

## Análisis de la transmitancia de luz en un invernadero para producción de jitomate

Adrián Flores Ortega\*, Gerardo Martínez Soto\*, J. Concepción Quiroz Ramírez\*, Fidel René Díaz Serrano\*, Manuel Enrique Romero Valdez\*

### RESUMEN

En el presente trabajo se presenta un análisis de la transmitancia de la radiación solar en un invernadero con techo curvo para producción de jitomate en Irapuato, Gto., México. Se consideró un modelo que involucra la latitud del lugar, la forma y orientación de la estructura, así como las propiedades radiométricas comerciales del material de la cubierta. El modelo se contrastó con mediciones de radiación solar global y Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR), tanto en el exterior como en el interior del invernadero, mediante un sistema de adquisición de datos Vernier® acoplado a una PC y una estación meteorológica Vantage Pro2 Plus (estación con una frecuencia de monitoreo cada minuto y cada 15 minutos). Los resultados obtenidos muestran variaciones de 35 % en la radiación PAR respecto al modelo y 41,4 % respecto a las especificaciones comerciales del material; mientras que para la radiación global, la variación es del 12,5 % respecto al modelo y 20 % con las especificaciones comerciales del material. El análisis permite conocer el efecto que tienen los factores difíciles de cuantificar, tales como polvo, agua y deformaciones en el material de la cubierta.

### ABSTRACT

In this paper is presented an analysis of the solar radiation transmittance on a curved roof greenhouse for tomato production in Irapuato, Gto., Mexico. It was considered a model that involves the latitude of the location, shape and orientation of the structure as well as the radiometric properties of the roof commercial material. The model was compared with measurements of global solar radiation and photosynthetic active radiation (PAR), both outside and inside of the greenhouse, using a Vernier® data acquisition system attached to a PC and a Vantage Pro2 Plus weather station monitoring every minute and 15 minutes. The results showed variations of 35 % on PAR compared with the model and 41,4 % compared with commercial specifications of the material, while for global radiation, the variation was 12,5 % compared with the model and 20 % compared with commercial specifications of the material. The analysis allows us to know the effect of the factors such as dust, water and deformations on the material of the roof.

Recibido: 18 de junio de 2010  
Aceptado: 18 de noviembre de 2011  
Artículo basado en las instrucciones para  
autores vigentes hasta junio 2011

### INTRODUCCIÓN

La importancia de la radiación solar en un invernadero puede juzgarse desde dos puntos de vista: por un lado, ésta constituye la principal fuente de energía para la formación del efecto invernadero y, por otro, es la principal fuente de energía para el crecimiento y desarrollo de las plantas. La fracción de la radiación solar que es útil para el proceso de la fotosíntesis es designada como *Radiación Fotosintéticamente Activa* (PAR), ésta corresponde a lo que es llamado *luz*: aquel fenómeno que es perceptible por el ojo humano y que comprende el espectro electromagnético de longitud de onda entre 400 nm y 700 nm (Giacomelli, 1998; Castilla, 2001).

#### Palabras clave:

Invernadero; transmitancia; transmisividad.

#### Keywords:

Greenhouse; transmittance; transmissivity.

Las consideraciones de la radiación solar en los sistemas de agricultura protegida son importantes para la productividad de un cultivo, por lo tanto, es necesario analizar los factores que pueden modificar la calidad y la cantidad de la radiación que llega a las plantas. El objetivo de la cubierta transparente

\*División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Ex Hacienda El Copal, carretera Irapuato-Silao km 9, Apdo. Postal 311, C. P. 36500, Irapuato, Gto., México. Tel. (462) 624 24 84, ext. 126; fax (462) 624 24 84, ext. 103. Correos electrónicos: floresoa@dulcinea.ugto.mx, adriflorte@hotmail.com.

de los invernaderos es proporcionar una transmisión de energía solar tan grande como sea posible hacia el interior. Los valores determinados bajo condiciones ideales de laboratorio proporcionan un indicador potencial de transmisión de radiación, pero ya en campo presentan valores diferentes, debido a muchos factores incontrolables que se presentan (Wang y Boulard, 2000), así como a los procedimientos de medición que se involucran y al uso de sensores electrónicos. Cuando lo anterior no es posible, el desempeño de la cubierta se intuye comparando la respuesta de la planta, a veces con apreciaciones a simple vista, representando cada uno cierto nivel de costo así como de precisión (Giacomelli, 1998).

