
INFLUENCIA DE LA CONDICIÓN CLIMÁTICA DE DIFERENTES LOCALIDADES EN EL MICROCLIMA DEL INVERNADERO: REGIÓN ANDINA Y CENTRAL DE VENEZUELA

Leyde Y. Briceño Medina, Ramón E. Jaimez Arellano y Wilmer E. Espinoza Briceño

RESUMEN

En Venezuela, el criterio para lograr microambientes óptimos para el crecimiento de cultivos en invernadero o casas de cultivo en función del clima local es un aspecto poco estudiado y la información acerca del microclima dentro de estas estructuras es escasa. En virtud de lo anterior, se utilizaron mediciones de variables climáticas de diferentes localidades realizadas entre 2006 y 2009, para investigar su influencia en el microclima de los invernaderos. Se generaron variables medias horarias para un día en cada localidad e invernadero. Se determinó la transmitancia de la densidad del flujo de fotones fotosintéticos y de la intensidad solar incidente en la cubierta de los invernaderos, así como las tasas de flujo de ventilación proporcionales a la

caída de presión. Se encontraron correlaciones entre variables medidas en el interior del invernadero: temperatura del aire y radiación solar; temperatura y humedad relativa del aire, y una correlación lineal entre la relación (área de las ventanas laterales)/(área del suelo) y la tasa de intercambio de aire en el invernadero; además de la divergencia entre la radiación solar total disponible sobre la cubierta de los invernaderos. Se propone que el techo de forma semi-elíptico podría resultar más adecuado para las regiones tropicales. Se sugiere en los invernaderos un ancho máximo de 18m, lo cual disminuiría la diferencia de temperatura en el interior por mejora en la ventilación.

Introducción

En regiones tropicales y subtropicales por debajo de los 1000msnm, donde predominan altas temperaturas durante casi todo el año, se requiere mantener la temperatura en el interior de las casas de cultivo dentro de valores que no perjudiquen el crecimiento y la producción de las plantas (Furlan *et al.*, 2001). En estas regiones, las casas de cultivo son usadas principalmente para aislar el cultivo de lluvias fuertes, radiación solar excesiva, humedades bajas y de las plagas locales, enfocándose el control del microclima en disminuir las temperaturas altas y mantener la humedad relativa adecuada para la producción.

La ventilación es de gran importancia para el control del microclima de los inver-

naderos y el sistema más utilizado para garantizar menores costos de producción, es la ventilación natural (Baptista *et al.*, 2001). Tantau y Von Zabeltitz (2003), referido por Soni *et al.* (2005) señalan que el uso de mallas reduce la ventilación debido a una mayor resistencia al intercambio de aire, provocando aumento en la temperatura del aire interior del invernadero, acentuándose el problema en las casas de cultivo naturalmente ventiladas. Para las regiones tropicales, Soni *et al.* (2005), al evaluar la utilidad de las mallas para excluir insectos y su impacto en el microclima dentro del invernadero, determinaron que con mallas de mayor porosidad los gradientes de temperatura vertical van de 3 a 5%, mientras que con menor porosidad oscilan entre 8 y 14%, debido a la reducción de la velocidad

del viento en el interior de los invernaderos, ocasionando un mayor gradiente de temperatura por el menor movimiento de las masas de aire. Majdoubi *et al.* (2009) encontraron que en invernaderos mayores a 1ha, con ventilación regulada principalmente por las ventanas laterales, se presenta un microclima muy heterogéneo, el cual puede afectar el desarrollo del cultivo, influyendo particularmente en las tasas de transpiración y la fotosíntesis; concluyeron que es crucial entender los mecanismos de intercambio de aire entre el interior y el exterior del invernadero para poder determinar la distribución del microclima.

En lo que respecta a la captación de la radiación solar, Sethi (2009) concluyó que la orientación este-oeste de los invernaderos es la más conveniente en todas

las latitudes, excepto cerca del Ecuador, porque permite recibir la mayor radiación en invierno y la menor en verano, siendo dicho efecto más significativo en altas latitudes.

En Venezuela se presta poca atención a los aspectos climáticos propios de cada región y que influyen en la producción bajo invernadero (Jaimez *et al.*, 2005, 2006). Su comprensión es necesaria a fin de establecer criterios para el diseño e instalación de los invernaderos y las normas mínimas para el manejo del microclima. El objetivo del presente trabajo fue evaluar la influencia de las condiciones climáticas en el microclima de invernaderos localizados en la región andina y central de Venezuela, con la finalidad de determinar relaciones entre las condiciones climáticas externas e internas ajustadas a las regiones tropicales.

PALABRAS CLAVE / Humedad Relativa / Invernaderos Tropicales / Temperatura / Ventilación Natural /

Recibido: 20/01/2010. Modificado: 15/04/2010. Aceptado: 16/04/2010.

Leyde Yosmar Briceño Medina
Ingeniera Industrial, Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), Venezuela. Magíster en Matemática Aplicada a la Ingeniería, Universidad de Los Andes (ULA), Venezuela. Investigadora,

Instituto de Investigaciones Agropecuarias, (IIAP-ULA), Venezuela. Dirección: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Universidad de Los Andes. Mérida 5101, Venezuela. e-mail: leydeb@ula.ve

Ramón Eduardo Jaimez Arellano. Licenciado en Biología y Doctor en Ecología Tropical, ULA, Venezuela. Profesor, IIAP-ULA, Venezuela. e-mail: rjaimez@ula.ve

Wilmer Enrique Espinoza Briceño. Estudiante de Ingeniería Agronómica, Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño, Venezuela. Perito Agropecuario, (IIAP-ULA), Venezuela. e-mail: wilmere@ula.ve

INFLUENCE OF THE CLIMATIC CONDITIONS OF DIFFERENT LOCALITIES IN THE GREENHOUSE MICROCLIMATE: ANDEAN AND CENTRAL REGION OF VENEZUELA

Leyde Y. Briceño Medina, Ramón E. Jaimez Arellano and Wilmer E. Espinoza Briceño

SUMMARY

In Venezuela, the criterion for achieving optimal microenvironment for crop growth in greenhouses according to the local weather is a scarcely evaluated aspect, and the information on the microclimate within these structures is limited. In order to better understand it, measurements of climatic variables were carried out between 2006 and 2009 to evaluate the influence of climatic conditions at different localities in the microclimate of greenhouses. Hourly average variables were generated for each location and greenhouse. The transmittances of photon flux density of photosynthetic radiation and of the incident solar energy were determined on the roof of the greenhouses; and also the venti-

lation flow rate proportional to the pressure drop. Correlations were found between variables measured inside of greenhouse: air temperature and solar radiation, air temperature and humidity, a linear correlation between the ratio (area side windows) / (floor area) and the rate of air exchange in the greenhouse, as well as differences between the total solar radiation available on the deck of the greenhouses. It is proposed that the roof of semi-elliptical shape may be more appropriate for tropical regions. A maximum greenhouse width of 18m is suggested, thus reducing the temperature difference inside to improved ventilation.

INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO CLIMÁTICA DE DIFERENTES LOCALIDADES NO MICROCLIMA EM ESTUFAS: REGIÃO ANDINA E CENTRAL DA VENEZUELA

Leyde Y. Briceño Medina, Ramón E. Jaimez Arellano e Wilmer E. Espinoza Briceño

RESUMO

Na Venezuela, o critério para conseguir microambientes ótimos para o crescimento de cultivos em estufas ou casas de cultivo em função do clima local é um aspecto pouco estudado e a informação sobre o microclima dentro destas estruturas é escassa. Em virtude do anterior, foram utilizadas medições de variáveis climáticas de diferentes localidades realizadas entre 2006 e 2009, para investigar sua influência no microclima de estufas. Geraram-se variáveis médias horárias para um dia em cada localidade e estufa. Determinou-se a transmitância da densidade do fluxo de fótons fotossintéticos e da intensidade solar incidente na cobertura das estufas, assim como as taxas do fluxo de

ventilação proporcionais à queda de pressão. Encontraram-se correlações entre variáveis medidas no interior da estufa: temperatura do ar e radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, e uma correlação linear entre a relação (área das janelas laterais)/(área do solo) e a taxa de intercâmbio de ar na estufa; além da divergência entre a radiação solar total disponível sobre a cobertura das estufas. Propõem-se que o teto de forma semi-elíptico poderia resultar mais adequado para las regiões tropicais. Sugere-se, nas estufas, uma largura máxima de 18m, o qual poderá diminuir a diferença de temperatura no interior por melhora na ventilação.

Materiales y Métodos

Medición de variables climáticas

Se evaluaron invernaderos, con diferentes cultivos, localizados en la región andina y central de Venezuela, cuyas descripciones se presentan en el Tabla I.

Para las mediciones de la densidad del flujo de fotones fotosintéticos (DFFF), temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, se utilizaron sensores HOBO (S-LIA-M003, S-TMA-M006, S-WCA-M003, respectivamente) conectados a dos estaciones registradoras HOBO (H21-001 y H21-002), colocadas en el interior (centro) y el exterior de los

invernaderos a 1,65m de altura. Los registros se realizaron simultáneamente durante los periodos de estudio.

Con el fin de reducir las diferencias entre los perfiles de las localidades y comparar los efectos de las variables climáticas sobre el microclima del invernadero, se generaron medias horarias para cada variable durante el periodo de medición en cada invernadero.

Orientación del invernadero

Para el cálculo de la intensidad solar incidente sobre la cubierta del invernadero, se utilizaron dos

áreas denominadas ACUB1 y ACUB2, calculadas a partir de ALT1 y ALT2 (Figura 1), cuyas expresiones fueron propuestas por Singh *et al.* (2006). Estas expresiones (ver nomenclatura en Tabla II) fueron ampliadas para considerar la orientación del invernadero, agregando un factor de corrección:

$$ACUB1 = ALT1 \times LG \times C \quad (m^2) \quad (1)$$

$$ALT1 = ANCHO \times SIN(B) \quad (m) \quad (2)$$

$$ACUB2 = ALT2 \times COS(B) \times LG \times C \quad (m^2) \quad (3)$$

$$ALT2 = (H - (9,0 - XX) \times TAN(B)) \quad (m) \quad (4)$$

$$C = (COS(\beta) \times SIN(\theta) \times COS(AN\gamma - \phi) + SIN(\beta) \times COS(\theta)) \quad (5)$$

$$ACUB = ACUB1 + ACUB2 \quad (m^2) \quad (6)$$

$$Q = IG \times ACUB \times ABS \quad (W) \quad (7)$$

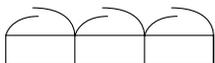
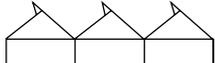
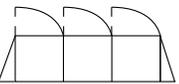
La transmitancia (τ) de la DFFF se calculó a partir de la relación

$$\tau = \frac{DFF \text{ interior}}{DFF \text{ exterior}} \quad (\text{moles} \cdot m^2 \cdot s^{-1}) \quad (8)$$

Ventilación en el invernadero

Las tasas de flujo de ventilación son típicamente proporcionales a la raíz cuadrada de la caída de presión. La diferencia de presión entre las aperturas de un invernadero está relacionada con la energía cinética volumétrica del campo de viento ($1/2 \times DAIR \times V^2$) a una altura de referencia, de acuerdo con la expresión (De-Jong, 1990)

