

Estudio de las estrategias para la gestión del clima en invernaderos de baja tecnología en climas cálidos

Adrián Flores Ortega^{1§}
César Gutiérrez Vaca¹
Noé Saldaña Robles¹
Alberto Saldaña Robles¹
Adriana Saldaña Robles¹

¹Universidad de Guanajuato. Carretera Irapuato-Silao, km 9 El Copal, Irapuato, Guanajuato, México, CP. 36500. Tel: 462 624 18 89 Ext. 5266 (floresoa@ugto.mx; adriflorte13@yahoo.com.mx).

§Autor para correspondencia: floresoa@ugto.mx.

Resumen

En el presente trabajo se expone estudio del efecto que tiene el sombreado y la ventilación como estrategias para el manejo del microclima en invernaderos de baja tecnología en la región de Irapuato, Guanajuato. Mediante las mediciones de las variables climáticas de radiación solar global, temperatura y humedad del aire, se determinó la transmitancia de los invernaderos, las cuales fueron de $\tau = 0.56$ para el invernadero sin encalar y $\tau = 0.26$ y $\tau = 0.14$ para el invernadero sombreado mediante encalado y mallas térmicas. Se determinó la tasa de renovación de aire y resultó que un intercambio de $N = 59.4 \text{ h}^{-1}$ es adecuado para la regulación de la temperatura. Se concluyó que el sombreado tiene poca influencia en cuanto al comportamiento de la temperatura y la humedad del aire en el interior, mientras que la ventilación cenital y lateral, es determinante para la regulación del microclima.

Palabras clave: agricultura protegida, encalado, sombreado, tasa de ventilación.

Recibido: mayo de 2018

Aceptado: julio de 2018

Introducción

Un invernadero es una estructura cerrada, cubierta por un material transparente, capaz de modificar las condiciones ambientales exteriores y crear condiciones artificiales de microclima en el interior donde generalmente se encuentra un cultivo, para que éste desarrolle su máximo potencial productivo, aún fuera de temporada (Baile y González, 2001; Castilla, 2007). Sin embargo, estas condiciones no se logran de manera natural, son muchos los factores que interviene de manera directa e indirecta, entre los que más influyen son: el clima natural del lugar (medio exterior), las características constructivas (diseño de la estructura), el tipo de cultivo y su grado de desarrollo y otras variables, que en su interacción proporcionan el comportamiento térmico y de humedad del aire y aunado a las nuevas técnicas de control climático para actuar y a tiempo en los elementos del clima que mayor influencia tienen en el desarrollo de los vegetales, se alcanzarán las condiciones óptimas que los cultivos requieren para obtener buenos rendimientos (García y Martínez, 2015).

Para el caso de los invernaderos de baja tecnología, no se dispone con sistemas de calefacción ni humectación del aire, así que, durante el día, el comportamiento térmico y la humedad del aire, dependen completamente de la radiación solar, de la evapotranspiración del cultivo y de las renovaciones de aire por ventilación natural (Wang y Boulard, 2000; Baille y González, 2001; Boulard *et al.*, 2002). Para las condiciones climáticas de tipo semi cálido subhúmedo de la región de Irapuato (INEGI, 2000), los invernaderos presentan problemas tales como radiación solar alta, temperaturas altas, baja humedad relativa durante el día y alta humedad relativa durante la noche y al amanecer y por supuesto, concentraciones de dióxido de carbono limitadas, lo que hace que las condiciones de microclima no sean las más adecuadas para los cultivos.

La tecnología de alto nivel está todavía fuera del alcance para la mayoría de los productores, ya que implica altos costos de inversión y conocimientos técnicos, que, con la modesta capacidad de los agricultores, está limitada. Un modelo termodinámico simplificado, que ayuda a comprender el comportamiento de un invernadero, es el que se muestra mediante un par de ecuaciones:

$$V \dots c_p \frac{dT_i}{dt} = \{A_s R_e - U A_c (T_i - T_e) - \dots c_p V N (T_i - T_e) - \} ET \quad 1$$

$$\dots V \frac{dw_i}{dt} = - \dots V N (w_i - w_e) + ET \quad 2$$

Donde:

V - volumen del invernadero, m³;

- densidad promedio del aire, kg/m³;

N - tasa de renovación de aire en el invernadero debido a la ventilación, 1/s;

ET - evapotranspiración en el interior del invernadero, kg_w/s;

T_i - temperatura del aire en el interior del invernadero, C;

T_e - temperatura del aire en el exterior, C;
 A_s - área de suelo cubierto por el invernadero, m²;
 τ - transmitancia del invernadero;
 R_e - radiación global en el exterior; W/m²;
 U - coeficiente global de pérdida de energía por la cubierta, W/m² C;
 A_c - área de la cubierta, m²;
 C_p - calor específico del aire, J/(kg °C);
 W_i - razón de humedad del aire en el interior del invernadero, kg_w/kg;
 W_e - razón de humedad del aire en el exterior del invernadero, kg_w/kg;
 λ - calor latente de vaporización del agua, J/kg.

