiento del cultivo (10 agosto a 7 diciembre, 2018).

La temperatura del aire se midió con sensores de temperatura instalados dentro de cada túnel (Therm 107, Campbell, Sci., Logan, Utah, USA). La temperatura del aire a campo abierto se determinó con una sonda de temperatura y humedad relativa (modelo HC2S3, Campbell, Sci., Logan, Utah). Estos sensores también se conectaron al concentrador electrónico de datos CR1000 para registrar lecturas cada segundo y sus promedios cada 30 min.

Crecimiento de las plantas y rendimiento de fruto

Una vez cada 15d durante el ciclo de crecimiento del cultivo, el contenido relativo de clorofila de las hojas se midió con un medidor portátil de clorofila, SPAD 502 plus (Minolta, Japan), las tasas de fotosíntesis neta y de transpiración foliar con un medidor portátil de fotosíntesis LI-6800 (LI-COR, Nebraska, USA); y la temperatura foliar con un termómetro infrarrojo MI-220 (Apogee, Inst., Logan, Utah, USA). También se midió la altura de las plantas (flexómetro) y diámetro del tallo (vernier digital). En la cosecha se determinó el número de frutos por planta, número de frutos cosechados, diámetro (vernier digital) y peso (báscula digital) promedio de fruto y el rendimiento total (peso total de frutos cosechados) por planta.

Análisis estadísticos

El efecto de la radiación transmitida en cada túnel en la temperatura foliar, contenido de clorofila, tasa de fotosíntesis, transpiración foliar, altura de plantas y parámetros del rendimiento se determinó con un diseño completamente al azar de cuatro tratamientos (cubierta de cada túnel) con cuatro muestras aleatorias cada una de cuatro plantas, 16 plantas evaluadas por tratamiento (túnel), para un total de 64 unidades experimentales. La comparación múltiple de medias de tratamientos se realizó con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Característica espectral de la radiación transmitida a través de las cubiertas

La radiación solar fotosintéticamente activa (PAR, en la banda de longitud de onda 400-700 nm) transmitida a través de la cubierta patentada por el CIQA - Centro de Investigación en Química Aplicada (PAR_ciqa) fue muy similar a la observada en la

chlorophyll meter, SPAD 502 plus (Minolta, Japan); the rates of net photosynthesis and foliar transpiration were estimated with a portable photosynthesis meter LI-6800 (LI-COR, Nebraska, USA); and the leaf temperature with an infrared thermometer MI-220 (Apogee, Inst., Logan, Utah, USA). Plant height (flex metre) and stem diameter (digital Vernier) were also measured. At harvest, the number of fruits per plant, harvested fruits, diameter (digital Vernier) and average weight (digital scale) of the fruit, and yield (total weight of harvested fruits) per plant were determined.

Statistical analysis

The effect of the radiation transmitted in each tunnel on leaf temperature, chlorophyll content, photosynthesis rate, leaf transpiration, plant height and yield parameters was determined in a completely randomized design of four treatments (cover of each greenhouse), with four randomized samples each one of four plants, 16 plants evaluated per treatment (greenhouse), for a total of 64 experimental units. The multiple comparison of treatment means was obtained with the Tukey's test ($p \leq 0.05$).

RESULTS AND DISCUSSION

Spectral characteristic of the radiation transmitted through the covers

The photosynthetically active solar radiation (PAR, in the wavelength band 400 - 700 nm) transmitted through the cover patented by CIQA - Centro de Investigación en Química Aplicada (PAR_ciqa) was very similar to that observed in the commercial cover made of diffuse high-density polyethylene (PAR_comer) (Figure 1). The peak of the highest transmissivity (thousands of spectroradiometer units) of both covers occurred at 555 nm, similar to the peak of the incident solar radiation. The two covers allowed a higher transmissivity in the whole band (400 to 700 nm) than those of diffuse blue and red polyethylene. The highest transmissivity peak of the blue polyethylene was located between 500 and 525 nm, but from 400 to 500 nm the transmissivity was very similar in the commercial version covers and those of the CIQA patent. While the radiation in the 600 to 700 nm band was the lowest transmissivity of all the covers (Figure 1).

The red polyethylene cover allowed the lowest PAR transmissivity of all covers in the 400 to 575 nm band. But it increased rapidly from that wavelength

cubierta comercial de polietileno difuso de alta densidad (PAR_comer) (Figura 1). El pico de mayor transmisividad (miles de unidades de espectro radiómetro) de ambas cubiertas ocurrió en 555 nm, similar al pico de la radiación solar incidente. Las dos cubiertas permitieron transmisividad en toda la banda (400 a 700 nm) mayor que las de polietileno difuso de color azul y rojo. El pico de transmisividad mayor del polietileno azul se ubicó entre 500 y 525 nm, pero de 400 a 500 nm la transmisividad fue muy similar en las cubiertas de versión comercial y las de patente CIQA. Mientras que la radiación en la banda de 600 a 700 nm fue la de menor transmisividad de todas las cubiertas (Figura 1).

La cubierta de polietileno rojo (red) permitió la transmisividad de PAR más baja de todas las cubiertas en la banda de 400 a 575 nm. No obstante, se incrementó rápidamente a partir de esa longitud de onda hasta los 700 nm y fue mayor que la del polietileno de color azul (blue), aunque muy similar a la de las otras cubiertas. (Figura 1).

to 700 nm, and was greater than that under blue polyethylene, although very similar to that of the other covers. (Figure 1).

The commercial high-density diffuse polyethylene cover transmitted 56.98% of the PAR and was very similar to that transmitted by the CIQA patent cover with 59.10% (Table 1). In the other two covers, transmissivity was much lower, 31.4% under blue colour, and 24.91% under red. These transmissivities are much lower than those observed in covers made of other materials. For example, Fuina *et al.* (2016) found that the PAR transmissivity of transparent rigid plastic greenhouse covers of the polycarbonate, polymethylmethacrylate and polyethylene terephthalate type was up to 80%; while the transmissivity under the blue polycarbonate cover was approximately 50%. According to the studies by Schettini *et al.* (2011), the coefficient of transmissivity to PAR radiation in a diffuse low-density polyethylene cover (200 μm) was higher than that of photo-selective green covers.