El parámetro que indica el comportamiento de un invernadero respecto a la radiación solar es la transmitancia o eficiencia térmica (Zabeltitz, 1998; Giacomelli, 1998; Boulard y Wang, 2000), la cual es definida como la relación entre la intensidad de la radiación transmitida debajo de la superficie de la cubierta dentro de un determinado ancho de banda y la radiación incidente sobre la superficie dentro del mismo ancho de banda (Zabeltitz, 1998). Se ha observado que dicha capacidad está en función de parámetros tales como: condiciones climáticas (nubosidad), posición del sol en el cielo, la geometría de la cubierta del invernadero, su orientación respecto a los ejes cardinales (Norte-Sur, Este-Oeste), características radiométricas del tipo de cubierta, estado de limpieza, condensación de agua en su superficie y la cantidad de elementos estructurales que provocan sombreo (Bot, 1983; Hernández *et al.*, 2003). Es de esperarse que estos parámetros difieran dependiendo de la situación geográfica, tipo y manejo del invernadero, sin embargo, la información que de ello se tiene es escasa (Hernández *et al.*, 2003), más aún si se consideran invernaderos de baja tecnología (Giacomelli, 1998). A eso hay que añadirle que las propiedades del material ya están definidos por el fabricante y el parámetro que interesa en su transmisividad en la mayoría de los plásticos para invernadero oscila entre 0,8 a 0,9.

En cuanto al ángulo de incidencia, la transmitancia a la radiación solar directa es mayor cuando más perpendicular incide sobre la cubierta del invernadero (Bot, 1983). Edlin y Willaver (1961), citados por Duncan y colaboradores (1981), detectaron que para ángulos de inclinación entre 0° y 45° la transmitancia decrece mínimamente, pero que en ángulos mayores a 60° decrece significativamente. En la figura 1 se muestra la transmitancia para dos tipos de materiales típicos para invernadero (polietileno térmico 88 % y tricapa 92 %) y su ángulo de incidencia (Montero *et al.*,

2001). La transmitancia global media debe integrarse como un valor medio en todo el invernadero, dada la variabilidad de la radiación a que están sometidos los diversos puntos.

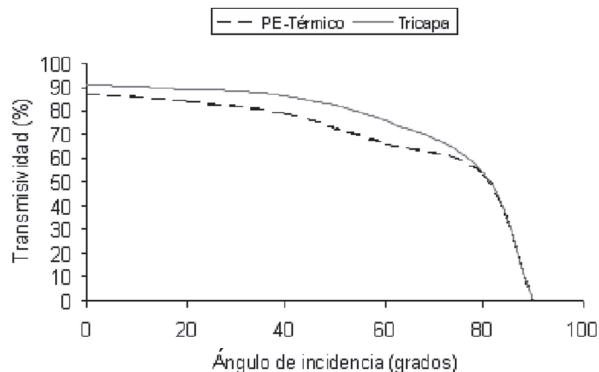


Figura 1. Variación de la transmitancia en función del ángulo de incidencia.

## MÉTODOS

El estudio se realizó en un invernadero de techo curvo de 3 m a la canaleta y una superficie de 1000 m<sup>2</sup> con cultivo de jitomate, ubicado en Irapuato, Gto., México. La orientación de la estructura es de Norte-Sur y la cubierta es de polietileno blanco lechoso, con 70 % de transmitancia (figura 2).



Figura 2. Invernadero de techo curvo.