Se observa que, para modificar la temperatura y la humedad del aire interior de un invernadero pasivo, se puede actuar en la ventilación, la cual permite la renovación de aire caliente interior por aire más fresco del exterior. Esto se consigue por medio de aberturas permanentes o temporales en el techo, en las paredes laterales o frontales (Boulard *et al.*, 2002; Castilla, 2007), pero cuando las condiciones climáticas de la región no son favorables, no ayudan mucho estas acciones. También diversos estudios han demostrado que otra opción para controlar las altas temperaturas, es reducir la intensidad de radiación solar que penetra en el invernadero mediante sombreado con pantallas térmicas, mallas de sombreado o enalado (Caldari, 2007; Meca *et al.*, 2007), que junto con la ventilación, se puede mejorar las condiciones de microclima.

Ante esta situación, surge el interés de estudiar la efectividad del sombreado y la ventilación como estrategias para el manejo del clima de los invernaderos más comunes en la región de Irapuato, Guanajuato. Esto permitirá tomar decisiones en cuanto a su manejo, para seleccionar los equipos de climatización y adaptar las tecnologías más apropiadas para cada tipo de invernadero y cada cultivo, generando un microclima con la mínima inversión en energía.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en dos invernaderos típicos de regiones cálidas, ubicados en la región de Irapuato, Guanajuato. (20° 40' 27" latitud norte, 101° 20' 51" longitud oeste, 1 720 m), los cuales son de techo curvo con altura a la canaleta de 3.5 y la altura máxima de 6.0 m (Figuras 1 y 2). La cubierta es de polietileno blanco lechoso de 720 galgas. Ambos poseen ventilación cenital y lateral del tipo de cortina enrollable protegidas con malla anti áfidos y de accionamiento manual, catalogados como invernaderos de baja tecnología.



Figura 1. Vista exterior del invernadero sin sombreo.



Figura 2. invernadero encalado y con mallas térmicas en el interior.

El efecto del sombreo se verificó en un invernadero encalado y además con mallas térmicas en el interior con diferente grado de sombreo. El encalado consistió en opacar el material de cubierta mediante la adición de una mezcla a base de cal, llamado comercialmente como blanco España, cuya opacidad depende de la dosis aplicada. El invernadero es de techo semicircular con ventilación cenital y lateral, cubierto con polietileno blanco lechoso de 70% de transmisividad. El monitoreo del microclima se realizó cada 10 min, midiendo radiación global, humedad relativa y temperatura del aire durante los meses cálidos de marzo a mayo.

Para la medición de las variables climatológicas, se consideraron los registros históricos de una estación meteorológica automática de la Fundación Guanajuato Produce, AC., con información a intervalos de cada 15 minutos de las variables climatológicas de la región: temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar global, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, precipitación y evapotranspiración potencial. La estación meteorológica está equipada con un piranómetro CM3 de 300 nm a 1 100 nm y capacidad para 1 200 W/m². Se utilizaron dos estaciones meteorológicas portátiles de la marca Davis modelo Vantage pro2 Plus equipada con un piranómetro con medición en un ancho de banda de 300 nm a 1 100 nm y capacidad para 1 200 W/m². Una estación se instaló dentro del invernadero y otro en la parte exterior, recabando los datos cada 10 minutos.

Adicionalmente, se instalaron sensores de temperatura y humedad del aire en el interior y exterior del invernadero, adaptados a un sistema de adquisición de datos de la marca Vernier con interface a una PC, con intervalos de medición cada minuto, para posteriormente considerar un promedio cada 10 minutos. Para la determinación de la transmitancia, se empleó la definición adoptada por la mayoría de los investigadores (Montero *et al.*, 2000; Baile y González-Real, 2001; Hernández *et al.*, 2001), la cual es la fracción de la radiación solar global transmitida hacia dentro del invernadero (R_i) en relación a la radiación solar global que incide sobre la superficie de la tierra (R_e).