TABLA I
CARACTERÍSTICAS Y LOCALIZACIÓN DE LOS INVERNADEROS ESTUDIADOS

Región	Localidad	Estructura	Altitud (msnm)	Latitud (N)	Cultivo	Superficie	Orientación frontal	Periodo de medición
Central	Tapipa, Edo Miranda	 Multitunel con techo semi-elíptico y apertura cenital en arco fija	50	10°13'03"	Tomate	2474,28m ² (3 módulos)	SE	27/09/2008 al 14/10/2008
	Villa de Cura, Edo Aragua	 Multitunel con techo semi-elíptico y apertura cenital en arco fija	510	9°59'43,02"	Tomate	4320m ² (9 módulos)	SO	01/04/2007 al 24/04/2007
	Chirgua, Edo Carabobo	 Multicapilla con techo a dos aguas y apertura cenital fija	700	10°13'50,1"	Tomate	5000m ² (2 módulos)	NO	23/06/2006 al 24/06/2006
	Sartenejas, Edo Miranda	 Multitunel con techo semi-elíptico con apertura variable	1256	10°24'51,84"	Pimentón	2400m ² (5 módulos)	EO	31/02/2007 al 29/03/2007
Andina	Santa Rosa, Edo Mérida	 Tipo tunel con ventana cenital tipo chimenea variable	1926	8°37'37,08"	Tomate	162m ² (1 módulo)	SO	06/11/2006 al 21/11/2006
	La Mucuy, Edo Mérida	 Multitunel con techo curvo asimétrico y ventana cenital fija	2252	8°37'49,02"	Gerbera	862,08m ² (2 módulos)	NO	29/01/2009 al 13/03/2009
	Bailadores, Edo Mérida	 Multitunel con techo semi-elíptico y apertura cenital en arco fija	2308	8°13'23,5"	Gerbera	2352m ² (6 módulos)	SE	14/05/2007 al 20/05/2007
	Mucuchies, Edo. Mérida	 Multitunel con techo curvo asimétrico y ventana cenital fija	3032	8°45'54"	Plántulas de papa	792m ² (3 módulos)	NO	22/04/2008 al 29/04/2008

$$\Delta P = \frac{1}{2} \times \text{DAIR} \times \text{CMP} \times \text{VE}^2 \quad (9)$$

Introduciendo el coeficiente de presión, la tasa de flujo de ventilación, sin considerar la influencia del cultivo, puede ser expresada como función de la diferencia del coeficiente de presión (Kittas *et al.*, 1997)

$$\text{VDOT} = \text{AENT} \times \text{CD} \times \text{VD} \times \sqrt{\Delta \text{CP}} \quad (10)$$

$$N = \frac{\text{VDOT}}{V \times 3600} \quad (11)$$

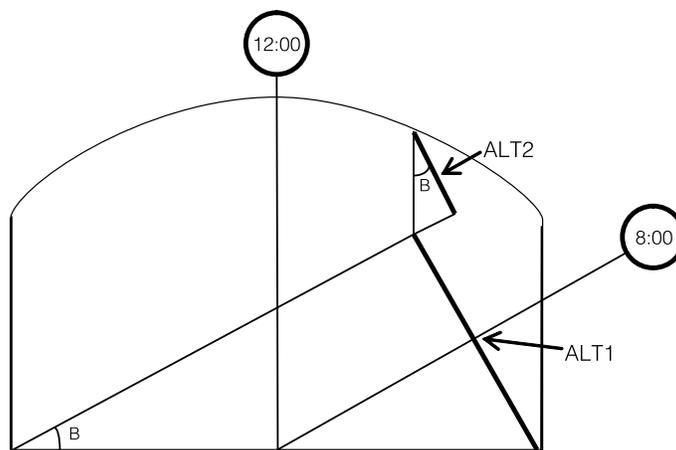


Figura 1. Áreas de incidencia efectiva de radiación solar sobre la cubierta (ACUB1 y ACUB2), referencia horaria para las 8:00.

Resultados y Discusión

Perfiles de las variables climáticas

Las Figuras 2a y b muestran de manera separada los perfiles de la densidad del flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) en el exterior para las localidades de la región andina y la central. Las líneas irregulares indican la presencia de nubosidad, la cual afecta considerablemente los valores de radiación. En La Mucuy y Sartenejas se distingue un desfase horario, el cual se atribuye a la decli-

TABLA II
NOMENCLATURA

ACP: diferencia de coeficiente de presión entre la entrada y la salida (adimensional)
 ΔP : diferencia de presión (Pa)
 ABS: absorbancia de la cubierta (adimensional)
 ACUB1: calculado a partir de un triángulo rectángulo que descansa sobre el piso del invernadero, cuyo cateto opuesto es perpendicular a la radiación solar directa (m^2)
 ACUB2: calculado a partir de un segundo triángulo rectángulo, el cual descansa sobre el primer triángulo (m^2)
 AENT: área de las aperturas por donde entra el flujo de aire (m^2)
 ALT1: cateto opuesto del primer triángulo rectángulo (m)
 ALT2: cateto adyacente del segundo triángulo rectángulo (m)
 ATLAT: altura lateral (m)
 ALTMAX: altura máxima (m)
 ALTVEN: altura de las ventanas laterales (m)
 APVCEN: apertura de ventana cenital (m)
 ANCHO: ancho del invernadero (m)
 ASUE: área del suelo (m^2)
 AVEN: área de las ventanas (m^2)
 B: ángulo correspondiente a la altura solar, elevación del sol desde el horizonte (grados)
 C: factor de corrección para considerar orientación del invernadero (adimensional)

CD: coeficiente de descarga (adimensional)
 CMP: coeficiente medio de presión del viento (adimensional)
 DAIR: densidad del aire ($kg \cdot m^{-3}$)
 DFF: interior: densidad del flujo de fotones fotosintéticos en el interior ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
 DFF: exterior: densidad del flujo de fotones fotosintéticos en el exterior ($\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)
 H: altura del invernadero variable entre la altura lateral y la altura total (m)
 IG: intensidad de la radiación solar global ($W \cdot m^{-2}$)
 LG: largo del invernadero (m)
 N: renovaciones por hora ($vol \cdot h^{-1}$)
 Q: calor absorbido por la cubierta, debido a la radiación solar (W)
 TINT: Temperatura del aire interior ($^{\circ}C$)
 TEXT: Temperatura del aire exterior ($^{\circ}C$)
 HRINT: Humedad relativa del aire interior (%)
 HREXT: Humedad relativa del aire exterior (%)
 V: volumen del invernadero (m^3)
 VDOT: flujo de ventilación ($m^3 \cdot s^{-1}$)
 VE: velocidad del viento exterior ($m \cdot s^{-1}$)
 XX: distancia entre un lado del invernadero y el final del cateto adyacente del primer triángulo rectángulo (m)

nación solar debido a la fecha correspondiente de las mediciones en esas localidades (enero-marzo). Se aprecia que los valores más altos se registraron en zonas de mayor altitud durante días despejados, lo cual según Abdel y Higazy (1980), es atribuible a un aire más limpio, donde las diferencias en los

valores de radiación se deben al contenido de polvo en la atmósfera local. Al respecto, Cisniega *et al.* (2002) indica que se presenta un decaimiento vibracional intermolecular con pérdidas de energía en las diferentes bandas espectrales de la radiación solar, a través de muchos procesos de colisión entre las mismas moléculas y con las partículas de otros gases.

