

ASOCIADOS CON SOMBREO MEJORAN CONSIDERABLEMENTE LA HOMOGENEIDAD DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

Ensayos de efectividad de los paneles evaporadores en invernaderos mediterráneos

El objetivo de este trabajo ha sido estudiar, mediante anemometría sónica, la distribución de temperatura y humedad y el flujo de aire en un invernadero multitúnel equipado con un sistema de refrigeración mediante paneles evaporadores. En el interior del invernadero, junto a los paneles, se registraron los mayores valores de velocidad del aire y de intensidad de turbulencia del mismo. Los ensayos se realizaron tanto con un cultivo bien establecido como con el invernadero vacío, con el resultado de que el cultivo provocó un claro efecto estabilizador del flujo de aire, disminuyendo los niveles de energía y turbulencia del aire.

Alejandro López, Diego L. Valera,
Francisco D. Molina y Araceli Peña.

Universidad de Almería.

En los últimos años se ha incrementado la instalación de sistemas de refrigeración por evaporación de agua en muchas zonas, como el sureste de España, con gran concentración de invernaderos y elevadas temperaturas en la campaña de primavera-verano (**cuadro 1**). Fundamentalmente se han instalado sistemas de nebulización, pero también paneles evaporadores. En muchas ocasiones no sólo se utilizan para disminuir la temperatura, sino para mantener una adecuada humedad que permita, por ejemplo, adelantar la fecha de trasplante (hasta iniciarlo a principios de agosto) de los cultivos de otoño-invierno.

Los paneles permiten disminuir la temperatura entre 4 y 6°C si se usan solos y entre 4 y 12°C si se acompañan con sombreo. Su ventaja principal es que se elimina el riesgo de mojar el cultivo, y su desventaja deriva de los gradientes de temperatura y humedad que generan. El microclima del invernadero puede describirse con precisión utilizando anemómetros sónicos, que proporcionan el vector velocidad con una frecuencia de muestreo elevadísima. Nos han permitido además analizar la turbulencia del flujo de aire, que incrementa la transferencia de calor, favoreciendo la mezcla del aire húmedo y a baja temperatura (paneles), con el seco y cálido del interior del invernadero.

Materiales y métodos

Los ensayos se realizaron en un invernadero multitúnel de 1.080 m² situado en el campo de



prácticas de la Universidad de Almería (36°51' N, 2°16' W). Dispone de un panel evaporador (2 x 40 m) situado en el lateral sur, así como de ocho extractores instalados en la pared norte (**figura 1a**). Para prevenir la entrada de insectos a través de los paneles, éstos están cubiertos en su cara exterior por una malla antiinsectos de 10 x 20 hilos cm⁻². El invernadero se encuentra dividido en dos mitades. Este ensayo concreto se realizó en la mitad este, pero con los paneles evaporadores (*cooling system*) funcionando en todo el invernadero.

El primer ensayo (**figura 1b**) se realizó con un cultivo de tomate tipo cherry (*Solanum lycopersicum* L. cv. Salomee), con una altura media de 2,2 m y un índice de área foliar de 1,69 m² m⁻². El segundo ensayo se realizó sin cultivo (**figura 1c**), con el objetivo de reproducir las condiciones en las que se encuentran las plantas recién trasplantadas. El propósito de este ensayo fue estudiar la viabilidad de adelantar la fecha de trasplante.

La velocidad del aire y la temperatura interior se midieron a 1,5 m de altura con un anemómetro sónico 3D (mod. CSAT3, de la empresa española Campbell Scientific Spain; resolución: 0,001 m s⁻¹ y 0,002 °C; precisión ± 0,04 m s⁻¹ y ± 0,026 °C). Para el registro de los datos proporcionados por los distintos sensores utilizamos un CR3000 Micrologger (Campbell Scientific Spain), seleccionando una frecuencia de muestreo de 10 Hz.

Las condiciones climáticas exteriores se registraron en una estación meteorológica situada a 10 m, que incluía una caja de medida Butron II (de la empresa española Hortimax, España) con sonda de temperatura Pt1000 y sensor de humedad de tipo capacitivo (intervalos de temperatura y humedad de -25 °C a 75 °C y 0% a 100%; precisión de ± 0,01 °C y ± 3%).

El viento exterior se midió con una Meteostation II (Hortimax), que incorpora una veleta y anemómetro de cazoletas (intervalo de medida de 0-40 m s⁻¹ y 0-359°; precisión de ± 5% y ± 5°; resolución de 0,01 m s⁻¹ y 1°).