$$\tau = \frac{R_i}{R_e} \quad 3$$

Para la determinación de la tasa de renovación de aire debida a la ventilación natural, se consideró el cambio en el contenido de vapor de agua a través de un balance de materia (ecuación 4), cuya solución está dada por la ecuación (5) (Baptista *et al.*, 1999).

$$\frac{d}{dt}(\dots Vw) = \dots_e V_e w_e - \dots_s V_s w \quad 4$$

$$\ln(w_e - w) = -\frac{V_e}{V} t + c \quad 5$$

Donde:

V_e/V es la relación del flujo volumétrico que entra al volumen total del invernadero, representando la tasa de renovación de aire, N.

w, w_e - es la concentración de vapor de agua en un kilogramo de aire seco (kg_w/kg) que existe en el invernadero y en el exterior, respectivamente, en un determinado tiempo t .

Al hacer la regresión lineal sobre una gráfica semi logarítmica con las mediciones realizadas, la pendiente de la recta representará la relación $N = V_e/V$ y entonces se podrá determinar el flujo de aire debido a la ventilación.

Resultados y discusión

La ventilación es una de los medios más importantes con que cuenta un invernadero de baja tecnología para la regulación del microclima, ya que favorece el intercambio de aire con el medio exterior, con la cual se regula la temperatura y la humedad del aire y como consecuencia, las concentraciones de dióxido de carbono y oxígeno. En las Figuras 3 y 4, se muestra las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire en un invernadero vacío completamente cerrado en relación con las condiciones del aire en el exterior. Se observa que el aire confinado alcanza una temperatura promedio de 46.34 °C, cuando en el exterior, la temperatura promedio del aire es de 25.90 °C, una diferencia de temperatura promedio de 20.44 °C, mientras que la humedad relativa en el interior es más baja 8%, lo cual el invernadero convierte el ambiente exterior de cálido seco a un microclima de tipo desértico.

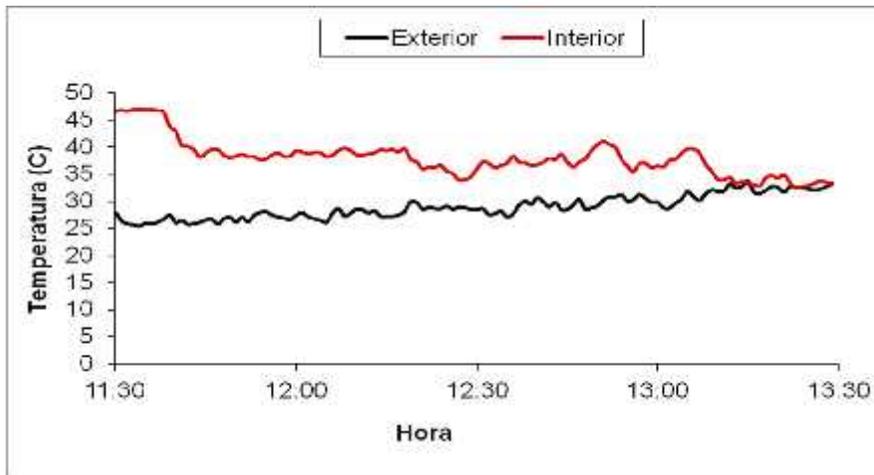


Figura 3. Cambio de la temperatura en un proceso de ventilación natural.

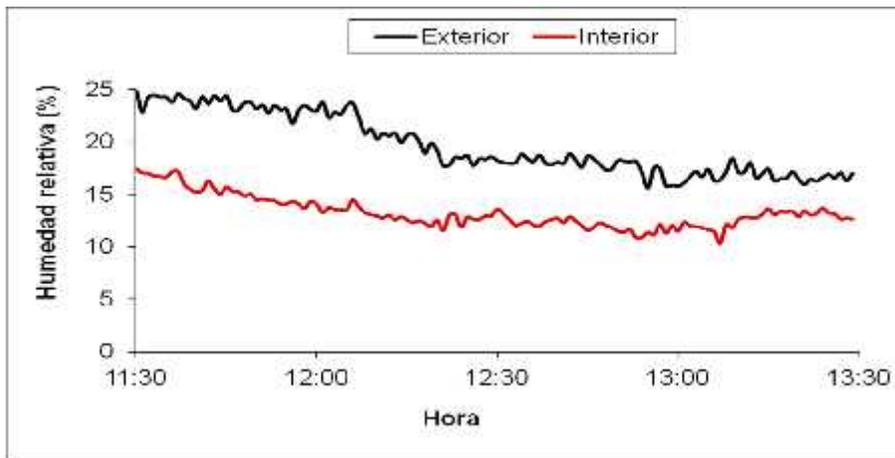


Figura 4. Humedad relativa en un proceso de ventilación natural.