La instrumentación para las mediciones consistió en la instalación de sensores de luz para un ancho de banda de 400 nm - 700 nm. Un sensor se instaló en el exterior y otro en el interior. Los rangos de medición son de 0 lux a 600 lux, con resolución de 0,2 lux; de 0 lux a 6 000 lux, con resolución de 2 lux; de 0 lux a 150 000 lux, con resolución de 50 lux (ambos acoplados a un sistema de adquisición de datos de la marca

Vernier® y con interfase a una PC). Para la radiación global se instaló una estación meteorológica de la marca Davis modelo Vantage pro2 Plus equipada con un piranómetro con medición en un ancho de banda de 300 nm a 1100 nm y capacidad para 1200 W/m². Adicionalmente, se utilizaron los registros de una estación meteorológica ubicada a 200 m del invernadero equipada con piranómetro CM3 de 300 nm a 1100 nm y capacidad para 1200 W/m².

Se partió de un modelo matemático simplificado considerando: a) el ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre una superficie inclinada respecto a la horizontal, b) el porcentaje de atenuación de la radiación solar en función del ángulo de incidencia (figura 3) y c) la transmisividad del material de cubierta proporciona comercialmente.

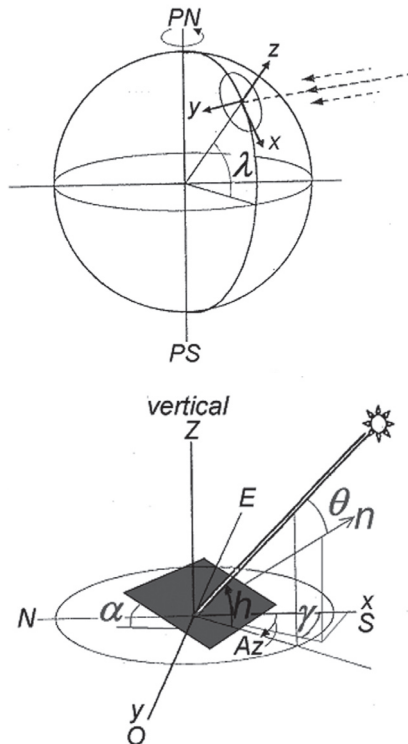


Figura 3. Relaciones geométricas para la radiación solar directa.

$$\beta = \frac{R_i}{R_e} \tag{1}$$

$$R_i = \tau \cdot k(\theta) \cdot R_e \tag{2}$$

en donde:

$\beta$  -transmitancia del invernadero;

$R_i$  - radiación solar en el interior del invernadero;

$R_e$  - radiación solar en el exterior del invernadero;

$\tau$  - transmisividad del material de la cubierta;

$k(\theta)$  - factor que depende del ángulo de incidencia de la radiación solar con la superficie del invernadero.

El modelo se contrastó con mediciones de radiación solar global y PAR, tanto en el exterior como en el interior del invernadero, en diferentes meses del año. La frecuencia de monitoreo fue de un minuto y se hizo un promedio del monitoreo de 10 minutos. La estación meteorológica tiene frecuencia de monitoreo cada 15 minutos.

De la geometría para la radiación solar directa que incide sobre una superficie inclinada, se tiene que el ángulo de incidencia está dado por la siguiente relación (figura 3 y figura 4) (Duffie *et al.*, 2006; Solar Radiation Monitoring Laboratory, 2003):

$$\cos \theta = \text{sen} \delta \text{ sen} \lambda \cos \alpha - \cos \delta \cos \lambda \cos \alpha \cos \omega + \cos \delta \text{ sen} \lambda \text{ sen} \alpha \cos \omega \cos \gamma + \cos \delta \text{ sen} \alpha \text{ sen} \omega \text{ sen} \gamma \tag{3}$$

en donde:

$\theta$  - ángulo de incidencia;

$\alpha$  - ángulo de inclinación del plano de la superficie respecto a la horizontal;

$\gamma$  - ángulo de orientación;

$\lambda$  - latitud del lugar;

$\omega$  - ángulo horario;

$\delta$  - declinación solar.