La temperatura y la humedad dentro del invernadero la medimos con seis registradores autónomos Hobo Pro Temp-HR U23-001 (de la empresa americana Onset Computer Corp., intervalo de medida -40 °C - 70 °C y 0% - 100%; precisión de ± 0,18 °C y ± 2,5%) situados a dos alturas (1 y 2 m), y un séptimo sensor situado junto al panel. Con los datos interiores de humedad calculamos la humedad específica *q* para

CUADRO I.

Condiciones climáticas exteriores: \hat{U}_{ext} , velocidad media el aire; *D*, dirección del viento; *HR_e*, humedad relativa; *T_e*, temperatura.

Fecha	Hora	\hat{U}_{ext} , m s ⁻¹	<i>D</i> , °	<i>HR_e</i> , %	<i>T_e</i> , °C
22/07/08	11:15-14:10	4,92 ± 1,43	72 ± 21 (NE)	53 ± 4	29,9 ± 0,8
11/08/08	11:05-13:52	5,45 ± 0,49	189 ± 5 (SW)	65 ± 2	28,6 ± 0,5

* La dirección perpendicular a las ventanas es 28° para un viento de Levante (NE) y 208° para un viento de Poniente (SW).

de esta manera poder corregir la temperatura sónica (*T_s*) como $T_{sc} = T_s / (1 + 0,51q)$. Los extractores trabajaron a 40 Hz, proporcionando un caudal de 5,6 m³ s⁻¹, y el aporte de agua a los paneles fue de 3,3 l h⁻¹ m⁻².

Resultados y discusión

Los valores de velocidad medidos en las cuatro secciones transversales muestran que la componente principal es *u_x*, perpendicular a los paneles, correspondiéndole el 85,7% y el 84,5%

de la velocidad total *u*, para las medidas con y sin cultivo. La uniformidad espacial fue mayor en las zonas cercanas a los paneles, en las cuatro secciones analizadas (**figura 2**). El valor medio para la componente horizontal *u_x* fue de 0,21 ± 0,07 m s⁻¹ con cultivo y 0,26 ± 0,10 m s⁻¹ con el invernadero vacío. La tasa de ventilación fue de 27,1 h⁻¹ renovaciones con cultivo y 21 h⁻¹ renovaciones sin cultivo. Algunos autores proponen 20 h⁻¹ renovaciones como un valor adecuado para el funcionamiento de los paneles para climas secos. En todo caso, el valor calculado es

FIGURA 1.

Invernadero experimental (a). Distribución de los sensores en el sector entre las líneas de cultivo el 22/7/2008. (b) Sin cultivo el 11/08/2008. (c) ⊗, puntos de medida con el anemómetro sónico (CSAT3); ■, sensores de temperatura y humedad.

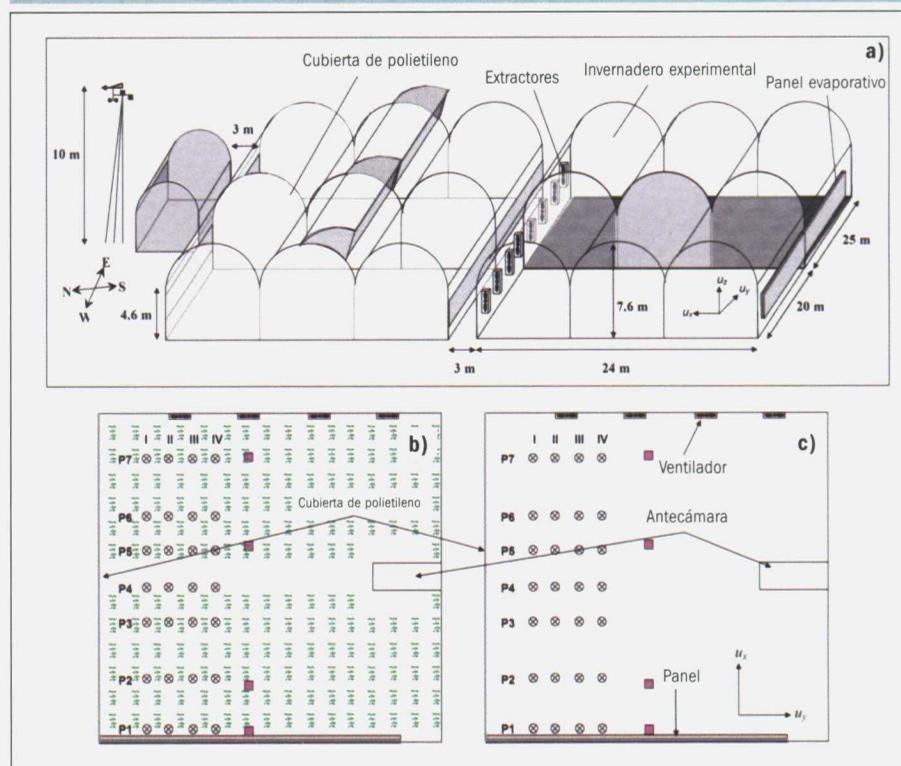


FIGURA 2.