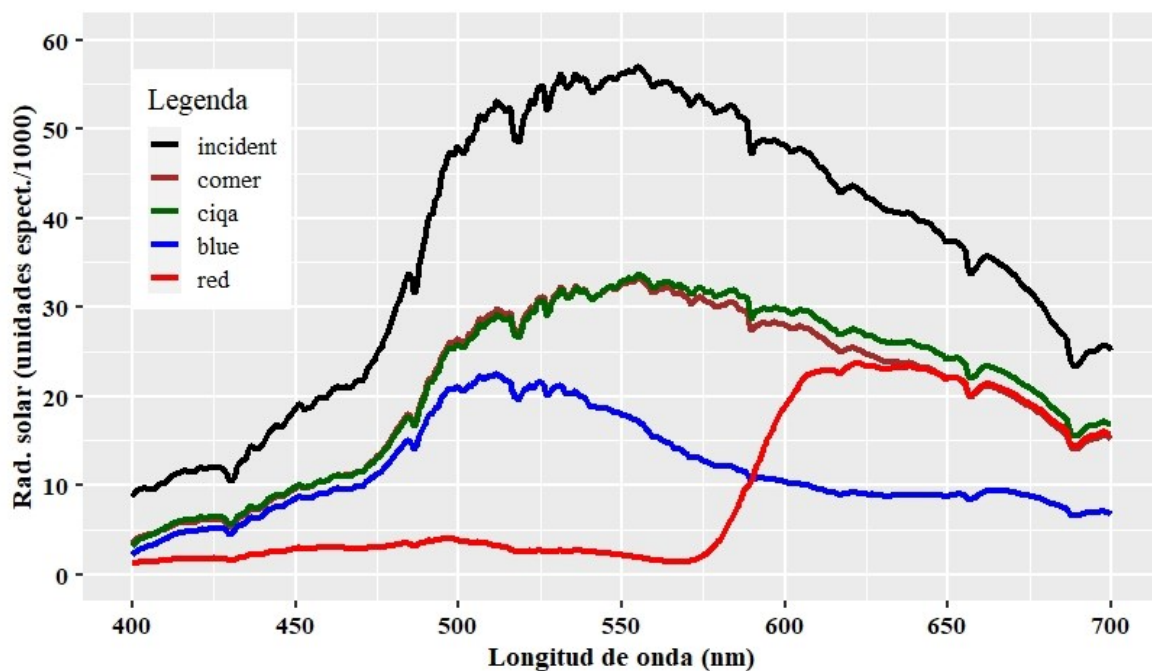


Figura 1. Radiación solar incidente (PAR, en la banda de 400 a 700 nm) y transmitida a través de las cubiertas de polietileno difuso de alta densidad de tipo comercial (comer) y con propiedad de termorregulación de patente CIQA (ciqa) con pigmentación azul (blue) y roja (red).

Figure 1. Incident and transmitted solar radiation (PAR, in the 400 to 700 nm band) through the covers of diffuse high-density polyethylene of commercial type (comer), and with thermoregulation property of CIQA patent (ciqa), of blue pigmentation (blue) and red pigmentation (red).

La cubierta comercial de polietileno difuso de alta densidad transmitió 56.98% de la PAR y fue muy parecida a la transmitida por la cubierta de patente CIQA con 59.10% (Cuadro 1). En las otras dos cubiertas la transmisividad fue mucho menor, 31.4% bajo color azul y 24.91% bajo color rojo. Estas transmisividades son mucho menores que las observadas en cubiertas de otros materiales. Por ejemplo, Fuina *et al.* (2016) encontraron que la transmisividad a la PAR de las cubiertas transparentes de plástico rígido para invernadero de tipo policarbonato, polimetilmetacrilato y tereftalato de polietileno fue de hasta 80%; mientras que la transmisividad bajo cubierta de policarbonato azul fue 50% aproximado. Según los estudios de Schettini *et al.* (2011) el coeficiente de transmisividad a la radiación PAR en una película de polietileno difuso de densidad baja (200 μm) fue mayor que el de las cubiertas foto selectivas de color verde.

Para la radiación en la banda 400 a 550 nm, bajo las cubiertas de versión comercial y de patente CIQA, se observó la misma transmisividad 54.91 y 54.49% de la PAR incidente en dicha banda (Cuadro 1). Bajo la cubierta CIQA de color azul la transmisividad de PAR fue 41.03% y en la CIQA de color rojo solo fue 8.43%. En la amplitud 550 a 700 nm, la cubierta de patente CIQA tuvo transmisividad (62.53%) mayor que la radiación incidente, seguida por la de versión comercial (58.54%), la de color rojo 37.8% y la que presentó transmisividad menor fue la cubierta de patente CIQA de color azul (24.38%). La diferencia en la característica espectral de la PAR transmitida por

For radiation in the 400 to 550 nm band, under the commercial version and the CIQA patent cover, the same transmissivity 54.91 and 54.49% of the incident PAR in the same band was observed (Table 1). Under the blue CIQA cover, the PAR transmissivity was 41.03%, while in the red CIQA it was only 8.43%. In the 550 to 700 nm amplitude, the CIQA patent cover had higher transmissivity (62.53%) of the incident radiation, followed by the commercial version (58.54%), the red one, 37.8%, and the one with the lowest transmissivity was the CIQA blue cover (24.38%). The difference in the spectral characteristic of the PAR transmitted by each cover can impact plant growth and yield.

Solar radiation transmitted through the covers

The CIQA patent polyethylene had higher transmissivity to incident solar radiation in the band of photosynthetically active radiation at daytime (8:00 a.m. to 8:00 p.m.), and during the crop growth cycle. The diffuse polyethylene of the commercial type ranked second, and later in a smaller amount, the diffuse polyethylene CIQA blue and the CIQA red, with very little difference between the two (Figure 2).

In the early hours of the day (between 8:00 and 10:00 h) and late in the afternoon (after 18:00 h) transmissivity was very similar under the four covers evaluated. While between 13:00 and 15:00 h, we observed the highest incidence of PAR and the highest difference in transmissivity between the different

Cuadro 1. Transmisividad (%) de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en cuatro diferentes cubiertas de invernaderos, en tres amplitudes de band.

Table 1. Transmissivity (%) of photosynthetically active radiation (PAR) in four different greenhouse covers, in three bandwidth.

Cubierta	400 a 700 nm	(PAR) 400 a 550 nm	550 a 700 nm
Polietileno difuso comercial	56.98	54.91	58.54
Polietileno difuso patente CIQA	59.10	54.49	62.53
Polietileno difuso CIQA color azul	31.49	41.03	24.38
Polietileno difuso CIQA color rojo	24.91	8.43	37.18

cada cubierta pueden impactar en el crecimiento y rendimiento de las plantas.

