

RELACIÓN ENTRE LA TRANSMITANCIA DE LA RADIA- CIÓN FOTOSINTÉTICAMENTE ACTIVA DE UNA CUBIER- TA PLÁSTICA Y EL ÁNGULO DE INCIDENCIA SOLAR

BOUCHET, E.¹, FREYRE, C.¹; BOUZO, C. A.¹ & PILATTI, R. A.¹

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue medir la transmitancia de la radiación visible en materiales de cubierta de amplio uso en nuestro país en función de diferentes ángulos de incidencia. Se utilizaron dos materiales de cubierta: polietileno de larga duración con tratamiento anti-ultravioleta (LDT) de 150 mm y polietileno cristal de 100 mm de espesor. Las mediciones del flujo lumínico se realizaron con una barra integradora digital Licor LI-250 y se utilizó un módulo experimental construido con madera de 0,123 m de altura, 0,280 m de ancho y 1,100 m de largo con las paredes interiores pintadas de negro para evitar la reflexión de la luz. Al variar la inclinación de la caja mediante una regla graduada se establecieron los distintos ángulos de incidencia de la radiación solar calculados por relaciones trigonométricas. La transmitancia medida para ángulo de incidencia entre 0° y 68° resultaron en valores mayores para el polietileno cristal en comparación con el polietileno LDT. La relación entre la transmitancia de la radiación fotosintéticamente activa y el ángulo de incidencia sigue un patrón similar al de la transmitancia solar. Las ecuaciones matemáticas obtenidas pueden predecir la transmitancia PAR para distintos ángulos de incidencia.

Palabras clave: radiación visible, radiación solar, invernadero, modelos de simulación.

SUMMARY

Relationship between the transmissivity of the photosynthetic radiation and the solar incidence angle on the plastic film.

The aim of this work was to measure the transmissivity of the visible radiation (PAR) in materials of wide use in our country with different angles of incidence. Polyethylene of long duration with

1.- Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral. Kreder 2805. (3080) Esperanza, provincia de Santa Fe. Telefax: (03496) 426400. E-mail: ebouchet@fca.unl.edu.ar

Manuscrito recibido el 3 de abril de 2001 y aceptado para su publicación el 22 de octubre de 2002.

treatment anti-ultraviolet (LDT) of 150 mm and polyethylene glass of 100 mm of thickness were used. For the measurements of the luminous radiation an integrative digital Licor LI-250 were used and an experimental module of wood with 0,123 m of height, 0,280 m of wide and 1,100 m of long with the interior walls black to avoid the reflection of the light. Varying the inclination of the box the different incidence angles of the solar radiation were calculated with trigonometrical relationships. The transmission coefficient measured for angle of incidence between 0° and 68° was in values greater for the polyethylene glass. The relationship between the transmissivity of the PAR and the incidence angle was a similar pattern that of the solar transmissivity. The mathematical equations obtained can predict the transmission coefficient for different incidence angles.

Key words: visible radiation, solar radiation, greenhouse, simulation models.

INTRODUCCIÓN

La radiación solar influye sobre el crecimiento de las plantas principalmente a través de la fotosíntesis y la transpiración. La longitud de onda que participa sobre el primer proceso es la correspondiente al espectro de 400 a 700 nm, siendo éste el proceso básico en la productividad de un cultivo (Heuvelink *et al.*, 1995). En invernaderos el crecimiento de los cultivos está fuertemente determinado por la cantidad de luz que reciben (Cockshull *et al.*, 1992) pudiendo transformarse ésta en un factor limitante principalmente en latitudes altas y durante el invierno (Cockshull, 1988).

La cantidad de radiación solar transmitida (t) a través del techo de un invernadero está determinada por muchos factores tales como: propiedades ópticas del material (Giacomelli *et al.*, 1988); latitud, día del año, hora del día, nubosidad (Heuvelink *et al.*, 1995), orientación y tipo de invernaderos, ángulo de techumbre (Bouzo and Pilatti, 1999); condensación interna de vapor de agua (Geoola *et al.*, 1994). La orientación de los invernaderos y el ángulo de techumbre son dos factores de diseño que influyen sobre la transmitancia principalmente a través del ángulo de incidencia solar (b).