Perfiles de velocidad absoluta correspondientes con las medidas el 22/07/08 con cultivo (a) y el 11/08/2008 sin cultivo (b).

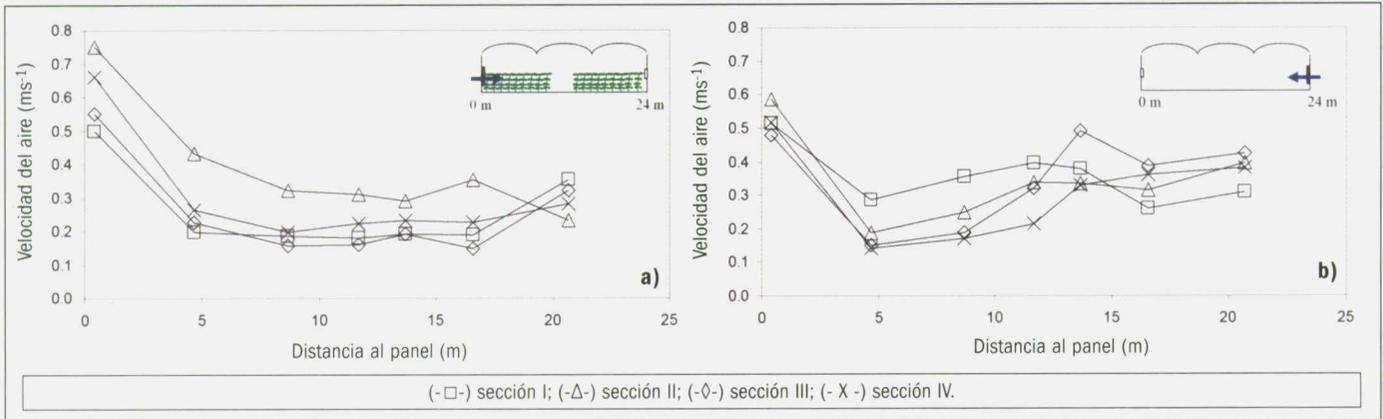


FIGURA 3.

Resultantes en dos dimensiones de la velocidad del aire en el plano XZ (v) y representaciones polares de la dirección del flujo de aire con cultivo el 22/07/2008 para la sección III (a) y sin cultivo el 11/08/2008 para la sección IV (b). Resultantes en dos dimensiones de la velocidad del aire en el plano XY (l) y representación polar con cultivo el 22/07/2008 (c) y sin cultivo el 11/08/2008 (d).

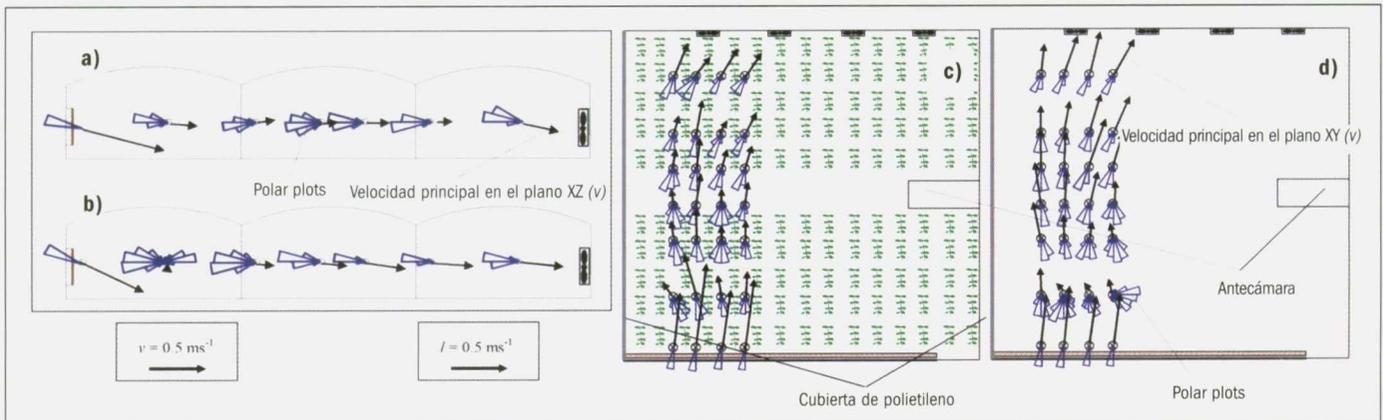


FIGURA 4.