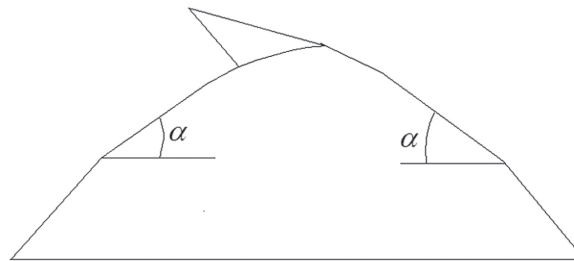


Figura 4. Seccionado de techo curvo a superficies planas.

Para el caso de una superficie orientada de Norte a Sur e inclinada hacia el Este ( $\gamma = -90^\circ$ ) y al Oeste ( $\gamma = 90^\circ$ ), la ecuación de la declinación solar se simplifica de la siguiente manera:

$$\cos \theta = \text{sen} \delta \text{ sen} \lambda \cos \alpha + \cos \delta \cos \lambda \cos \alpha \cos \omega \mp \cos \delta \text{ sen} \alpha \text{ sen} \omega \tag{4}$$

El techo curvo del invernadero presenta diferentes ángulos de inclinación, para ello, se seccionó la superficie en diversas partes, encontrando que después de seccionar cada lado en cuatro partes se disminuía el error, teniendo así ángulos promedio de inclinación entre la canaleta y la parte más alta.

**Tabla 1.**  
Seccionado de techo curvo a superficies planas inclinadas.

Posición de la superficie	Ángulo de inclinación respecto a la horizontal (grados)	Área (m <sup>2</sup> )
Este	50	57,96
Este	36	69,12
Este	25	30,96
Este	14	64,8
Oeste	48	61,92
Oeste	35	59,04
Oeste	28	16,56

Para la atenuación de la radiación solar por efecto de la variación del ángulo de incidencia sobre la superficie, se consideraron los estudios de Montero (2000) para polietileno térmico, en los que se relaciona el porcentaje de atenuación de la radiación solar en función del ángulo de incidencia (figura 5).

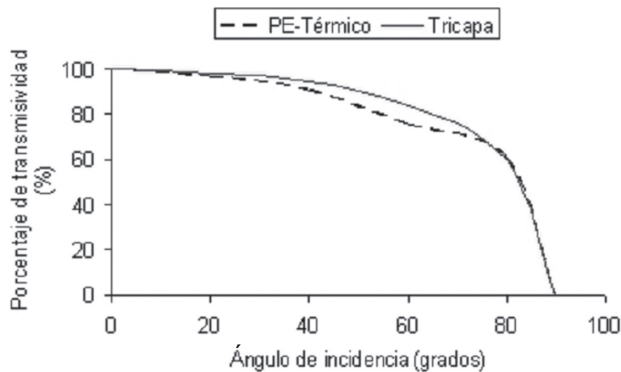


Figura 5. Porcentaje de transmisividad en función del ángulo de incidencia.

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos se muestran en las gráficas de la figura 6 a la figura 11. En la figura 6 se muestra la transmitancia calculada con el modelo propuesto para los días de septiembre. En la figura 7 se muestra el comportamiento de la radiación global medida en el exterior y en el interior del invernadero durante tres días consecutivos, y en la figura 8 se muestra la transmitancia a la radiación global calculada, según la definición, con las mediciones realizadas. El modelo muestra una transmitancia promedio de 0,64 con atenuación

de 0,61 para el medio día. Los datos experimentales (figura 8) muestran una transmitancia promedio de 0,56 con una desviación estándar de 0,025 y atenuación más pronunciada, pero ésta dándose después del medio día (13:00 h). Ese último fenómeno se presentó debido a la presencia de la estructura de la ventana cenital, la cual limita la entrada de radiación global hasta 0,31.