Este ángulo corresponde al existente entre el rayo solar y la normal a la superficie (Duffie and Beckman, 1974). La relación existente entre b y t para diferentes tipos de cubiertas ha sido medido por varios autores (Godbey *et al.*, 1979; Heinemann and Walker, 1987; Seeman, 1974; Smith and Kingham, 1971) existiendo invariablemente una relación negativa entre aquellos. De la radiación solar, la predicción de la transmitancia del espectro visible (t_v) es importante no solo para el diseño de nuevas estructuras u orientación de los invernaderos (Baille *et al.*, 1990) sino para su utilización en modelos de crecimiento y desarrollo de los cultivos en invernadero (Critten, 1993).

El ángulo b tiene un carácter dinámico variando diariamente en función a la rotación terrestre. Sin embargo, es posible calcularlo considerando declinación solar, latitud del sitio, día del año, inclinación de los techos, el azimut y ángulo de hora solar (Sarmiento, 1995). Calculado b , si se conoce la relación entre con t_v y el flujo visible incidente, puede simularse mediante un modelo matemático el régimen lumínico en el interior del invernadero.

El objetivo de este trabajo fue medir la transmitancia de la radiación visible en materiales de cubierta de amplio uso en nuestro país en función de diferentes ángulos

de incidencia.

MATERIALES Y MÉTODO

Se utilizaron dos materiales de cubierta: polietileno de larga duración con tratamiento anti-infrarrojo (LDT) de 150 mm y polietileno cristal de 100 mm de espesor. Las mediciones del flujo lumínico se realizaron mediante un sensor cuántico lineal Licor LI-191SA. Las dimensiones del área del sensor lineal son de 1 m de largo por 12,7 mm de ancho. Este sensor tiene una respuesta cuántica a través de un rango de longitudes de onda de 400 a 700 nm en la densidad del flujo fotónico fotosintético (PAR) Para las mediciones se utilizó un módulo experimental construido con madera de pino brasil (*Araucaria* sp.) de 0,020 m de espesor (Fig. 1). Este módulo consistió en una caja

de 0,123 m de altura, 0,280 m de ancho y 1,100 m de largo con las paredes interiores pintadas de negro para evitar la reflexión de la luz. En cada extremo se realizaron orificios de 0,035 m de diámetro para la inserción del sensor de medición. La caja tenía en su parte superior varillas cuadradas de madera de 0,035 m de lado con tornillos para sujetar los materiales de cubiertas. La regulación de los ángulos de inclinación de las cubiertas se realizó mediante una regla con once perforaciones equidistantes a 0,030 m, en donde se insertó un perno de sujeción de la caja. La base sobre la que se apoyaba la regla podía modificar su ángulo con respecto a la horizontal mediante una barra roscada de 9,52 mm de diámetro apoyada sobre una base horizontal (Fig. 1). Cada medición se efectuó orientando la superficie de cubierta



Fig. 1: Módulo experimental utilizado para la medición de la transmitancia a la radiación fosotintéticamente activa. Puede apreciarse el sensor de medición del flujo visible, la regla graduada y la varilla roscada para obtener los distintos ángulos de incidencia.

hacia el sol y con la varilla roscada se encontró la inclinación en la que los bordes de la caja no proyectaban sombras sobre el interior. Este ángulo correspondió al ángulo de incidencia $b = 0^\circ$. Los ángulos b crecientes a partir de este valor se lograron con sucesivas inclinaciones de la caja mediante la regla perforada. El valor del ángulo b en cada medición se calculó midiendo con una regla milimetrada las distancias de los catetos originados al inclinar la caja, a y b . Mediante la relación trigonométrica de la tangente resultó: $b = \arctg(a/b)$. Todas las mediciones se realizaron con el sensor ubicado horizontalmente por medio de un nivel de burbuja adosado. En cada ángulo se midió el flujo lumínico en $\text{mmol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ externo (L_i) e interno (L), de tal manera que la transmitancia visible resultó: $t_v = (L/L_i)$. Para cada material de cubierta y ángulo de incidencia se realizaron 3 mediciones durante un día totalmente despejado en un

lapso que abarcó el mediodía astronómico (12:30 h y 13:30 h).