En promedio, las temperaturas del aire exterior registradas para la región andina oscilan entre $19^{\circ}C$ y $22^{\circ}C$,

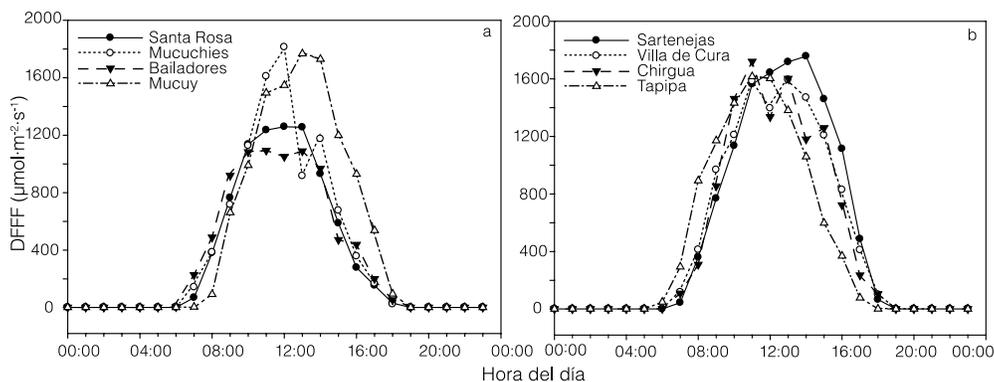


Figura 2. Densidad del flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) para el exterior en diferentes localidades de la región andina (a) y central (b) de Venezuela.

mientras que en la región central varía entre los $25^{\circ}C$ y los $35^{\circ}C$. (Figuras 3a y b).

Las mayores velocidades de viento registradas (Figuras 4a y b), ocurrieron en Chirgua y Villa de Cura, ambas locali-

dades pertenecientes a la región central, mientras que en la región andina se registraron en Bailadores, estado Mérida. En general, las mayores velocidades de viento se presentaron alrededor del mediodía;

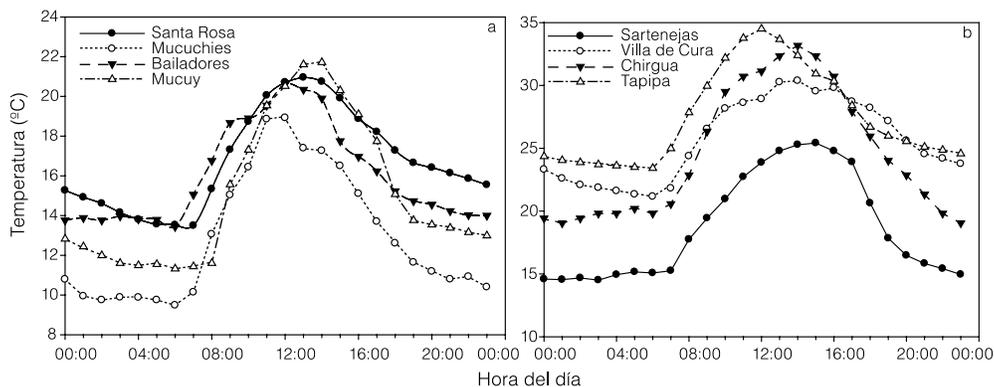


Figura 3. Temperatura del aire exterior para diferentes localidades de la región andina (a) y central (b) de Venezuela.

sin embargo, el perfil de Chirgua se ve desplazado y las mayores velocidades de viento se registraron alrededor de las 16:00.

Perfiles de las variables microclimáticas

Las Figuras 5a y b muestran la DFFF en el interior de los invernaderos, la cual se ve influenciada por el flujo que logra atravesar la cubierta en función de las propiedades ópticas del material. El material empleado en las cubiertas de los invernaderos fue polietileno de baja densidad y la transmisión de la luz es afectada por su condición y la cantidad de polvo que pueda encontrarse adherido, ya que este material tiene una baja conductividad eléctrica, lo que favorece la atracción de las partículas de polvo (Calvete *et al.*, 1999). Existen diferencias significativas en

la dependencia del polietileno de baja densidad con la conductividad eléctrica, como ha sido reportado por Adamec y Calderwood (1981), diferencias que son atribuidas particularmente a la presencia de distintos tipos de impurezas y a las concentraciones variables de polietileno. Para el invernadero ubicado en Bailadores (Figura 5a) la disminución de la radiación se ve influenciada por la presencia de mallas de sombreo fijas de color negro y blanco superpuestas.

Para los invernaderos sin malla de sombreo y con techo semi-elíptico la transmisividad varía entre 0,53 y 0,63 mientras que para el techo curvo asimétrico la transmisividad fue 0,67. Comparando el valor para los invernaderos con malla de sombreo blanca, se detecta que para el techo a dos aguas es mayor que para el techo curvo asimétrico (Tabla III).

En promedio, las mayores temperaturas en el interior ocurrieron en Tapipa y Chirgua (Figuras 6a y b), correspondiendo a las dos

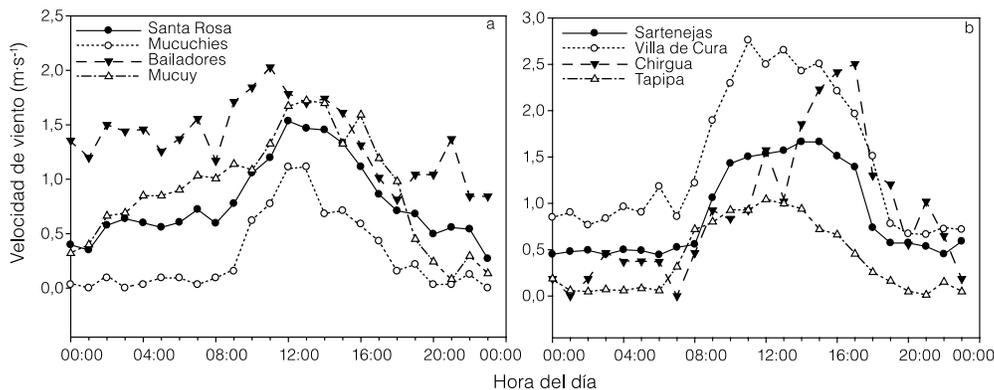


Figura 4. Velocidad del viento exterior en diferentes localidades de la región andina (a) y central (b) de Venezuela.