Radiación solar transmitida por las cubiertas

El polietileno de patente CIQA tuvo transmisividad mayor a la radiación solar incidente, en la banda de la radiación fotosintéticamente activa en horas del día (8:00 a 20:00 h), durante el ciclo de crecimiento del cultivo. En segundo lugar, el polietileno difuso de tipo comercial, y después en cantidad menor, el polietileno difuso CIQA de color azul y el CIQA de color rojo, con muy poca diferencia entre los estos dos (Figura 2).

En las primeras horas del día (entre 8:00 y 10:00 h) y las últimas de la tarde (después de las 18:00 h) la transmisividad fue muy similar bajo las cuatro cubiertas

covers (Figure 2). In this regard, Romero-Gómez *et al.* (2012) showed that the PAR transmissivity of a milky-white high-density polyethylene cover was higher than that observed under photo-selective polyethylene (green).

Leaf and air temperature inside greenhouses

The differences in the solar radiation transmitted in each polyethylene cover had little effect on the air temperature inside the greenhouses (Table 2). The maximum difference in average daily temperature between the covers was 0.56 °C during the crop growth cycle. Other unmeasured factors could influence the general internal temperature response of the greenhouses, although the experimental conditions were homogenized. During the cultivation cycle, the

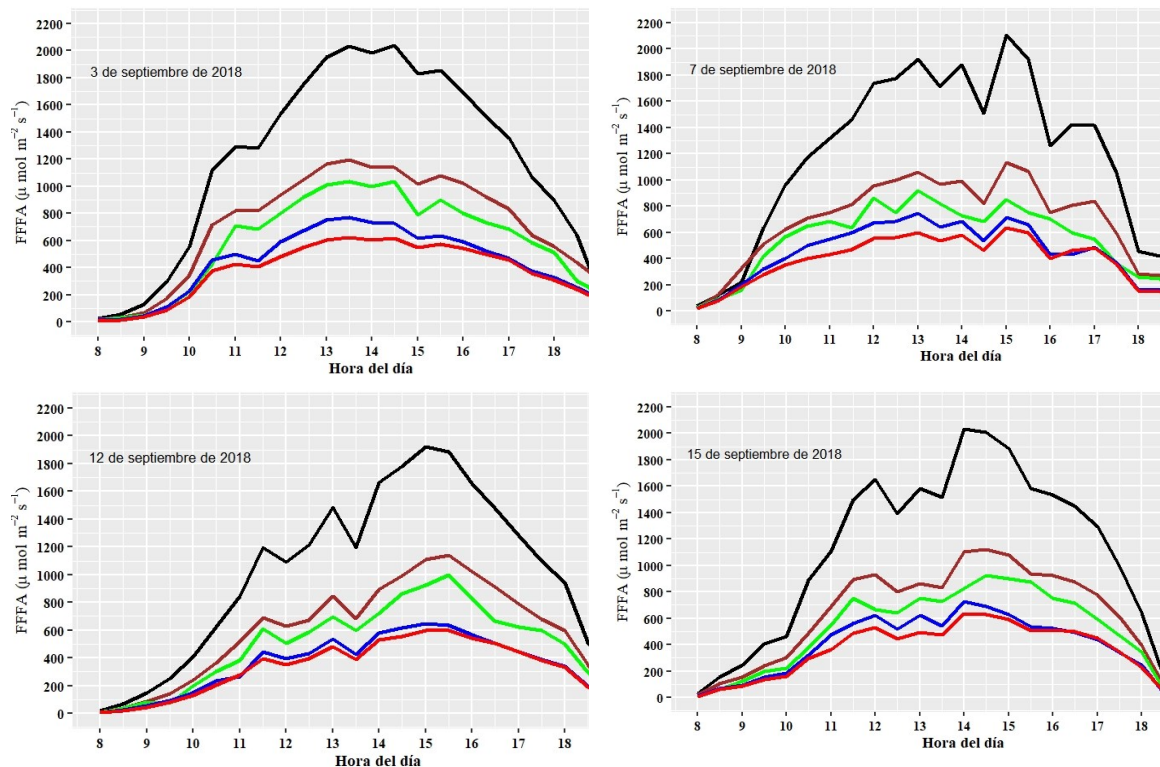


Figura 2. Flujo de fotones fotosintéticamente activos (FFFA) incidente (línea negra) y transmitido en la cubierta de polietileno difuso de patente CIQA (línea café), polietileno difuso de tipo comercial (línea verde), polietileno con propiedad de termorregulación de patente CIQA de color azul (línea azul) y polietileno de patente CIQA de color rojo (línea roja) durante horas del día en cuatro fechas del ciclo de crecimiento del cultivo de tomate.

Figure 2. Photosynthetically active photon flux (FFFA) incident (black line), and transmitted in the cover of CIQA patent diffuse polyethylene (brown line), commercial diffuse polyethylene (green line), CIQA patent with thermoregulation property blue polyethylene (blue line), and red (red line), during hours of the day at four dates of the growth cycle of tomato plants.

evaluadas. Mientras que entre las 13:00 y las 15:00 h se observó la incidencia mayor de PAR y la diferencia mayor en transmisividad entre las diferentes cubiertas (Figura 2). Al respecto, Romero-Gómez *et al.* (2012) mostraron que la transmisividad a la PAR de una película de polietileno de densidad alta de color blanco lechoso fue mayor que la observada bajo polietileno foto selectivo (color verde).

Temperatura foliar y del aire dentro de los invernaderos

Las diferencias en la radiación solar transmitida en cada cubierta de polietileno tuvieron poco efecto en la temperatura del aire al interior de los invernaderos (Cuadro 2). La diferencia máxima en temperatura promedio diaria entre las cubiertas fue 0.56 °C durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Otros factores no medidos pudieron influir en la respuesta general de la temperatura interna de los túneles, aunque las condiciones experimentales se homogenizaron. Durante el ciclo del cultivo, la diferencia entre la temperatura promedio diaria a cielo abierto y en el interior de los túneles con cubierta de polietileno difuso con patente CIQA fue 3.57 °C bajo cubierta color rojo, 3.38 °C bajo color blanco, 3.09 °C bajo color azul, y de 3.01 °C bajo polietileno de tipo comercial. Estas diferencias de temperatura son menores a las reportadas por otros estudios.

Por ejemplo, Arcidiacono *et al.* (2006) registraron la temperatura dentro de un invernadero con una cubierta de película foto selectiva roja (EVA

difference between the daily average temperature in the open field and inside the tunnels with diffuse polyethylene cover with CIQA patent was 3.57 °C under red cover, 3.38 °C under white cover, 3.09 °C under blue, and 3.01 °C under commercial type polyethylene. These temperature differences are less than those reported by other studies.