Perfiles de intensidad de turbulencia y velocidad absoluta correspondientes a los ensayos del 22/07/08 con cultivo (a) y el 11/08/2008 sin cultivo (b).

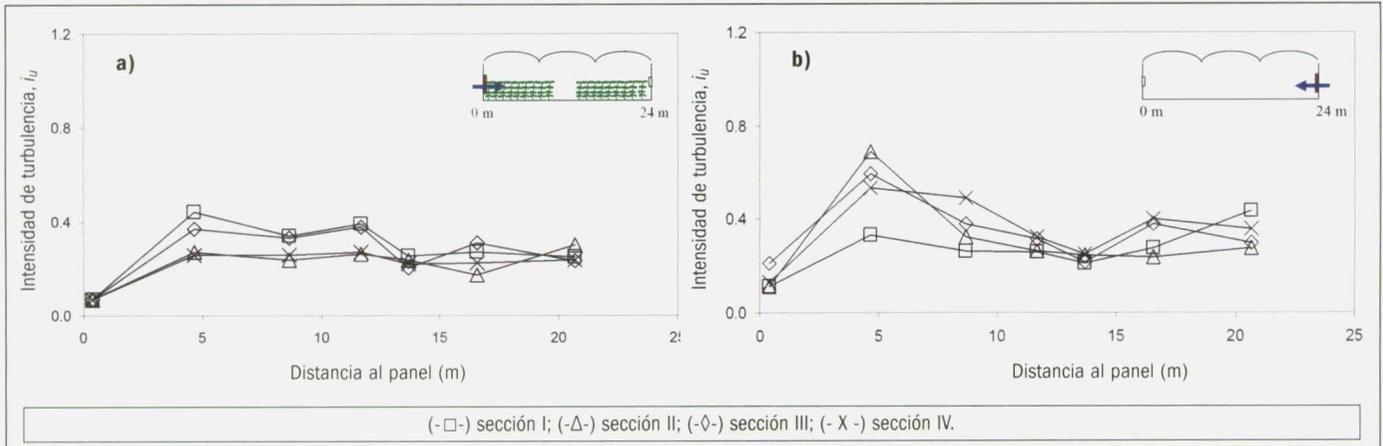
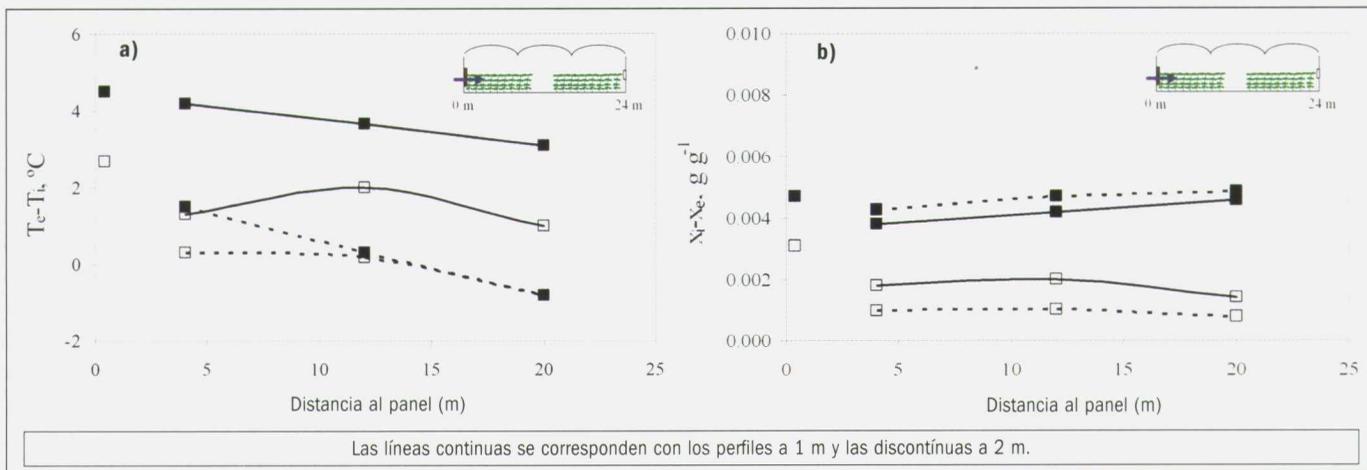


FIGURA 5.