TABLA III
TRANSMISIVIDAD DE LA DENSIDAD DEL FLUJO DE FOTONES FOTOSINTÉTICOS EN DIFERENTES TIPOS DE TECHOS DE INVERNADEROS

Localidad	Techo	Transmisividad	Malla de sombreo	Color de malla
Santa Rosa	Techo semi-elíptico	0,53	No	-
Sartenejas	Techo semi-elíptico	0,60	No	-
Villa de Cura	Techo semi-elíptico	0,61	No	-
Chirgua	Techo a dos aguas	0,42	No	-
Mucuchies	Techo curvo asimétrico	0,67	No	-
Bailadores	Techo semi-elíptico	0,26	Si	blanca y negra superpuestas
Tapipa	Techo semi-elíptico	0,63	No	-
La Mucuy	Techo curvo asimétrico	0,31	Si	blanca

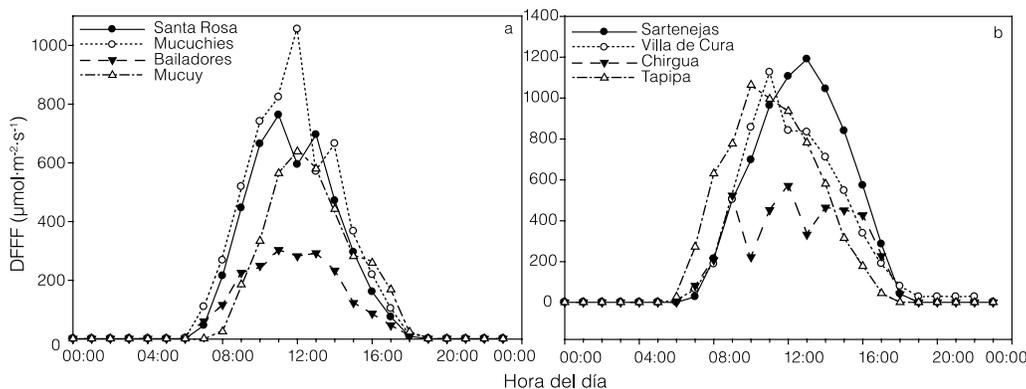


Figura 5. Densidad del flujo de fotones fotosintéticos (DFFF) en el interior de los invernaderos en diferentes localidades de la región andina (a) y central (b) de Venezuela.

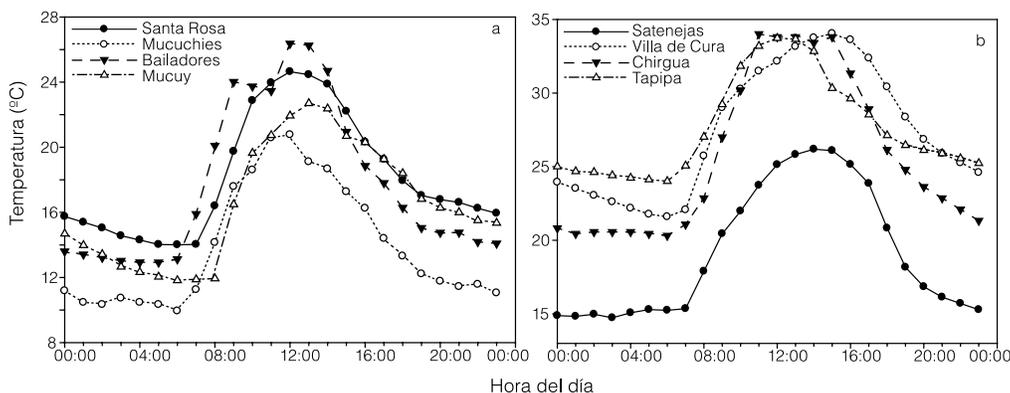


Figura 6. Temperatura del aire interior en invernaderos para diferentes localidades de la región andina (a) y central (b) de Venezuela.

localidades donde se registraron las mayores temperaturas exteriores. En los invernaderos estudiados, las temperaturas promedio mínimas nocturnas del aire interior y exterior son semejantes o muy cercanas, lo que indica que se tiende al equilibrio térmico.

Durante el día la humedad relativa promedio en la región andina es mayor que en la central, a excepción de la localidad de Tapipa, estado Miranda, donde los valores se hallan sobre el 60%. En general, los valores internos nocturnos oscilan entre 80 y 100% y los diurnos entre 40 y 70% (Figuras 7a y b).

Se compararon las relaciones entre la temperatura y humedad relativa del aire interior y exterior en cuatro invernaderos, para cultivos iguales y diferentes, de la región andina y central (Tabla IV). Obteniéndose correlaciones con buen ajuste entre la temperatura del aire interior y exterior, y entre la humedad relativa del aire interior y exterior en ambas regiones, sin afectar el tipo de cultivo.

Temperatura del aire interior vs DFFF

Las curvas para las localidades de Santa Rosa, Sartenejas y Villa de Cura siguen una trayectoria semejante (Figuras 8a y b), lo que puede indicar que a diferentes temperaturas de aire

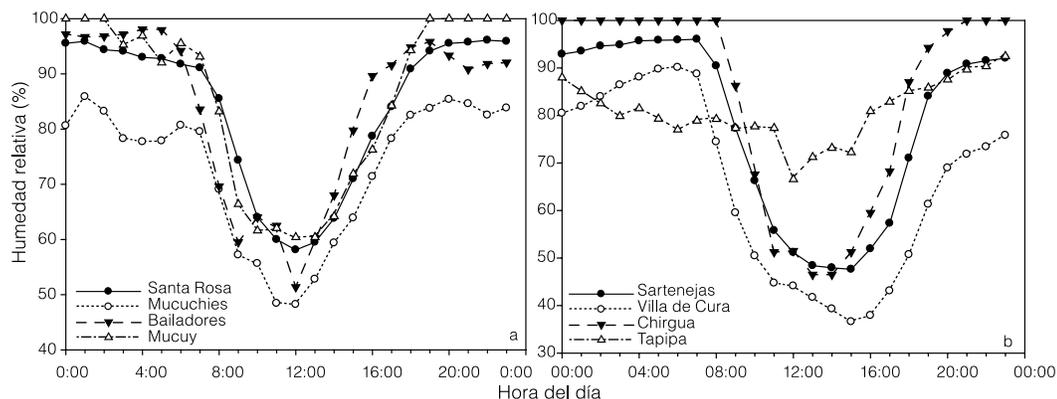


Figura 7. Humedad relativa del aire interior en diferentes localidades de la región andina (a) y central (b) de Venezuela.