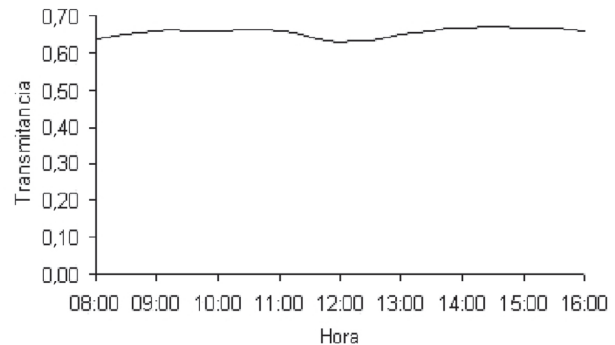


Figura 6. Predicción de la transmitancia.

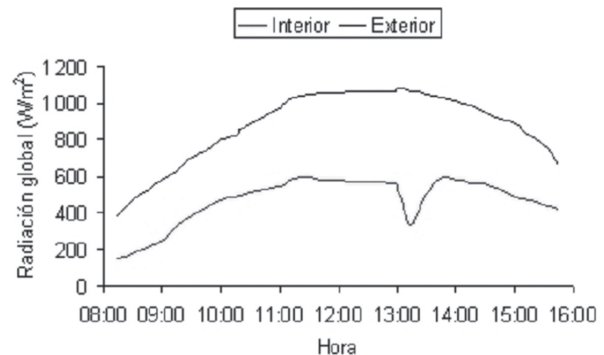


Figura 7. Radiación global medida.

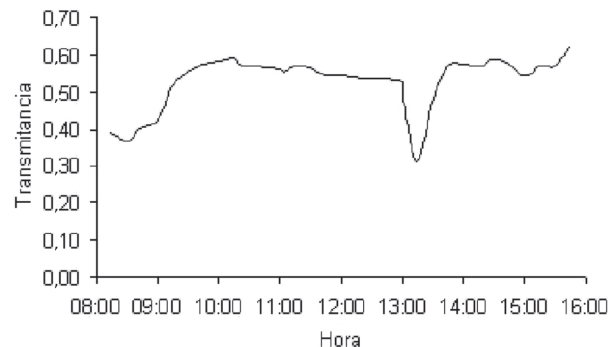


Figura 8. Transmitancia obtenida de la radiación global medida.

Nuestros resultados muestran una diferencia en la transmitancia medida 12,5 % menor que la calculada con el modelo propuesto, mientras que comparada

con el valor comercial proporcionado por el fabricante, el valor medido es menor en 20 %. Estas diferencias se atribuyen a los factores difíciles de cuantificar, tales como deformaciones e impurezas en la cubierta, por citar algunos.

Para la radiación solar en el ancho de banda de 400 nm a 700 nm PAR, se observa un comportamiento similar (figura 9) con una disminución después del medio día. Sin embargo, la transmitancia a la radiación PAR es aún más disminuida, mostrando una transmitancia promedio de 0,41 con desviación estándar de 0,02, debido a que los sensores son orientados hacia la radiación solar directa. Concluimos de ello que la disminución se dio porque el sombreo de la estructura de la ventana cenital es de 0,32. Dichos resultados muestran una transmitancia promedio de 35 % menor respecto al modelo propuesto y del 41,4 % respecto a las especificaciones comerciales de la transmisividad del material. Sin embargo, por la latitud del lugar, los niveles de luz en el interior del invernadero siguen siendo adecuados para el cultivo del jitomate, si se considera que se requieren de 10 000 lux a 40 000 lux (Caldari, 2007) (Figura 10, Figura 11).