Quizás la humedad absoluta (Figura 5) es el parámetro más visible en el comportamiento del invernadero ante la renovación del aire.

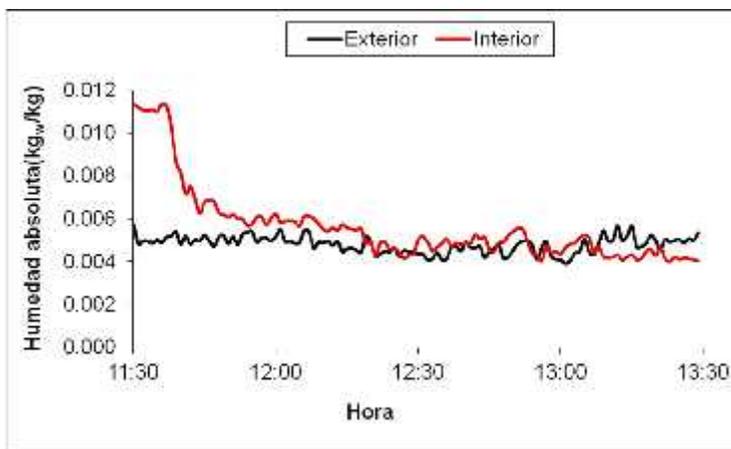


Figura 5. Humedad absoluta del aire en un proceso de ventilación.

Con la abertura de las ventanas cenitales, se inicia el flujo de aire entre el interior y el exterior, disminuyendo la temperatura y la humedad, tendiendo a alcanzar las condiciones del aire exterior. Con una velocidad promedio del viento de 3 km/h, la tasa de renovación de aire es de $N= 13.68 \text{ h}^{-1}$ con un coeficiente de correlación de los datos de $R^2= 0.94$. Con esta capacidad de ventilación, la diferencia en la temperatura entre el interior y el exterior es de $\Delta T= 11.58 \text{ }^\circ\text{C}$ en promedio. Para cuando se abren las ventanas cenitales y laterales, se alcanza una tasa de renovación promedio de $N= 59.4 \text{ h}^{-1}$, con $R^2= 0.97$ y un salto térmico $\Delta T= 1.10 \text{ }^\circ\text{C}$ en promedio, prácticamente se alcanzan las condiciones del exterior. La ventilación tiene una gran influencia en el manejo del microclima de un invernadero, junto con ello habrá un abastecimiento de dióxido de carbono y oxígeno con el ambiente confinado.

Cuando el cultivo de jitomate está en plena producción, con una altura de 2 m y se abren ventanas cenitales y laterales, el intercambio de aire es de $N= 13.32 \text{ h}^{-1}$, con $R^2= 0.96$, prácticamente la temperatura del interior alcanza a igualar la temperatura del aire exterior en un lapso de 4 a 5 min, mientras que la humedad del aire interior es mayor debido a la evapotranspiración de las plantas (Figuras 6, 7 y 8).

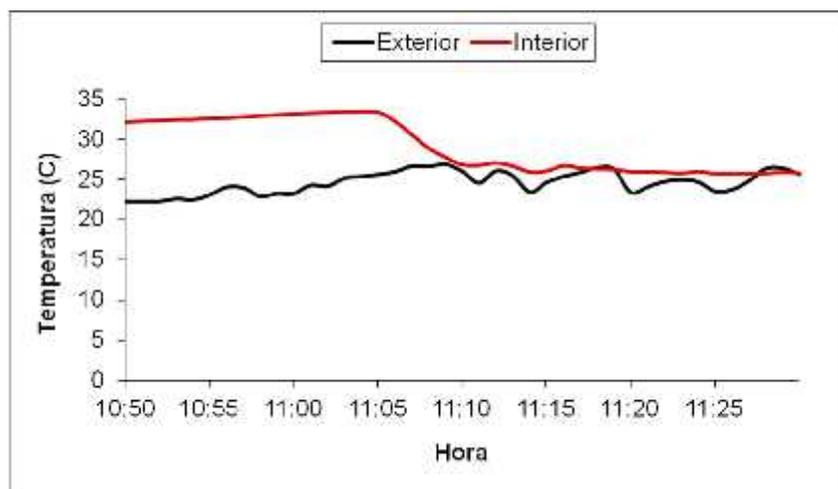


Figura 6. Cambio de temperatura con la ventilación cenital y lateral.