RESULTADOS

La transmitancia medida para ángulos de incidencia entre 0° y 70° resultaron mayores para el polietileno cristal con valores de 0,92 para el ángulo de incidencia de 0° en comparación con 0,88 para polietileno LDT (Fig. 2). En esta figura se observan los valores promedios resultantes de las mediciones. La variabilidad de los datos fue muy baja lo que se refleja en el desvío estándar promedio (S) para cada cobertura, que resultó de 0,009 para el polietileno Cristal y de 0,003 para el LDT.

Al descomponer la variabilidad de la transmitancia mediante el análisis ANOVA según la contribución tanto del ángulo como de los materiales utilizados, se pudo observar que cada uno es estadísticamente significativo al nivel del 1 % de confianza,

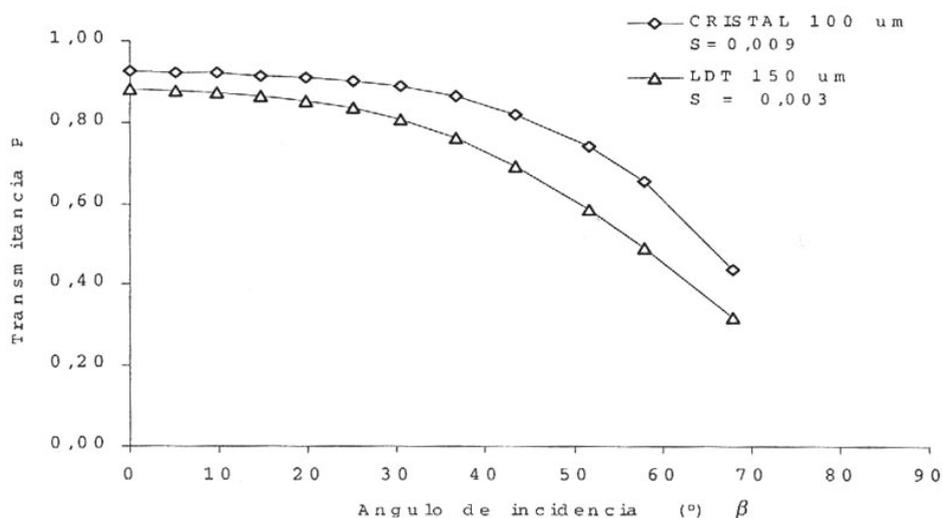


Fig. 2: Relaciones medidas entre el ángulo de incidencia (b) y la transmitancia a la radiación fotosintéticamente activa (t_v) para polietilenos cristal de 100 mm y LDT 150 mm. S es el desvío estándar promedio de las muestras.

Cuadro 1: Análisis de varianza para la transmitancia medida en función de los tratamientos (polietilenos Cristal 100 μm y LDT 150 μm) y los ángulos de incidencia de 0° a 68° de la radiación solar en el espectro comprendido entre los 400 nm y 700 nm.

Fuente de Variación	S.C.	g.l.	C.M.	Relación F	Valor Prob.
Efecto Principal					
A. Ángulo	1,77868	11	0,161698	3057,10	0,0000
B. Tratamiento	0,141689	1	0,141689	2679,00	0,0000
Interacciones					
A x B	0,0318526	11	0,00289569	54,75	0,0000
Residual	0,00253867	48	0,000052889		
Total (Corregido)	1,95476	71			