Gradientes de temperatura (a) y humedad absoluta (b) entre el interior (T_i and x_i) y el exterior del invernadero (T_e and x_e) para los ensayos con cultivo el 22/07/08 (■) y sin cultivo el 11/08/09 (□).



inferior a las 35 ó 90 h⁻¹ renovaciones recomendadas por ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers). No obstante, este sistema incrementa considerablemente el número de renovaciones frente a un invernadero con ventilación natural, que en la zona de estudio oscila entre 5 y 15 h⁻¹.

Con el invernadero vacío se registró un incremento en la fluctuación de la dirección del flujo de aire en el primer módulo (figura 3b y 3d), provocada por la mezcla de aire húmedo y frío que sale del panel con el seco y cálido del invernadero. La interacción entre ambas masas de aire puede causar un incremento en la tur-

bulencia del mismo, y por tanto producir dichas fluctuaciones.

Se registraron menores niveles de turbulencia que en un invernadero con ventilación natural, y menores con cultivo $i_U=0,44$ (figura 4a) que cuando el invernadero estaba vacío, $i_U=0,69$ (figura 4b).

Los gradientes horizontales de temperatura dentro del invernadero (figura 5a), fueron de 0,07°C m⁻¹ y 0,27°C m⁻¹ (1 y 2 m de altura) en el invernadero con el cultivo de tomate cherry; y 0,09°C m⁻¹ y 0,18°C m⁻¹ con el invernadero vacío. El sector donde se ubicaron los extractores presentó las peores condiciones,

con temperaturas incluso superiores a las exteriores. Los gradientes verticales incrementaron al alejarnos de los paneles, y fueron más altos en presencia del cultivo (variando desde 2,7°C m⁻¹ a 4 m del panel hasta 3,9°C m⁻¹ a 20 m) que en el invernadero vacío. En este último caso la variación fue desde 1°C m⁻¹ hasta 1,8°C m⁻¹. En cualquier caso, la presencia del cultivo originó mayores gradientes horizontales y verticales, y tanto de temperatura como de humedad, así como una mayor diferencia de temperatura con el exterior.

La evapotranspiración del cultivo incrementó el contenido de vapor de agua del aire, por

ROTARY REVOLUTION AXIAL-FLOW

CASE IH AGRICULTURE

CNH CAPITAL

MAX
Atención al cliente
00 800 / 22 73 44 00

La llamada es gratuita, pero algunos operadores pueden cobrar si ésta se efectúa desde un teléfono móvil. Consulte antes con su operador.

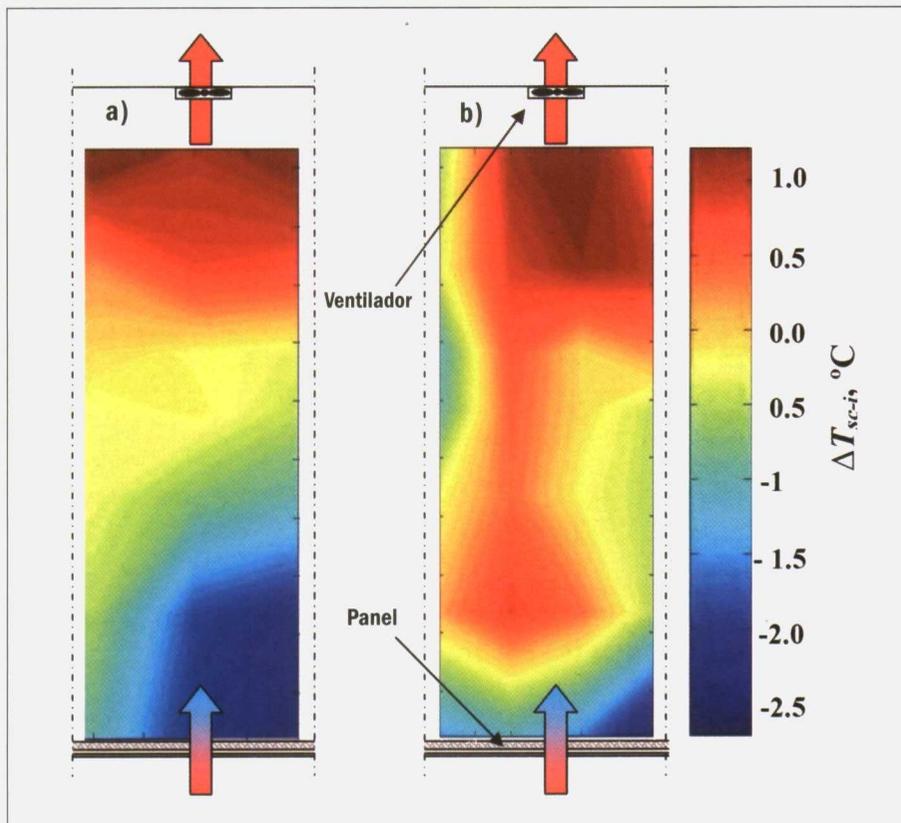
AXIAL-FLOW, PERFECTA PARA UN LÍDER.