For example, Arcidiacono *et al.* (2006) recorded the temperature inside a greenhouse with a red photo-selective film cover (150 μm EVA), and it was 12.2 °C higher than the temperature in the open field; while under a milky white diffuse polyethylene cover it was 8.8 °C higher. The material and colour of the greenhouse cover influence the temperature inside. Saleh *et al.* (2003) found that the highest air temperature in the greenhouse under a red polyethylene cover was 43.53 °C, while under other cover colours a lower highest temperature was recorded; specifically, under yellow-greenish (41.91 °C), under blue polyethylene (40.76 °C), and under violet cover (39.76 °C). However, Atilgan *et al.* (2019) observed the same highest air temperature inside greenhouses with transparent, red and blue polyethylene covers.

Inside the greenhouses, the foliar temperature of the plants under the CIQA diffuse polyethylene red cover was higher than under the CIQA-patent covers, and also higher than those covered with commercial plastic (Tukey, $p \leq 0.05$). However, the leaf temperature was the same between the plants under blue and red CIQA-patent polyethylene (Figure 3).

Cuadro 2. Temperatura promedio diaria del aire (°C) a campo abierto y en el interior invernaderos con cubierta de color diferente, durante el ciclo de crecimiento del cultivo de tomate.

Table 2. Average daily air temperature (°C) in the open field and inside greenhouses with different coloured covers, during the growth cycle of a tomato crop.

Fecha	Campo abierto	Polietileno difuso comercial	Polietileno difuso patente CIQA	Polietileno difuso CIQA color rojo	Polietileno difuso CIQA color azul
15 ago – 1 sep	21.43	26.33	26.65	26.15	25.53
1 - 20 sep	20.25	20.67	24.49	24.65	24.37
20 sep - 9 oct	19.73	23.35	23.07	23.04	22.71
9 -16 oct	20.16	22.93	22.34	22.88	22.50
16 - 26 oct	18.01	21.16	20.97	21.42	20.90
26 oct - 9 nov	17.10	19.78	19.41	19.93	19.18
9 - 21 nov	12.23	16.07	16.07	16.19	15.86
21 nov - 7 dic	13.8	16.5	16.7	17.0	16.4
Total (promedio)	17.84	20.85	21.22	21.41	20.93

de 150 μm) y fue 12.2 °C mayor que la temperatura a cielo abierto; mientras que bajo una cubierta de polietileno difuso de color blanco lechoso fue 8.8 °C mayor. El material y color de la cubierta de los invernaderos influye la temperatura en el interior. Saleh *et al.* (2003) encontraron que la temperatura máxima del aire en invernadero bajo cubierta de polietileno rojo fue 43.53 °C, mientras que bajo otros colores de cubierta se registró temperatura máxima menor, bajo color amarillo-verdoso (41.91 °C), bajo polietileno azul (40.76 °C) y bajo color violeta (39.76 °C). Sin embargo, Atilgan *et al.* (2019) observaron la misma temperatura máxima del aire dentro de invernaderos con cubiertas de polietileno transparente, color rojo y azul.

En el interior de los invernaderos, la temperatura foliar de las plantas bajo cubierta de polietileno difuso CIQA de color rojo fue mayor que bajo la cubierta de patente CIQA y también mayor que bajo la cubierta con plástico comercial (Tukey, $p \leq 0.05$). No obstante, la temperatura foliar fue igual entre las plantas bajo polietileno CIQA de color azul y rojo (Figura 3).

La temperatura foliar mayor en plantas bajo cubierta de polietileno CIQA de color rojo estuvo en proporción directa con la temperatura máxima del aire dentro de ese invernadero (Cuadro 2); en el cual se registró también la tasa de transpiración foliar menor (Figura 4). Al disminuir la tasa de transpiración, la temperatura foliar tiende a incrementarse (Soto-Bravo, 2018). Un follaje expuesto a una temperatura mayor en el interior de un invernadero puede incrementar la temperatura del aire, debido al aumento de la emisión de radiación infrarroja por el follaje de las plantas. Por ejemplo, un aumento de 0.25 a partir de 25 °C en el follaje de un cultivo en invernadero incrementa la emisión de radiación infrarroja en 1.43 W m^2 ; si esta radiación la absorbe una capa de aire de 3 m de altura, el incremento total aproximado de la temperatura del aire es 1.82 °C en 6 h.

Soto-Bravo (2018) observó en condiciones de riego oportuno que la temperatura foliar de plantas de tomate Cherry cv. Super Suncherry y de pimiento morrón (*Capsicum annuum* híbrido Polaris) fue 6.5 y 7.3 °C menor que la temperatura del aire (32.9 °C) al medio día. Pero, en plantas bajo estrés hídrico, la temperatura foliar fue 4 y 6 °C mayor que la temperatura del aire en el invernadero de cada cultivo. Esto se debió a que la reducción de la tasa de transpiración

The highest leaf temperature in plants under red CIQA polyethylene cover was in direct proportion to the maximum air temperature inside that greenhouse (Table 2); in which the lowest foliar transpiration rate was also recorded (Figure 4). As the transpiration rate decreases, the leaf temperature tends to increase (Soto-Bravo, 2018). A foliage exposed to a higher temperature inside a greenhouse can increase the air temperature due to the increase in the emission of infrared radiation by the plant foliage. For example, an increase of 0.25 from 25 °C in the foliage of a greenhouse crop increases the emission of infrared radiation by 1.43 W m^2 . If this radiation is absorbed by a layer of air 3 m high, the approximate total increase in air temperature is 1.82 °C in 6 h.

Soto-Bravo (2018) observed, under timely irrigation conditions, that the leaf temperature of

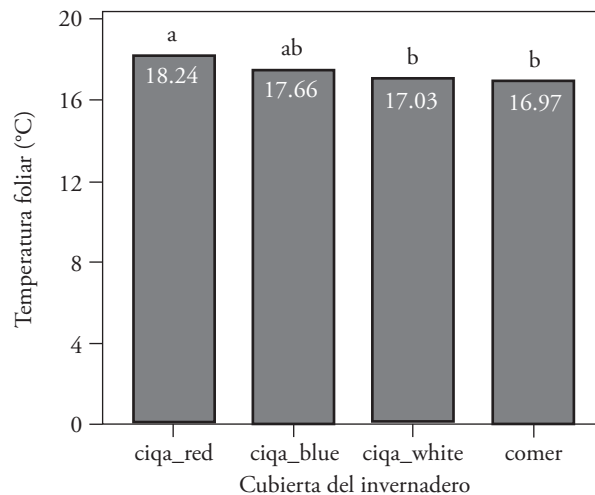


Figura 3. Temperatura foliar (°C) de plantas de tomate (híbrido Cedral) en invernaderos con cubierta de polietileno difuso de densidad alta; de tipo comercial (comer), blanco con propiedades de termorregulación de patente CIQA (ciqa_white), con color azul (ciqa_blue) y con color rojo (ciqa_red). Medias con la misma literal son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figure 3. Leaf temperature (°C) of tomato plants (Cedral hybrid) in greenhouses with a diffuse high-density polyethylene cover; commercial type (comer), CIQA patent white with thermoregulation properties (ciqa_white), blue (ciqa_blue) and red (ciqa_red). Means with different letter indicate statistical difference (Tukey, $p \leq 0.05$).