TABLA IV
RELACIONES ENTRE LAS TEMPERATURAS Y LAS HUMEDADES RELATIVAS DEL AIRE INTERIOR Y EXTERIOR, PARA CUATRO INVERNADEROS SEGÚN TIPO DE CULTIVO

Región	Andina	Central	Andina	Central
Localidad	Santa Rosa	Chirgua	Mucuchies	Sartenejas
Cultivo	Tomate	Tomate	Plántulas de papa	Pimentón
TINT vs TEXT	$y=0,6599x+4,7795$	$y=0,7278x+5,66$	$y=1,1403x-0,8093$	$y=0,9436x+0,6278$
R ²	0,96	0,99	0,99	0,99
HRINT vs HREXT	$y=1,0187x-14,305$	$y=0,8772x+11,462$	$y=1,0187x-14,305$	$y=0,8772x+11,462$
R ²	0,99	0,98	0,99	0,99

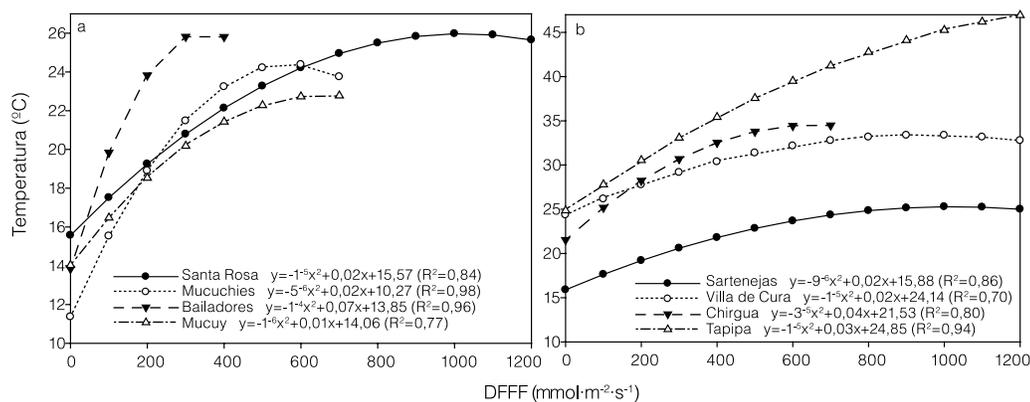


Figura 8. Perfiles de las correlaciones obtenidas entre la temperatura del aire interior y la densidad del flujo de fotones fotosintéticos en el interior de los invernaderos, en diferentes localidades de la región andina (a) y central (b) de Venezuela.

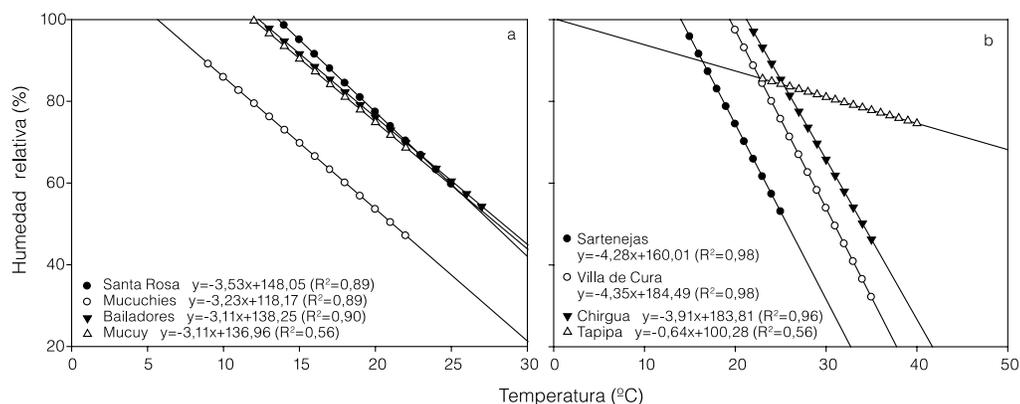


Figura 9. Perfiles de las correlaciones obtenidas entre la temperatura del aire interior y la humedad relativa en el interior de los invernaderos, en diferentes localidades de la región andina (a) y central (b) de Venezuela.

exterior, la influencia de la DFFF que es transmitida al interior del invernadero sobre la temperatura del aire interior es una respuesta proporcional, lo que podría deberse a invernaderos con geometría similar y cubiertas con propiedades térmicas semejantes. Las curvas de menor amplitud corresponden a invernaderos con malla de sombreo en el interior (Bailadores, La Mucuy) o a regiones con alta nubosidad (Mucuchies), siendo la curva de menor amplitud la de Bailadores, coincidiendo con un invernadero que tiene superpuestas dos mallas de sombreo (blanca y negra).

Humedad relativa del aire interior vs temperatura del aire interior

La tasa media de variación de la humedad relativa del aire interior respecto a la variación de la temperatura presenta un comportamiento similar en los invernaderos estudiados de acuerdo a la región (perfiles en la Figura 9a y b), oscilando entre -3,11 y -3,53 en la región andina y entre -3,91 y -4,35 en la región central, a excepción del invernadero de Tapipa, donde la tasa media de variación fue de -0,64. En este último caso, la humedad relativa disminuye muy lentamente al aumentar la temperatura, lo que pudiera indicar una fuente constante de humedad que se incorpora al aire interior del invernadero, lo cual se corroboró por la presencia de humedad excesiva en el suelo.

Orientación del invernadero

En la Figura 10 se observa que la captación de energía solar en la cubierta (Ecs. 1 a 7) de cada tipo de invernadero, está directamente relacionada con el tamaño del invernadero, aunque la captación de energía es más uniforme en la orientación norte-oeste, seguida de la orientación este-oeste, lo que se evidencia con una mayor amplitud en la curva.