Los resultados obtenidos de las mediciones fueron ajustados para cada material mediante relaciones cuadráticas entre t_v y b . Para el caso del polietileno cristal 100 μm la ecuación resultó:

$$t_v = 0,897624 + 0,00493557 \cdot b - 0,000163797 \cdot b^2$$

$$R^2 = 97,62 \quad (1)$$

Del análisis ANOVA surge que el valor de probabilidad fue menor a 0,01, por lo que la relación entre la transmitancia t_v y el ángulo b es estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 99 %. El valor de R^2 indica que el modelo ajustado explica el 97,62 % de la variabilidad en la transmitancia. El error estándar de las estimaciones del modelo muestra que la desviación estándar de los residuales fue de 0,023 pudiendo este valor ser utilizado como límite para las predicciones del modelo. Para el polietileno LDT 150 mm la ecuación fue:

$$t_v = 0,869189 + 0,00266984 \cdot b - 0,000157562 \cdot b^2$$

$$R^2 = 99,84 \quad (2)$$

Mediante el análisis de ANOVA, este

modelo al igual que el obtenido para el polietileno cristal resultó estadísticamente significativo en la relación entre la transmitancia t_v y el ángulo de incidencia b a un nivel de 99 % de confianza. El valor del R^2 indica que el ajuste del modelo permite explicar el 99,83 % de la variabilidad observada en la transmitancia y la desviación estándar de los residuales menor que para el caso anterior siendo de 0,0072.

DISCUSIÓN

Aunque la mayor parte de los trabajos presentados han sido realizados con una fuente luminosa artificial (Kieboom and Stoffer, 1985; Goldberg *et al.*, 1994; Pieters *et al.*, 1997) la relación entre la transmitancia de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) con los ángulos de incidencia sigue una tendencia similar a la obtenida en vidrio para la radiación solar (Seeman, 1974; Smith and Kingham, 1971). Los datos de transmitancia PAR medidos en este trabajo indican valores muy similares al del polietileno LDT. Sin embargo, la tendencia de las curvas indica una pérdida más acentuada de transmitancia con el aumento del ángulo de incidencia para el polietileno

LDT en comparación con vidrio. Este comportamiento puede deberse al mayor índice de refracción que originan la incorporación de aditivos anti-ultravioleta (Heinemann & Walker, 1987). Aunque la curva del polietileno cristal sigue un patrón similar al del LDT, la disminución de transmitancias es menos acentuada. La comparación realizada entre transmitancia solar y PAR es válida para la mayor parte de los materiales de cobertura al tener magnitudes similares, aunque para el vidrio existen algunas diferencias (Goldberg *et al.*, 1994). En este mismo sentido, la transmitancia PAR pudo ser estimada de la radiación solar a través de una relación lineal, con un coeficiente de correlación de 0,72 y una pendiente de la recta de 0,99 (Giacomelli *et al.*, 1988). Mediciones de transmitancia solar realizadas en polietileno siguen la misma tendencia que la presentada en este trabajo, con valores para ángulo de incidencia de 0° muy similares a los medidos aquí, aunque con mayores diferencias para ángulos crecientes (Chau, 1982).

Entre los factores que influyen en la pérdida de transmitancia no solo debe considerarse la presencia de aditivos, sino que para cada material influyen también el tipo de aditivo, espesor del material y tiempo de uso (Bouzo & Pilatti, 1999). El tiempo de uso de la cobertura influye significativamente en la pérdida de transmitancia en los primeros meses de uso (Geoola *et al.*, 1994). Otro factor de importancia es el agua de condensación, que puede ocasionar pérdidas de entre el 8 % y 10 % (Geoola *et al.*, 1994; Pieters *et al.*, 1997). Para los materiales con aditivos surfactantes que disminuyen la tensión superficial entre la gota de agua y la película plástica, la formación de una capa continua de agua puede llegar a incrementar la transmitancia (Pieters *et al.*, 1997).

La relación matemática presentada en este trabajo es similar a la de Ortega (1991)

aunque con coeficientes diferentes debido a que este autor la obtuvo para polietileno de 100 µm de espesor y para transmitancia solar. La ecuación presentada aquí para transmitancia PAR tuvo buen ajuste a los datos experimentales aunque faltaría incorporar diferentes materiales y factores que pueden modificar estas relaciones. La importancia de las mediciones realizadas es que la radiación PAR tiene una relación directa con la fotosíntesis y producción de los cultivos, pudiendo ser incorporada en modelos de cultivos para la simulación con paso horario del crecimiento.