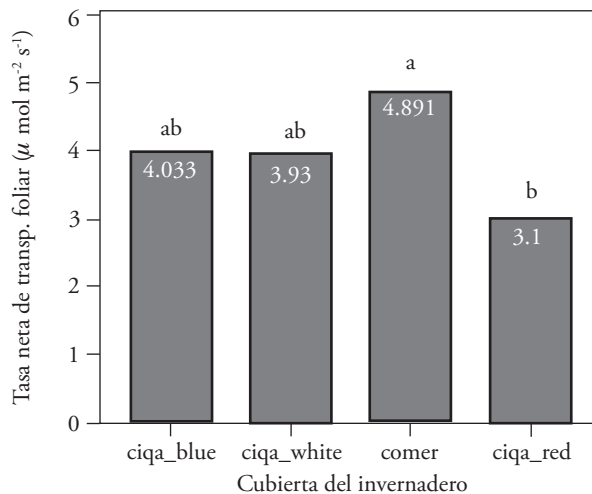
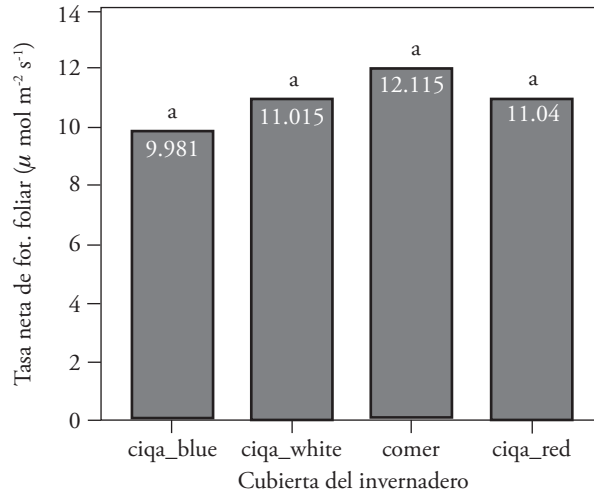
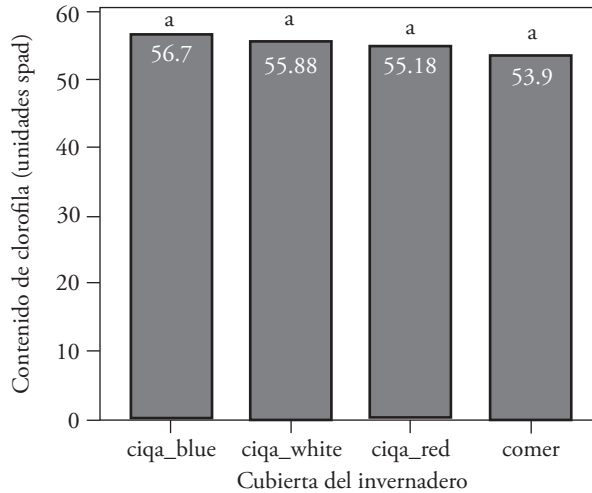


Figura 4. Contenido relativo de clorofila, tasa neta de fotosíntesis foliar, y de transpiración de hojas de tomate híbrido Cedral, crecidas en invernadero bajo cubiertas de polietileno difuso; de tipo comercial (comer), con propiedades de termorregulación de patente CIQA (ciqa_white), formulaciones CIQA de color azul (ciqa_azul) y rojo (ciqa_rojo). Medias con literal distinta indican diferencias estadística (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figure 4. Relative chlorophyll content, photosynthesis net rate in leaves, and transpiration of Cedral hybrid tomato leaves, growing in a greenhouse under diffuse polyethylene covers; commercial type (comer), CIQA patent with thermoregulation properties (ciqa_white), blue (ciqa_blue) and red (ciqa_red) CIQA formulations. Means with different letter indicate statistical difference (Tukey, $p \leq 0.05$).

limitó el enfriamiento por transpiración en las hojas. La temperatura foliar de plantas cultivadas en invernadero también depende de las propiedades espectrales de la cubierta. Samaniego-Cruz *et al.* (2002) observaron que la temperatura foliar de plantas de tomate (cv. Floradade) y de pimiento morrón (cv. Capistrano) bajo cubiertas de polietileno con aditivos reflejantes de radiación solar y absorbentes de radiación infrarroja, fue 0.5 y 1.5 °C menor que la temperatura foliar de plantas similares bajo cubierta de polietileno comercial.

Contenido de clorofila, tasa neta de fotosíntesis y transpiración foliar

Las diferencias en la distribución porcentual de la radiación solar que se transmitió, en intervalos diferentes de longitud de onda de la PAR bajo cada

Cherry tomato plants cv. Super Suncherry and bell pepper (*Capsicum annuum* hybrid Polaris) was 6.5 and 7.3 °C lower than air temperature (32.9 °C) at noon. But, in plants under water stress, the leaf temperature was 4 and 6 °C higher than the air temperature in the greenhouse of each crop. This was because the reduction in the transpiration rate limited cooling by the transpiration of the leaves. The leaf temperature of greenhouse-grown plants also depends on the spectral properties of the cover. Samaniego-Cruz *et al.* (2002) observed that the leaf temperature of tomato plants (cv. Floradade) and bell pepper (cv. Capistrano) under polyethylene covers with additives reflecting solar radiation and absorbers of infrared radiation was 0.5 and 1.5 °C lower than the leaf temperature of similar plants under a commercial polyethylene cover.

cubierta de invernadero (Cuadro 1), y magnitudes diferentes de la radiación transmitida durante el ciclo de crecimiento del cultivo (Figura 2), no hubo efecto significativo en el contenido relativo de clorofila (Tukey, $p > 0.05$) de las hojas (Figura 4), ni en la tasa neta de fotosíntesis (Tukey, $p > 0.05$) (Figura 4) de las plantas. Es decir que éstas tuvieron la capacidad de producir y conservar la misma cantidad de clorofila bajo magnitud y característica espectral diferente de la radiación recibida bajo cubiertas distintas; así como para mantener equivalente la tasa neta de fotosíntesis.