www.caseih.com

CASE IH AGRICULTURE

FIGURA 6.

Distribución horizontal de la diferencia de temperatura entre la temperatura sónica corregida y la temperatura media instantánea (ΔT_{sc-i}). Ensayos realizados el 22/07/08 con cultivo (a) y sin cultivo el 11/08/09 (b).



Los valores de velocidad medidos en las cuatro secciones transversales muestran que la componente principal es u_x perpendicular a los paneles, correspondiéndole el 85,7% y el 84,5% de la velocidad total u , para las medidas con y sin cultivo

esto, con cultivo, la humedad se incrementaba con la altura y con la distancia a los paneles (figura 5b).

Por último, se obtuvo la distribución de temperatura en el invernadero a 1,5 m de altura mediante la lectura (temperatura sónica, T_{sc}) que proporciona el anemómetro sónico. Para comparar los valores de T_{sc} medidos en diferentes momentos, estudiamos la diferencia (ΔT_{sc-i}) entre T_{sc} en cada instante y la media del invernadero. Durante el ensayo con cultivo la temperatura

media en el interior del invernadero a 1,5 m fue de 27,9°C (26,3°C a 1 m y 29,6°C a 2 m) mientras que la temperatura media exterior fue 29,9°C.

En la figura 6 podemos observar una mayor uniformidad en la temperatura en el interior del invernadero cuando hay un cultivo en su interior, con una diferencia máxima entre la zona más fría (cerca de los paneles) y la más cálida (cerca a los extractores) de 2,3°C. Sin embargo, con el invernadero sin cultivo se alcanza una di-

ferencia de 4°C. Incluso puede suceder que con el invernadero vacío, con el sistema de refrigeración funcionando, existan zonas con una temperatura superior a la exterior, lo que pondría en serio riesgo el uso de estos equipos para adelantar el trasplante. No obstante, asociados con un sistema de sombreo aumenta sustancialmente su eficacia.

Conclusiones

La componente fundamental del flujo de aire generado por los extractores es la perpendicular a los paneles, donde las componentes transversal y vertical juegan un papel secundario; este efecto se incrementa con la presencia de un cultivo tutorado (en líneas), bien desarrollado, en el interior del invernadero.

Cuando el aire frío y húmedo procedente de los paneles se pone en contacto con la masa de aire cálido y seco en el interior del invernadero, disminuye su velocidad, lo que acarrea un incremento de sus niveles de turbulencia. Este incremento de la turbulencia es menor en presencia del cultivo, lo que indica que éste se comporta como un medio poroso, provocando un efecto de dispersión del momento del flujo de aire.

Los niveles de turbulencia registrados en este ensayo son inferiores a los que se obtienen en invernaderos con ventilación natural. Por lo cual, el sistema ensayado reduce la capacidad de mezcla entre las distintas masas de aire y contribuye a generar heterogeneidad microclimática, que constituye la principal desventaja de este sistema. En la fecha de trasplante esta heterogeneidad puede provocar un consumo extra de agua por el cultivo, que tiene que ser considerado por los agricultores para evitar daños por estrés hídrico. Asociados con sombreo mejoran considerablemente la homogeneidad de las variables climáticas en el interior del invernadero.

Los paneles evaporadores son menos efectivos cuanto menos desarrollado está el cultivo, provocando en este caso menores reducciones de la temperatura. El propio cultivo, mediante la transpiración, se comporta como el gran impulsor de la refrigeración del invernadero. ●

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Junta de Andalucía la financiación parcial de este trabajo mediante el Proyecto de Investigación de referencia P09-AGR-4593.