Comparando la relación del área de la cubierta y el

área de suelo de cada invernadero (ver estructuras en Tabla I), se obtiene que dicha relación en el techo a dos aguas es 6,5% superior en promedio porcentual, respecto a la relación de la forma de techo semi-elíptico. Tal como concluyó Sethi (2009), la forma del invernadero afecta la radiación total disponible sobre este, ya que para invernaderos con iguales dimensiones (ancho, alto y largo) y formas diferentes, la divergencia de la captación de radiación solar total recibida por el invernadero, corresponde con la relación entre el área de la cubierta y el área del suelo. En la orientación este-oeste, el techo a dos aguas (según su nomenclatura nave a dos aguas), recibe una mayor radiación que la forma de techo semi-elíptico (según su nomenclatura arco modificado) y la forma que recibe menor radiación es la tipo tunel.

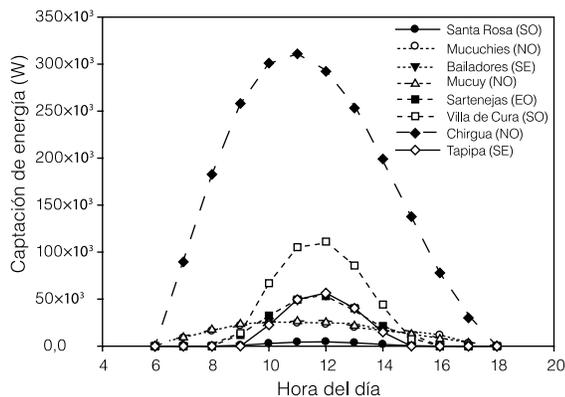


Figura 10. Captación de energía solar (W) en la cubierta de los invernaderos. Se indica orientación entre paréntesis.

cambian en función de la velocidad del viento exterior. Castilla y Montero (2008) determinaron a través de estudios de análisis computacionales que la ventilación puede ser mejorada reduciendo el ancho del invernadero. El invernadero ubicado en Tapipa, estado Miranda, con tres naves de 8m de

por mejora en la ventilación, debido a la menor resistencia del paso del aire por efecto de la densidad del cultivo, siendo necesario corroborar el ancho propuesto con estudios posteriores.

Conclusión

El bajo número de renovaciones de aire en el invernadero incrementa la temperatura del aire interior. La correlación lineal entre la relación (área de las ventanas laterales)/(área del

TABLA V
CARACTERÍSTICAS DE LOS INVERNADEROS EMPLEADAS EN LOS CÁLCULOS DE FLUJO DE VENTILACIÓN Y ESTIMACIÓN TEÓRICA DE LAS RENOVACIONES DE AIRE POR HORA

Localidad	ALTLAT	ALTMAX	ALTVEN	APVCEN	Malla en ventana lateral	VE	N (vol/h, teórico)	(AVEN/ASUE) ×100*
Tapipa	4	6,0	3	0,5	Si	0,42	5,08	15
Villa de Cura	4	6,0	3	1,0	Si	1,44	5,67	5
Chirgua	4	6,0	3	1,0	Si	0,94	4,87	4
Sartenejas	4	6,0	3	1,0	Si	0,88	6,87	8
Santa Rosa	4	6,0	3	0,5	Si	0,77	25,49	33
La Mucuy	4	6,0	4	0,5	Si	0,96	16,54	21
Bailadores	4	5,4	3	0,5	Si	1,21	8,25	6
Mucuchies	4	7,0	3	0,5	Si	0,36	10,03	17

* Considerando malla en las ventanas laterales.

Ventilación en el invernadero

Una estimación de la renovación de aire teórica por hora (Ecs. 9 a 11) para los invernaderos estudiados se presenta en el Tabla V. Las tasas de renovación de aire más bajas son las del invernadero ubicado en Chirgua, seguido del invernadero situado en Tapipa.

De acuerdo con los resultados obtenidos entre la relación (área de las ventanas)/(área del suelo) y el cálculo de la tasa de renovación, se encuentra una correlación lineal ($N = 0,66 \times (\text{área de las ventanas}) / (\text{área del suelo}) + 1,41$) con un buen ajuste ($R^2 = 0,83$). Von Zabeltitz (1999) indicó que la relación entre la apertura de ventilación y el área del suelo del invernadero, debería ser mayor de 15% para proveer suficiente ventilación.

La apertura de las ventanas junto a la velocidad de viento explica más del 50% del total de la variancia del número de

renovaciones del volumen de aire en el invernadero, mientras que la diferencia entre la temperatura del aire interior y exterior (efecto chimenea), es solo importante para bajas velocidades de viento ($< 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; Sbita *et al.*, 1999). Khaoua *et al.* (2006), determinaron que para una velocidad de viento y temperatura en el exterior de $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ y 30°C , respectivamente, la tasa de intercambio de aire varía de 9 a 26,4 volúmenes por hora en el lado a barlovento. Teitel *et al.* (2006; 2007) encontraron que en invernaderos naturalmente ventilados, las velocidades de viento en el interior no eran afectadas por la velocidad del viento exterior si solo se usa la apertura de la ventana cenital, mientras que con la apertura de las ventanas laterales en los diferentes puntos del invernadero, las velocidades del viento interior

ancho cada una, presenta un microclima muy heterogéneo, donde la diferencia de temperatura en el aire adyacente a las hojas entre las plantas ubicadas en el centro del invernadero y las cercanas a las ventanas laterales es de 3°C en promedio (Figura 11), por lo que podría pensarse que disminuyendo el número de naves a dos, con un ancho máximo de 18m, disminuirá esa diferencia

suelo) y la tasa de intercambio de aire en el invernadero, muestra que la relación entre áreas de ventanas laterales y suelo del invernadero debe ser como mínimo de 20%, para obtener un número de renovaciones de aire superior a 15 por hora, si la velocidad de viento es $\leq 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La altura de las paredes laterales de los invernaderos entre 3,5 y 4m favorece la entrada de luz al invernadero y a la vez aumenta el área de ventilación, lo que permite una mayor tasa de renovación de aire y contribuye a un mejor control de la temperatura interior.