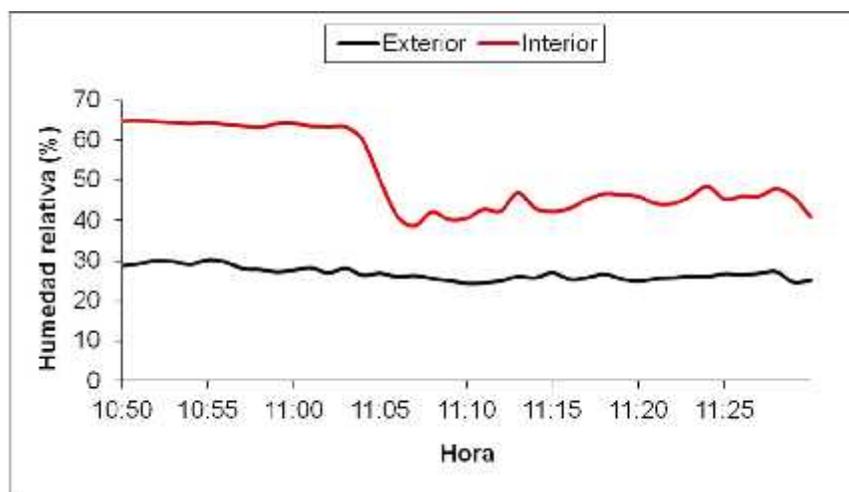


Figura 7. Cambio de la humedad relativa con ventilación cenital y lateral.

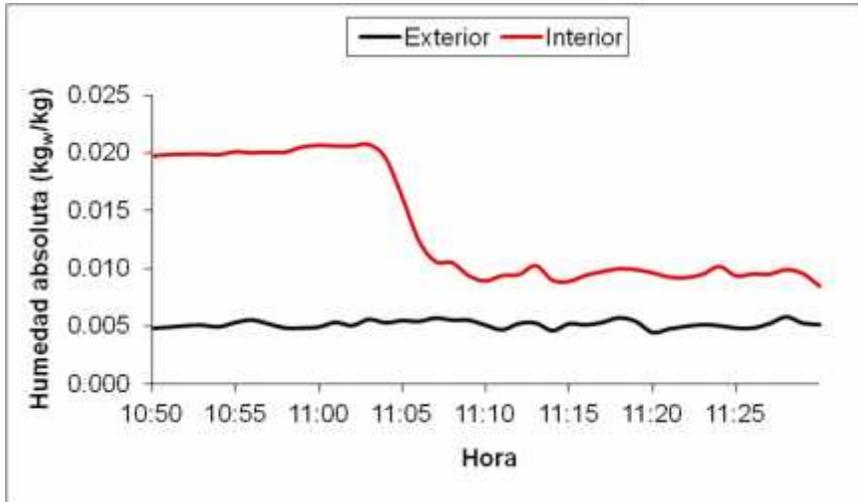


Figura 8. Cambio de la humedad absoluta con ventilación cenital y lateral.

Para el caso del invernadero con sombreado, en las Figura 9 se muestra la radiación solar global en el interior y el exterior. En el área cubierta con malla térmica la transmitancia promedio es de $\tau = 0.26$, con una desviación estándar de 0.03, mientras que cuando no se aplica sombreado la transmitancia con el mismo material de cubierta es de $\tau = 0.56$ Flores *et al.* (2012). Auxiliado con ventilación cenital y lateral, se logra una diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior es de $\Delta T = 2.8$ °C con una desviación estándar de 1.1 °C. La diferencia de la temperatura del aire entre el interior y el exterior no es muy significativo comparado con invernadero sin sombreado y como se observa en la humedad relativa del aire, las condiciones térmicas dependen más de la ventilación que del sombreado.