En otros géneros y especies vegetales se han obtenido resultados diferentes. En plantas Ramo de novia (*Saxifraga stolonifera*), He *et al.* (2017) observaron que la tasa neta de fotosíntesis fue igual bajo una cubierta de polietileno de color blanco que en la de color rojo, y ambas fueron mayores a la observada en las plantas bajo el polietileno de color azul. Plántulas de pepino (*Cucumis sativus*) que se desarrollaron bajo luz roja y azul tuvieron menores contenidos de clorofila y tasas netas de asimilación de bióxido de carbono, que las plantas desarrolladas bajo luz blanca (Su *et al.*, 2014).

Las plantas bajo la cubierta de polietileno difuso de color rojo recibieron menos radiación y alcanzaron tasa menor de transpiración foliar (Figura 4). Las plantas que crecieron bajo la cubierta de polietileno difuso de tipo comercial expresaron tasa mayor de transpiración foliar (Figura 4) (Tukey, $p \leq 0.05$); una mayor tasa de transpiración foliar puede ocasionar un efecto de enfriamiento (Soto, 2018) que puede reducir la temperatura del aire. La temperatura del aire dentro del invernadero con cubierta de polietileno difuso de alta densidad (versión comercial) fue menor que la observada bajo las otras cubiertas (Cuadro 2).

Crecimiento y rendimiento de las plantas

Las características espectrales de la radiación transmitida en cada cubierta de invernadero (Figura 1) y sus consecuencias en FFFA (Figura 2), afectó la altura y diámetro del tallo de las plantas (Tukey, $p \leq 0.05$) (Figura 5). Las plantas que crecieron bajo el polietileno difuso de colores rojo o azul presentaron altura mayor, pero con diámetro de tallo menor (Tukey, $p \leq 0.05$). Esto probablemente se debió a una radiación solar menor recibida en la banda de 400 a

Chlorophyll content, net photosynthesis rate, and foliar transpiration

The differences in the percentage distribution of the solar radiation transmitted in different intervals of the PAR wavelength under each greenhouse cover (Table 1), and the different magnitudes of the radiation transmitted during the crop growth cycle (Figure 2) had no significant effect on the relative chlorophyll content (Tukey, $p > 0.05$) of the leaves (Figure 4), nor on the net photosynthesis rate (Tukey, $p > 0.05$) (Figure 4) of the plants. In other words, they had the capacity to produce and conserve the same amount of chlorophyll under different magnitude and spectral characteristics of the radiation received under the different covers; as well as to keep the net photosynthesis rate equivalent.

In other vegetal species, different results have been obtained. In plants of *Saxifraga stolonifera*, He *et al.* (2017) observed that the net photosynthesis rate was the same under a white polyethylene cover as in a red one, and both were higher than that observed in plants under the blue polyethylene. Cucumber (*Cucumis sativus*) seedlings that grew under red and blue light had lower chlorophyll content and net carbon dioxide assimilation rates than plants grown under white light (Su *et al.*, 2014).

The plants under the red diffuse polyethylene cover received less radiation and reached a lower rate of foliar transpiration (Figure 4). The plants that grew under the cover of diffuse polyethylene of a commercial type expressed a higher rate of foliar transpiration (Figure 4) (Tukey, $p \leq 0.05$); a higher rate of foliar transpiration can cause a cooling effect (Soto, 2018) that can reduce air temperature. The air temperature inside the greenhouse with a diffuse high-density polyethylene cover (commercial version) was lower than that observed under the other covers (Table 2).

Plant growth and yield

The spectral characteristics of the radiation transmitted in each greenhouse cover (Figure 1), and its consequences on FFFA (Figure 2) affected the height and diameter of the plant stems (Tukey, $p \leq 0.05$) (Figure 5). The plants that grew under the red or blue diffuse polyethylene were taller, but with

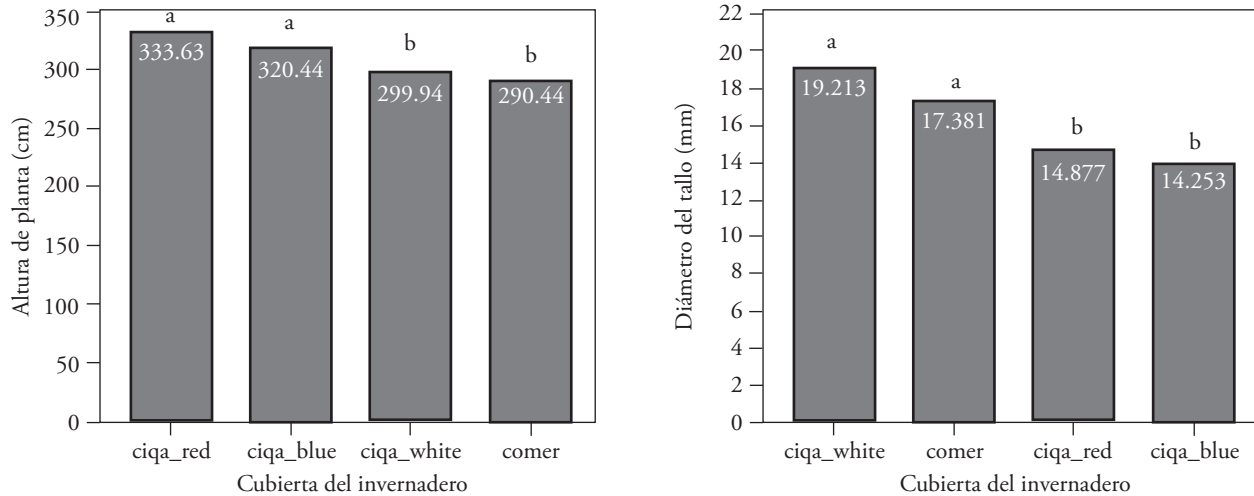


Figura 5. Altura de plantas y diámetro de tallo de tomate (híbrido Cedral), crecidas en invernadero bajo cubiertas de polietileno difuso; de tipo comercial (comer), con propiedades de termorregulación de patente CIQA (ciqa_white), formulaciones CIQA de color azul (ciqa_azul) y rojo (ciqa_rojo). Medias con literal distinta indican diferencia estadística (Tukey, $p \leq 0.05$).