CONCLUSIÓN

La relación entre la transmitancia de la radiación fotosintéticamente activa y el ángulo de incidencia sigue un patrón similar al de la transmitancia solar.

Existen diferencias de transmitancias en los materiales ensayados debido probablemente a diferencias de calidad en su constitución.

Las ecuaciones matemáticas presentadas resultarían adecuadas para predecir la transmitancia PAR.

BIBLIOGRAFÍA

- BAILLE, M.; A. BAILLE & M. TCHAMITCHIAN.** 1990. A simple model for the estimation of greenhouse transmissivity: influence of structures and internal equipment. *Acta Hort.* 281: 35-46.
- BOUZO, C. A. & R. A. PILATTI.** 1999. Evaluación de algunos factores que afectan la transmisión de radiación solar en invernaderos. *FAVE* 13 (2): 13-19.
- CHAU, K.V.** 1982. Optimum tilt angles for solar collectors in clear sky conditions. *J. Agric.*

- Engng. Res. 27: 321-328.
- COCKSHULL, K. E.** 1988. The integration of plant physiology with physical changes in the glasshouse climate. *Acta Hort.* 229: 113-123.
- COCKSHULL, K.E.; C. J. GRAVES & C. R. J. CAVE.** 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *J. Hort. Sci.* 67: 11-24.
- CRITTEN, D. L.** 1993. A review of the light transmissivity into glasshouse crops. *Acta Hort.* 328: 9-31.
- DUFFIE, J. A. & W. A. BECKMAN.** 1974. Solar energy thermal processes. John Wiley & Sons. New York. pp. 386.
- GEOOLA, F.; V. M. PEIPER & M. GEOOLA.** 1994. Outdoor testing of the condensation characteristics of plastic film covering materials using a model greenhouse. *J. Agric. Engng. Res.* 57: 167-172.
- GIACOMELLI, G. A.; K. C. TING & S. PANIGRAHI.** 1988. Solar PAR vs. solar total radiation transmission in a greenhouse. *Transactions of the ASAE* 31(5):1540-1543.
- GODBAY, L. C.; T. E. BOND & H. F. ZORNING.** 1979. Transmisión de solar and long-wavelength energy by materials used as covers for solar collectors and greenhouse. *Transactions of the ASAE* 22:1137-1144.
- GOLDBERG, M.; L. MASCARINI; S. ORDEN & E. SIERRA.** 1994. Transmisión espectral en la banda del PAR de las cubiertas plásticas para invernaderos. *Actas XVII Congreso Argentino de Horticultura.* ASAHO. Córdoba. p. 28.
- HEINEMANN, P. H. & P. N. WALKER.** 1987. Effects of greenhouse surface heating water on light transmission. *Transactions of the ASAE* 30(1): 215-220.
- HEUVELINK, E.; L. G. G. BATA & T. H. J. DAMEN.** 1995. Transmission of solar radiation by a multispans Venlo-type glasshouse: validation of a model. *Agric. For. Meteorol.* 74: 41-59.
- KIEBOOM, A. M. G. & J. A. STOFFER.** 1985. Light transmittance under diffuse radiation circumstances. *Proceeding of Symposium Greenhouse Climate and Its Control.* Wageningen, The Netherlands, pp. 67-73.
- ORTEGA, L. J.** 1991. Influencia de algunos parámetros de diseño en la captación de energía solar en invernaderos plásticos. Tesis Ms.Sc. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Agronómicas, Veterinarias y Forestales. Chile. 120 pp.
- PIETERS, J. G.; J. M. DELTOUR & M. J. DEBRUYCKERE.** 1997. Light transmission through condensation on glass and polyethylene. *Agr. For. Meteorol.* 85:51-62.
- SARMIENTO, P.** 1995. Energía solar. Aplicaciones e ingeniería. Universidad Católica de Valparaíso Ed. Valparaíso. Chile. pp. 261.
- SEEMAN, J.** 1974. Climate under glass. *World Meteorological Organization. Technical Note* N° 131. 32 pp.
- SMITH, C. V. & H. G. KINGHAM.** 1971. A contribution to glasshouse design. *Agr. Meteorol.* 8: 447-468.