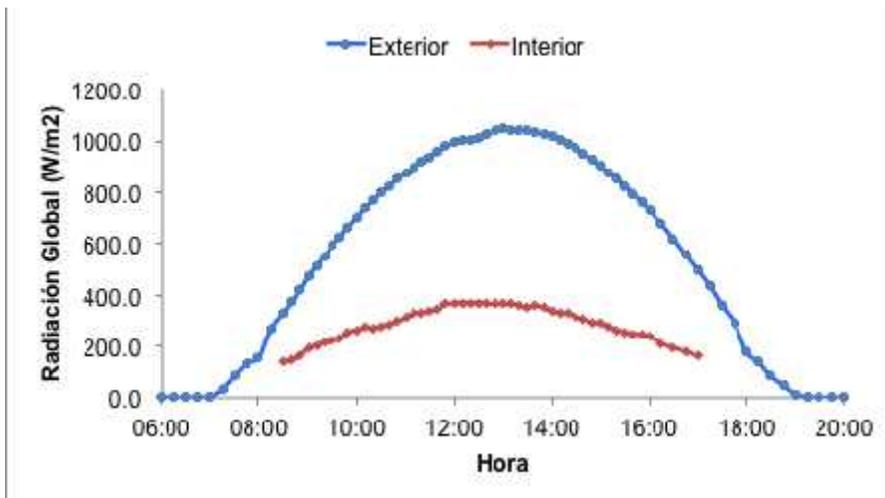


Figura 9. Radiación solar en invernadero encalado y con pantalla térmica delgada.

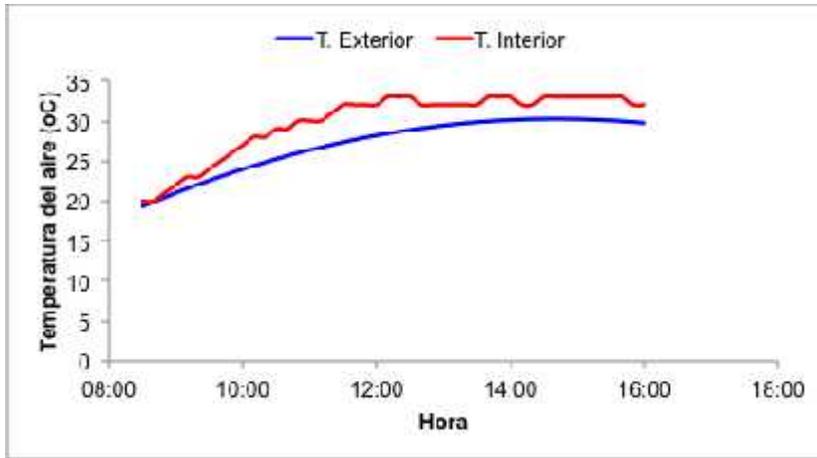


Figura 10. Temperatura del aire en un invernadero encalado y con pantalla térmica delgada.

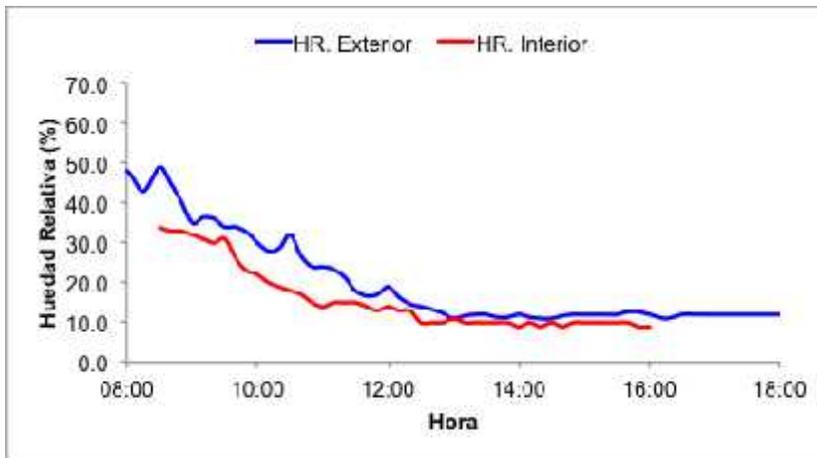


Figura 11. Humedad relativa en invernadero encalado y con pantalla térmica delgada.

En la Figura 12, se muestra la radiación global en el exterior e interior del invernadero en la zona con encalado y sombreado con pantalla térmica más densa con la cual se alcanza una transmitancia promedio de $\tau = 0.14$ con desviación estándar de 0.03.