Figure 5. Tomato plant height and stem diameter (Cedral hybrid), growing in greenhouse under diffuse polyethylene covers; commercial type (comer), CIQA patent with thermoregulation properties (ciqa_white), blue (ciqa_blue) and red (ciqa_red) CIQA formulations. Means with different letter indicate statistical difference (Tukey, $p \leq 0.05$).

550 nm, en comparación con las plantas que crecieron bajo cubierta de polietileno difuso de color rojo (Figura 1). En cambio, las plantas cultivadas bajo cubierta de polietileno difuso de color azul recibieron radiación menor en la banda de 550 a 700 nm (Figura 1). A estos cambios en radiación incidente en las plantas de tomates se atribuyó la elongación del tallo que produjo plantas más altas y delgadas. Delgado-Tobón *et al.* (2020) también observaron una reducción del diámetro del tallo de las plantas de tomate bajo películas de polietileno con pigmentación roja o azul, comparadas con plantas bajo cubiertas de polietileno blanco o transparente.

El rendimiento de fruto por planta en plantas que crecieron bajo cubiertas de polietileno difuso de color rojo y azul fue mayor (Tukey, $p \leq 0.05$) que el obtenido bajo las cubiertas de polietileno comercial y de patente CIQA debido a la formación de un número mayor de frutos (Tukey, $p \leq 0.05$) con peso y diámetro mayor (Cuadro 3) en ambos tratamientos. Las plantas cultivadas bajo el polietileno de tipo comercial produjeron número menor de frutos cosechados (Tukey, $p \leq 0.05$), mientras que en aquellas cultivadas bajo el polietileno de patente CIQA se registró el peso promedio menor de fruto (Tukey, $p \leq 0.05$).

a smaller stem diameter (Tukey, $p \leq 0.05$). This was probably due to a lower solar radiation received in the 400 to 550 nm band, compared to the plants that grew under a cover of diffuse red polyethylene (Figure 1). In contrast, plants grown under a blue diffuse polyethylene cover received less radiation in the 550 to 700 nm band (Figure 1). These changes in incident radiation in tomato plants were assumed as responsible for the elongation of the stem that produced taller and thinner plants. Delgado-Tobón *et al.* (2020) also observed a reduction in the stem diameter of tomato plants under red or blue polyethylene covers, compared to plants under white or transparent polyethylene covers.

The fruit yield per plant in those that grew under covers of diffuse red and blue polyethylene was higher (Tukey, $p \leq 0.05$) than that obtained under covers of commercial and CIQA patent polyethylene due to the formation of more fruits (Tukey, $p \leq 0.05$), with greater weight and diameter (Table 3) in both treatments. Plants grown under the commercial type polyethylene produced a smaller number of harvested fruits (Tukey, $p \leq 0.05$), and in those grown under the CIQA patent polyethylene, the average fruit weight recorded was lower (Tukey, $p \leq 0.05$).

Cuadro 3. Características del rendimiento de fruto en plantas de tomate (híbrido Cedral) cultivado en invernaderos con cubiertas de polietileno difuso de color y propiedad diferente en El Cedral, San Luis, Potosí, México.

Table 3. Characteristics of fruit yield in tomato plants (Cedral hybrid) grown in greenhouses with diffuse polyethylene covers of different colour and property in El Cedral, San Luis, Potosí, Mexico.

Polietileno del invernadero	Frutos cosechados	Diámetro promedio del fruto (mm)	Peso promedio por fruto (g)	Rendimiento por planta (g)
Rojo	13.63 ab	66.64 a	189.01 a	2447.17 a
Azul	13.31 ab	68.25 a	200.92 a	2499.65 a
CIQA	16.89 a	55.07 c	116.88 c	1445.40 b
comercial	11.56 b	60.65 b	149.20 b	1577.17 b

Medias con literal distinta en las columnas son diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). ♦ Means with different letter by column are different (Tukey, $p \leq 0.05$).

El mayor rendimiento de frutos de las plantas que crecieron en los invernaderos cubiertos con polietileno difuso de color rojo o azul es probable que se debió a una menor proporción de radiación solar recibida por las plantas, o a su calidad distinta. La radiación en la banda de 400 a 550 nm (en el invernadero con polietileno rojo) y en la banda de 550 a 700 nm (en el invernadero con polietileno azul) pudo estimular a las plantas a destinar más fotosintatos al crecimiento y desarrollo de los frutos. Aunque esto no pudo comprobarse en el estudio, existen observaciones de rendimientos mayores en plantas cultivadas bajo cubiertas plásticas de colores y características diferentes. Por ejemplo, Joon-Kook *et al.* (2013) observó mayor rendimiento de tomate var. Superdoterang Seminis bajo películas de polietileno de color azul y de combinación azul y rojo; aunque el rendimiento bajo la película de polietileno de color rojo fue menor, los frutos fueron de mayor tamaño.

CONCLUSIONES

Las cubiertas de polietileno difuso de alta densidad de pigmentación azul y rojo permitieron la transmisión de menor radiación solar en la banda de 400-700 nm de longitud de onda para las plantas; menor que las cubiertas de polietileno difuso de tipo comercial y de patente CIQA.

La proporción de la radiación del segmento de banda 400-550 nm recibida por las plantas bajo el invernadero con cubierta de color rojo fue mucho menor que la recibida bajo otras cubiertas. Las plantas en el invernadero con cubierta de polietileno de color

The higher fruit yield of the plants that grew in the greenhouses covered with diffuse red or blue polyethylene was likely due to a lower proportion of solar radiation received by the plants, or to their different quality. Radiation in the 400 to 550 nm band (in the red polyethylene greenhouse) and in the 550 to 700 nm band (in the blue polyethylene greenhouse) could stimulate the plants to allocate more photosynthates to the growth and development of the fruits. Although this could not be verified in the study, there are observations of higher yields in plants grown under plastic covers of different colours and characteristics. For example, Joon-Kook *et al.* (2013) observed a higher yield of tomato var. Superdoterang Seminis under blue and blue and red combination polyethylene covers; although the yield under the red polyethylene cover was fewer, the fruits were larger.

CONCLUSIONS

The blue and red high-density diffuse polyethylene covers allowed the transmission of less solar radiation in the 400-700 nm wavelength band for the plants; less than the CIQA patent and commercial type diffuse polyethylene covers.

The radiation proportion of the 400-550 nm band segment received by the plants under the red cover greenhouse was much lower than that received under other covers. Plants in the blue polyethylene-covered greenhouse received less solar radiation in the 600-700 nm band segment. There was no effect on chlorophyll content or net carbon dioxide assimilation rate under covers whose colour was

azul recibieron menor radiación solar del segmento de banda 600-700 nm.