De las formas de cubiertas de invernadero estudiadas, la de techo a dos aguas recibe el máximo de radiación solar, seguido por el techo semi-elíptico, por lo que se podría considerar el techo de forma semi-elíptico como el más adecuado para las regio-

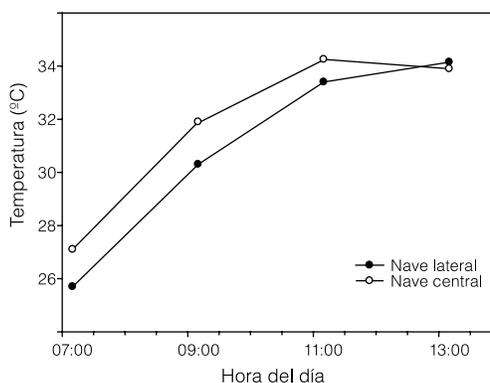


Figura 11. Comparación de la temperatura del aire adyacente a las plantas en la nave central y lateral de un invernadero con tres naves de 8m cada una.

nes tropicales. Las orientaciones norte-oeste y este-oeste reciben la mayor cantidad de radiación y de manera más uniforme, aspecto de gran importancia para localidades con alta nubosidad. En cuanto a la orientación en lugares donde se registran altas temperaturas o bajas velocidades de viento, se recomienda utilizar ventanas laterales perpendiculares a la dirección del viento predominante.

Se requiere de estudios adicionales para profundizar la interrelación del cultivo y el microclima bajo cubierta, así como su intercambio gaseoso. Específicamente para el cálculo de las tasas de renovación, pudiera agregarse un factor de corrección de acuerdo al tipo de cultivo, su desarrollo y etapa de crecimiento, para determinar su resistencia al paso del aire y su influencia sobre la tasa de renovación del aire, requiriéndose para ello mediciones de velocidad de viento en el interior de cada invernadero.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Profesores José Rujano, Luis Cedeño y Williams León, de la ULA por su colaboración. Este trabajo fué financiado por el Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico de la Universidad

de Los Andes (proyecto CVI-PIC-IND-FO-01-05) y cofinanciado por Fundacite Mérida y la Compañía PAPELEX.

REFERENCIAS

- Abdel M, Higazy N (1980) Depletion of total direct solar radiation caused by particulate contamination of Helwan atmosphere. *Atm. Env. 16*: 2401-2404.
- Adamec V, Calderwood H (1981) On the determination of electrical conductivity in polyethylene. *J. Phys. D: Appl. Phys. 14*: 1487-1494.
- Baptista F, Abreu P, Meneses J, Bailey B (2001) Comparison of the climatic conditions and tomato crop productivity in mediterranean greenhouses under two different natural ventilation management systems. *Proc. Int. Symp. Agribuilding. Paper N° 3006*. pp. 112-124.
- Calvete E, França S, Bergamaschi H, Kämpf A (1999) Determinações micrometeorológicas sob diferentes materiais de cobertura para aclimatização de plantas ex vitro. *Rev. Bras. Agrometeorol. 7*: 151-156.
- Castilla N, Montero J (2008) Environmental control and crop production in Mediterranean greenhouses. *Acta Hort. 797*: 25-36.
- Cisniega G, Rodríguez C, Cervantes S, Morán M (2002) Contaminación del aire urbano: Efectos de la radiación solar. *XXVIII Congr. Interam. Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Cancún, México. www.cepis.ops-oms.org/bvsaidis/mexico26/vi-006.pdf (Cons. 07/2009).
- De Jong T (1990) *Natural Ventilation of Large Multispan Greenhouses*. Tesis. Agricultural University of Wageningen, Holanda. 116 pp.
- Furlan R, Folegatti M, Sentelhas P (2001) Efeito da nebulização e ventilação natural na redução da temperatura do ar em ambiente protegido. *Rev. Bras. Agrometeorol. 9*: 181-186.
- Jaimez R, Da Silva R, D'Aubeterre A, Allende J, Rada F, Figueiral R (2005) Variaciones microclimáticas en invernadero: efecto sobre las relaciones hídricas e intercambio de gases en pimentón (*Capsicum annum*). *Agrociencia 39*: 41-50.
- Jaimez R, Martínez P, Da Silva R (2006) Microclima en invernaderos: Sus efectos sobre intercambio de gases en cultivos: Casos de Venezuela. www.wbdelprofesor.ula.ve/forestal/rjaimez/publicaciones/invernadero/invernaderos_en_venezuela.pdf (Cons. 06/2009).
- Khaoua S, Bournet P, Migeon C, Boulard T, Chassériaux G (2006) Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. *Biosyst. Eng. 95*: 83-98.
- Kittas C, Boulard T, Papadakis G (1997) Natural ventilation of a greenhouse with ridge and size openings: sensitivity to temperature and wind effects. *Trans. ASABE 2*: 415-425.
- Majdoubi T, Boulard T, Fatnassi H, Bouirden L (2009) Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study. *Agric. Forest Meteorol. 149*: 1050-1062.
- Sbita L, Boulard T, Mermier M (1999) Natural ventilation performance of a greenhouse tunnel in South Tunisia. En Choukr-Allah R (Ed.) *Protected Cultivation in the Mediterranean Region: Cultures Protégées dans la Région Méditerranéenne*. CIHEAM. Paris, Francia. pp: 109-118.
- Sethi V (2009) On the selection of shape and orientation of a greenhouse: thermal modeling and experimental validation. *Sol. Energy 83*: 21-38.
- Singh G, Singh Parm, Singh Prit, Singh K (2006) Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renew. Energy 31*: 1541-1560.
- Soni P, Salokhe V, Tantau H (2005) Effect of screen mesh size on vertical temperature distribution in naturally ventilated tropical greenhouses. *Biosyst Eng. 92*: 469-482.
- Teitel M, Liran O, Tanny J, Barak M (2006) Air velocities in a naturally ventilated greenhouse. *Acta Hort. 719*: 189-196.
- Teitel M, Barak M, Ben-Yaakon E, Gatker J, Tanny J, Cohen S (2007) Comparing greenhouse natural ventilation to fan and pad cooling. *Acta Hort. 761*: 33-40.
- Von Zabeltitz C (1999) Greenhouse structures. En Stanhill G, Zvi-Enoch H (Eds.) *Ecosystem of the World 20. Greenhouse Ecosystems*. Elsevier. Amsterdam, Holanda. pp. 17-71.