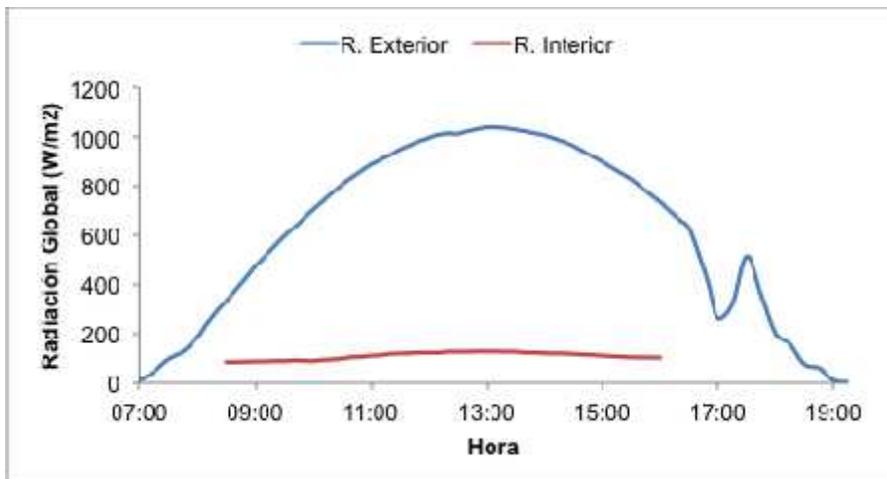


Figura 12. Radiación solar en invernadero encalado y con pantalla térmica gruesa.

En la Figura 13 se muestra la temperatura del aire en el interior y exterior, obteniendo una diferencia $\Delta T=3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ en promedio, con una desviación estándar de $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en la Figura 14, se muestran las condiciones de humedad relativa del aire en ambos medios, donde se observa que la ventilación tiene más influencia en las características del microclima en comparación con el sombreo.

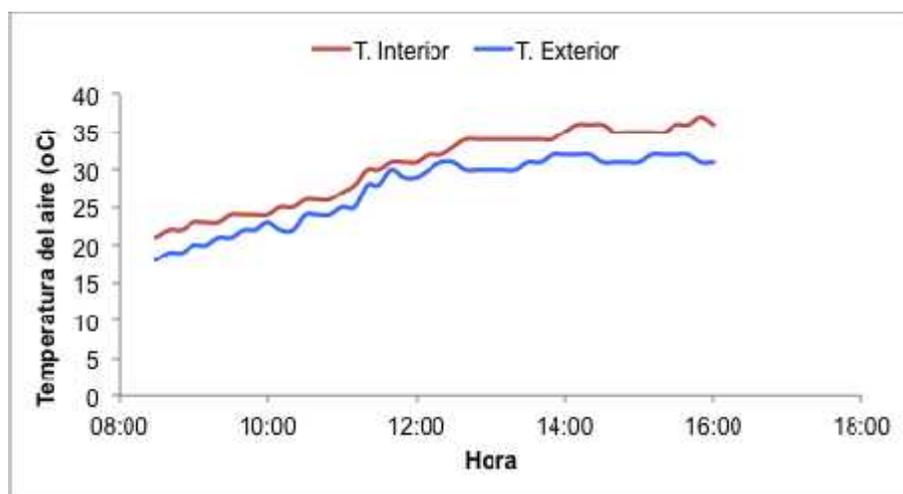


Figura 13. Temperatura del aire en invernadero encalado y con pantalla térmica densa.

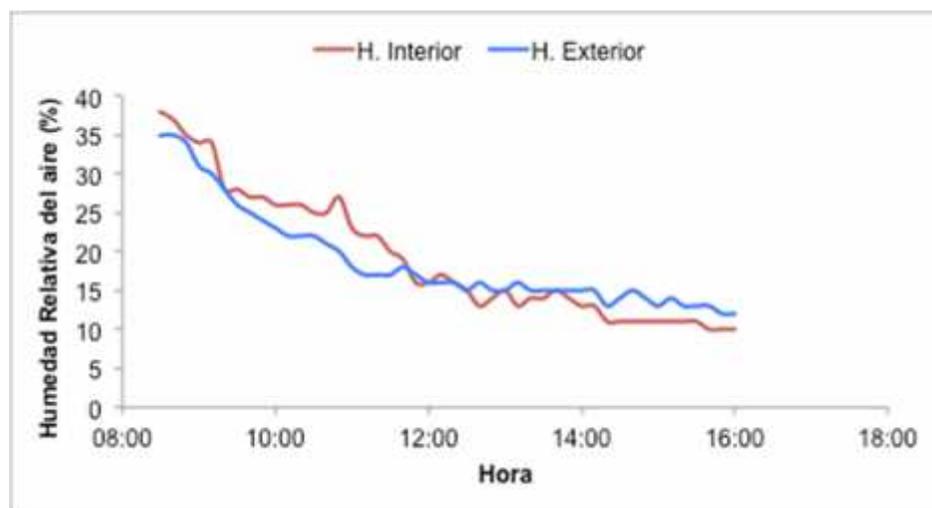


Figura 14. Humedad relativa del aire en invernadero encalado y con pantalla térmica densa.