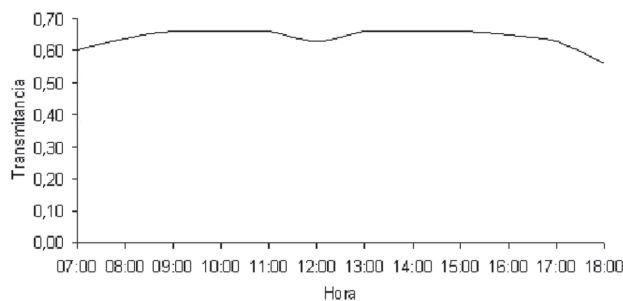


Figura 9. Predicción de la transmitancia.

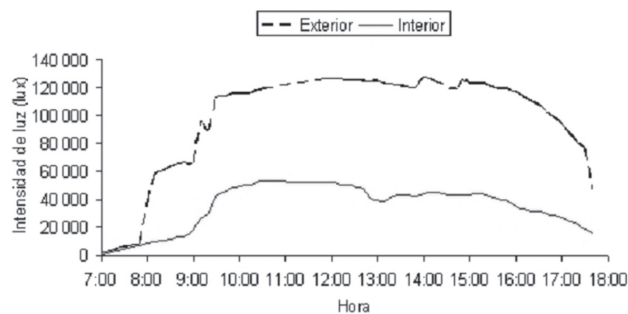


Figura 10. Intensidad de luz medida.

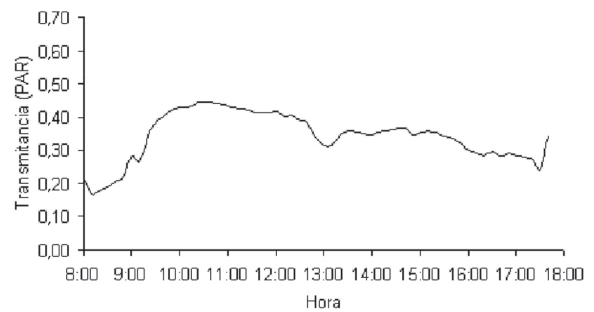


Figura 11. Transmitancia de PAR medida.

Para el caso de un día nublado de verano, el comportamiento de la transmitancia a la radiación PAR se muestra más irregular (figura 12, figura 13) debido a que desaparece la radiación directa y solo se capta una porción de la radiación solar difusa. Dado lo anterior, se obtiene un valor promedio de 0,41 con desviación estándar de 0,06.

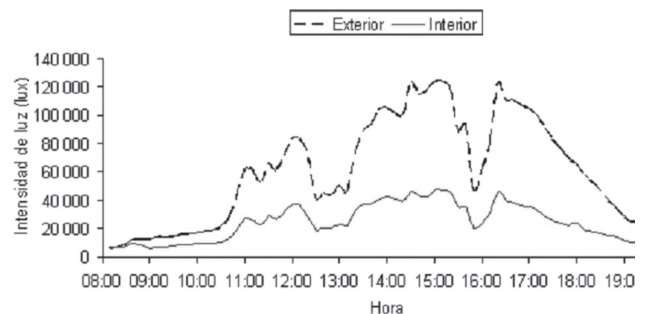


Figura 12. Intensidad de luz medida para un día nublado.

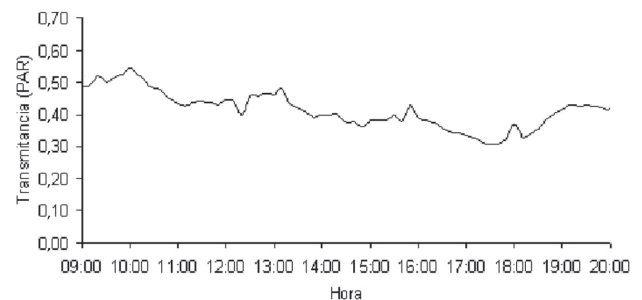


Figura 13. Transmitancia de PAR para un día nublado.