No hubo efectos en el contenido de clorofila ni la tasa de asimilación neta de bióxido de carbono bajo las cubiertas de color distinto al blanco. Sin embargo, sí existió efecto significativo en las dimensiones de las plantas; se obtuvo producción de plantas más altas y delgadas, con rendimiento mayor de frutos por planta, y también frutos de tamaño y peso mayor.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), y al Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), por el financiamiento y apoyo recibidos para la realización de este proyecto.

LITERATURA CITADA

- Arcidiacono, C., A. D'Emilio, R. Mazzarella, and C. Leonardi. 2006. Covering materials to improve greenhouse microclimate during summer in hot climates. *Acta Horticulturae* 719: 247-254.
- Atilgan, A., A. Yücel, H. Aktaş, and F. Tunçbilek. 2019. Investigation of heating and cooling degree-hour values in greenhouses with different color cover materials: the case of lettuce plant. *Infrastructure Ecol. Rural A.* 1: 235-252.
- Delgado-Tobón, A. E., W. A. Aperador-Chaparro, and R. G. García-Cáceres. 2020. Effect of modified greenhouse covers on the development of plants of *Lycopersicon esculentum* Mill. *DYNA* 87: 91-97.
- Délices, G., O. R. Leyva-Ovalle, R. Núñez-Pastrana, R. Gámez-Pastrana, P. Andrés-Meza, R. Serna-Lagunes, and C. Mota-Vargas. 2019. Biogeografía del tomate *Solanum lycopersicum* var. cerasiforme (Solanaceae) en su centro de origen (sur de América) y de domesticación (México). *Rev. Biol. Tropical* 67: 1023-1036.
- Forbes. 2020. Productores mexicanos de jitomate en EU. <https://www.forbes.com.mx/> (Consultado: abril 2020).
- Fuina, S., G. C. Marano, G. Puglisi, D. De Tommasi, and G. Scarascia-Mugnozza. 2016. Thermo-mechanical response of rigid plastic laminates for greenhouse covering. *J. Agric. Engin.* 47: 157-163.
- García-Enciso, E. L., M. De La Rosa-Ibarra, M. R. Quezada-Martin, y M. A. Arellano-García. 2015. Efecto de una película plástica modificada en aspectos agronómicos del cultivo de tomate (*Solanum Lycopersicum* L.). *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 11: 2105-2113.
- Gmizo, G., I. Alsina, and L. Dubova. 2012. The effect of colour plastic films on the growth, yield and plant pigment content of tomatoes. *Acta Horticulturae* 952: 217-224.
- González, M. H., N. A. Rodríguez-Muñoz, J. Escobedo-Bretado, y I. Martín-Domínguez. 2017. Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango. *Innovación sistemática* 1: 33-45.
- He, A.N., C. W. She, X. J. Wu, S. H. Li, and M. C. Zeng. 2017. Effect of light quality on photosynthesis and contents of active ingredients saxifraga stolonifera curt. *Pakistan J. Botany* 49: 2181-2187.
- Holcman, E., y P. C. Sentelhas. 2012. Microclimate under different shading screens in greenhouses cultivated with bromeliads. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16: 858-863.
- ITC-TRADEMAP (International Trade Center – TRADEMAP). 2019. Estadísticas del comercio para el desarrollo internacional de las empresas, datos comerciales mensuales, trimestrales y anuales. <https://www.trademap.org/Index.aspx> (Consultado: agosto 2019).
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal). 2018. Información de Municipios del estado de San Luis Potosí. <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM24sanluispotosi/municipios/municipios.html> (Consultado: septiembre 2019).
- Joon-Kook, K., P. Kyoung-Sub, C. Hyo-Gil, L. Sun-Yi, K. Bekhzod, H. Mi.Ran, and K. Nam-Jun. 2013. Growth and Developmental Characteristics of Lettuce, Tomato and Melon Grown under Spectrum Conversion Greenhouse Films. *J. Agric. & Life Sci.* 47: 57-63.
- Ramos-López, B. I., G. A. Martínez-Gutiérrez, I. Morales, C. Escamirosa-Tinoco y A. Pérez-Herrera. 2017. Consumo de agua y rendimiento de tomate de cáscara bajo diferentes cubiertas de invernaderos. *Horticultura Brasileira* 35: 265-270.
- Rizo, E. 2015. Distintos tipos de cubiertas para invernaderos. *Hortalizas*. <https://www.hortalizas.com/horticultura-protege/protegete/>. (Consultado: octubre 2019).
- Romero-Gámez, M., E. M. Suárez-Rey, N. Castilla, and T. Soriano. 2012. Evaluation of global, photosynthetically active radiation and diffuse radiation transmission of agricultural screens. *Spanish J. Agric. Research* 10:306-313.
- Saleh, S. M., M. A. Medany, U. A. El-Behiry, and A. F. Abu-Hadid. 2003. Effect of Polyethylene Colour on the Growth and Production of Cucumber (*Cucumis sativus*) Under Greenhouses during Autumn Season. *Acta Horticulturae* 608: 259-265.

ACKNOWLEDGEMENTS

To the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), and Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA), for funds and support granted to this study.

—End of the English version—



- Samaniego-Cruz, E., M. R. Quezada-Martin, M. De la rosa-Ibarra, J. Munguía-López, A. Benavides-Mendoza, y L. Ibarra-Jiménez. 2002. Producción de plántulas de tomate y pimiento con cubiertas de polietileno reflejante para disminuir la temperatura en invernadero. *Agrociencia* 36: 305-318.
- Schettini, E., F. R. De Salvador, G. Scarascia-Mugnozza, and G. Vox. 2011. Radiometric properties of photoselective and photoluminescent greenhouse plastic films and their effects on peach and cherry tree growth. *The J. Hort. Sci. and Biotech.* 86: 79-83.
- Soto-Bravo, F. 2018. Parámetros para el manejo del agua en tomate y chile dulce hidropónico bajo invernadero. *Agronomía Costarricense* 42:59-73.
- Statista. 2020. Volumen de tomates frescos producidos al año en el mundo en 2012 y 2019. <https://es.statista.com/estadisticas/529413/produccion-de-tomates-frescos-en-el-mundo/>. (Consultado: abril 2020).
- Su, N., Q. Wu, Z. Shen, K. Xia, and J. Cui. 2014. Effects of light quality on the chloroplastic (*sic.*) ultrastructure and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings. *Plant Growth Reg.* 73:227-235.
- TecnoAgro. 2020. Avances tecnológicos y agrícolas. Agricultura protegida en México. <https://tecnoagro.com.mx/no.-134/agricultura-protegida-en-mexico>. (Consultado: abril 2020).