Conclusiones

Para las características climáticas de la región de Irapuato, Guanajuato, se observó que los invernaderos con manejo de clima de manera pasiva con ventilación cenital y lateral, se desempeñan adecuadamente. Sin embargo, cuando de manera natural, para ciertas horas y ciertas temporadas, el clima local no es el más adecuado para los cultivos, el invernadero afecta un poco más esta situación, registrando más altas temperaturas y bajos contenidos de humedad en el aire, lo cual da la impresión que el invernadero solo viene a poner las condiciones climáticas más desfavorables, a menos que se disponga de sistemas más

complejos para la modificación del microclima, tales como evaporación de agua mediante nebulización o paneles húmedos y calefacción, pero eso ya implica gastos adicionales que el productor no está dispuesto a invertir, sobre todo si el destino de la producción será dirigida a los mercados locales.

Para este tipo de invernaderos, el sombreado no muestra muchas ventajas para disminuir la temperatura, el comportamiento térmico está más influenciado por la ventilación y la evapotranspiración. Un material de cubierta apropiado, con una transmisividad de $\tau = 0.70$ y un adecuado dimensionamiento de las ventanas laterales y cenitales, serían suficientes para su funcionamiento. Para la región en estudio los invernaderos de baja tecnología tienen un buen desempeño durante parte de la primavera y el otoño, no así para el verano.

Literatura citada

- Baille, A. y González, R. M. 2001. Utilización de modelos para el control y la ayuda a la decisión en invernaderos. situación actual y perspectivas, incorporación de tecnología al invernadero mediterráneo. Estación Experimental "Las Palmerillas" de Cajamar, España.
- Baptista, F. J.; Bailey, B. J.; Randall, J. M. and Meneses, J. F. 1999. Greenhouse ventilation rate: theory and measurement with tracer gas techniques. *J. Agric. Eng. Res.* 72:363-374.
- Boulard, T.; Kittas, C.; Roy, J. C. and Wang, S. 2002. Convective and ventilation transfers in greenhouses Part II: Determination of the Distributed Greenhouse Climate, *Biosystems Engineering*. 83(2):129-147.
- Caldari, J. P. 2007. Manejo de la luz en invernaderos. Los beneficios de la luz de calidad en el cultivo de hortalizas. I Simposio Internacional de Invernaderos. México, DF. 1-5.
- Castilla, N. 2007. Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. 2ª Edición, A. Madrid Vicente, Ediciones.
- Flores, O. A.; Martínez, S. G. y Quiroz, R. J. C. 2012. Predicción de la transmitancia de un invernadero con techo removible. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 4:743-746.
- García, G. F. J. and Martínez, T. J. F. 2015. Control climático en invernaderos y las nuevas aplicaciones. *Rev. Agricolae No.* 7:52-59.
- Hernández, J.; Hernández, G.; Soriano, T.; Morales, M. I.; Escobar J. y Castilla N. 2003. La orientación de un invernadero y la geometría de su cubierta determinan la transmisividad global a la radiación solar. *Actas de Horticultura*. 39: 379-
- Meca, D.; López, J. C.; Gázquez, J. C.; Pérez, P. J. y Baeza, E. 2007. Efecto de dos dosis de blanqueo sobre la productividad y el microclima de un cultivo de pimiento en invernadero. *Acta de Horticultura*. Sociedad Española de Ciencias Hortícolas. 68:884-887.
- Montero, J. I.; Antón, A.; Hernández, J. and Castilla, N. 2001. Direct and diffuse light transmission of insect proof screens and plastic films for cladding greenhouses. *Acta Hort. (ISHS)*. (559):203-210.
- Wang, S. and Boulard, T. 2000. Measurement and prediction of solar radiation distribution in full-scale greenhouse tunnels. *Agronomie*. 20(34):41-50
- Wu, G. W. and Song, J. N. 2010. Design and experiment on vibration spacing scarifier for meadow. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*. 41(2):42-46.
- Xin, L.; Liang, J. and Qiu, L. 2013. Dinamic analysis and experimental research of vibratory subsoiler system. *J. Theoretical Appl. Inf. Technol.* 48(2):1195-1201.

- Zhao, D. W. 2010. Research and design of vibrating subsoiler. *Agric. Sci. Technol. Equipment.* 190(4):29-30.
- Zhou, Y. 2009. Ploughing resistance and kinematics analysis of vibration fertilizer discharging mechanism. *Modern Agric. Machinery.* 10:74-76.