Para los días del mes de diciembre, la transmitancia promedio a la radiación PAR es de 0,24 debido a que el ángulo de incidencia es mayor, pero los niveles de luz son 27 000 lux, adecuados todavía para los requerimientos del cultivo. Estos resultados proporcionan información referente al comportamiento de

un invernadero y ayudan a planear las estrategias de manejo. Muchas de las recomendaciones sugeridas implican el sombreo mediante pantallas o encalado, los cuales pueden mejorar la temperatura mediante la restricción de entrada de energía solar, pero pueden limitar la entrada de luz (elemento útil para el proceso de la fotosíntesis).

## CONCLUSIONES

El estudio de los parámetros que intervienen en los fenómenos físico-biológicos mediante modelos matemáticos es muy útil para prever lo que sucederá bajo diferentes escenarios. Sin embargo, implica disponer de la información de los distintos parámetros, cosa que para el caso de los invernaderos en México es complicada, puesto que la información es aún escasa y muchas veces se consideran valores obtenidos bajo condiciones diferentes. La transmitancia es un parámetro de mucha utilidad en los balances de energía en los invernaderos, pero la mayoría de las veces solo se considera el valor comercial de la transmisividad del material proporcionada por el fabricante. Nuestros resultados demuestran que un buen análisis de la transmitancia depende de la consideración de factores como posición del sol en el cielo, la latitud del lugar, la hora y de la forma y orientación del techo del invernadero. Este modelo ayudó a predecir la transmisividad de luz y tomar decisiones para el manejo del clima del invernadero, sin afectar las necesidades energéticas para el desarrollo fisiológico del cultivo.

## REFERENCIAS

- Bot, G. P. A., (1983). *Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic Model*. Ph. D. Dissertation, Agricultural University of Wageningen. The Netherlands.
- Boulard, T. and Wang, S., (2000). Greenhouse crop transpiration model from external climate conditions. *Acta Hort.* (534): pp. 235-244.
- Caldari Júnior, 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*, 2007. México: pp. 1-5.
- Castilla, N., (2001). La radiación solar en invernadero en la costa Mediterránea Española. En J. C. López, P. Lorenzo, N. Castilla, J. Pérez-Parra, J. I. Montero, E. Baeza, A. Antón, M. D. Fernández, A. Baille y M. González-Real (eds.). *Incorporación de Tecnología al Invernadero mediterráneo*. Almería, España: pp. 35-49.
- Duncan, G. A., Loewer, O. J. Jr. and Colliver, D. G., (1981). Simulation of energy flows in a greenhouse: magnitudes and conservation potential. *Transaction of ASAE* (1981): pp. 1014-1021.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Third Edition. John Wiley and Sons, Inc.
- Giacomelli Gene, A., (1998). Differences among light transmission tests within the laboratory, within short and long-duration studies, on artificial testing stands, and within a greenhouse structure with a plant crop. *Greenhouse Glazing & Solar Radiation Transmission Workshop*, October 1998. Center for Controlled Environment Agriculture. Rutgers University, Cook College.
- Giacomelli Gene, A., (1998). Components of radiation defined: definition of units, measuring radiation transmission, sensors. *Greenhouse Glazing & Solar Radiation Transmission Workshop*, October 1998. Center for Controlled Environment Agriculture. Rutgers University, Cook College.
- Hernández, J., Hernández, G., Soriano, T., Morales, M. I., Escobar, J. and 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*, n. 39: pp. 379.
- 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: pp. 203-210.
- University of Oregon, (2003). Solar Radiation Basics. *Solar Radiation Monitoring*. September 1st, 2003. (<http://solar.dat.uoregon.edu/SolarRadiationBasics.html>).
- Wang, S. y Boulard, T., (2000). Measurement and prediction of solar radiation distribution in full-scale greenhouse tunnels. *Agronomie* 20 (2000): pp. 41-50.
- Zabaltitz, C. V., (1998). Greenhouse structures. En G. Stanhill y H. Z. Enoch (eds.), *Ecosystems of the World, 20: greenhouse ecosystems*. Amsterdam: Elsevier: pp. 17-69.