

*La combinación más efectiva para abordar el problema de la refrigeración en verano en invernaderos mediterráneos*

## Sistemas de refrigeración de bajo coste en invernaderos

■ ROMERO, A., GARCÍA, J.L., BENAVENTE, R.M., LUNA, L., PARAMÉS, E.

*Departamento de Ingeniería Rural, Universidad Politécnica de Madrid*



En invernaderos mediterráneos, la refrigeración en verano supone un problema más serio que la calefacción en invierno. Existen varias alternativas para abordar el problema, con diferentes niveles de coste:

- Los sistemas de ventilación, con ventanas cenitales y/o laterales, combinadas o no con ventilación activa.

**La ventana cenital permite abrir la mitad del techo con la cumbrera como eje de giro.**

- Las técnicas que reducen la entrada de radiación solar, como el encalado, las mallas de sombreo o las pantallas aluminizadas (térmicas y de sombreo).

- Los sistemas de refrigeración con evaporación de agua, como la nebulización a alta y baja presión o las pantallas evaporativas.

En este estudio se han com-

parado siete combinaciones distintas de técnicas de ventilación y refrigeración de bajo coste (ventilación natural y forzada, sombreo y nebulización a baja presión), buscando la combinación más efectiva para la producción en invernadero. A continuación, en el apartado de materiales y métodos, se describen los sistemas utilizados.



La malla de sombreado, cuyas dimensiones son de 6,6 x 20 m (5 franjas de 4 m), está colocada a la altura del canalón (3 m); es de tipo aluminizada con valores nominales del 65% de sombra y 60% de ahorro energético. El conjunto de tracción para la extensión/recogida está automatizado por medio de un motor trifásico; aunque se puede automatizar su apertura y plegado, en los experimentos se utilizó como si fuera fija.

**Los valores de radiación indicaron que, sin pantalla de sombreado, llega al cultivo el 60% de la radiación exterior, mientras que con pantalla de sombreado el porcentaje de radiación que llega al cultivo es del 16%**

### Materiales y métodos

La metodología que se describe ha sido utilizada para comparar sistemas de calefacción, refrigeración y técnicas de ahorro de energía en invernaderos. Los ensayos se han realizado en un módulo de 132 m<sup>2</sup> (6,6 m de ancho por 20 m de largo) de un invernadero multitúnel, situado en los campos de prácticas de la ETSI Agrónomos de Madrid, con techo curvo y pared recta, estructura de acero galvanizado y cubierta de plástico rígido (metacrilato), en el que se cultiva *Gerbera jamesonii* en contenedores sobre el suelo.

Respecto a la ventilación, el invernadero dispone de una ventana cenital que permite abrir la mitad del techo con la cumbre como eje de giro, a lo largo de toda la longitud del mismo. Cuenta asimismo con una ventana lateral que va desde el canalón hasta una altura de 2 m sobre el suelo, recorriendo también toda la longitud del invernadero (situada en el



lado opuesto a la ventana cenital). Asimismo, el invernadero cuenta con 4 ventiladores eléctricos, 2 en cada frontal, que impulsan el aire del exterior hacia el interior, con un caudal nominal de 900 m<sup>3</sup>/hora; esto supone aproximadamente 8 renovaciones/hora por este concepto.

**En la imagen superior, momento en que la pantalla se extiende. Sobre estas líneas, sensor de radiación exterior.**

El sistema de nebulización está colocado por encima de la pantalla de sombreado, con el objetivo de enfriarla y evitar que irradie calor al interior del invernadero. Consta de cinco líneas con un total de 22 nebulizadores de baja presión, con un caudal de 8 l/hora cada uno, lo que supone 1,3 l/hora•m<sup>2</sup> en funcionamiento continuo. Sin embargo, los nebulizadores funcionaron de modo discontinuo, en ciclos de 4 minutos en reposo y 20 segundos en funcionamiento, en el periodo del día comprendido entre las 11 hasta las 20 h. Según este programa de funcionamiento, el caudal real emitido por los nebulizadores fue de 0,1 l/hora•m<sup>2</sup>, y dado que funcionaron durante nueve horas diarias el caudal aportado fue de 0,9 l/día•m<sup>2</sup>.

Los experimentos se realizaron durante la campaña de verano 2001, siendo los resultados que

aparecen a continuación los valores medios en 6 días, para cada una de las siete combinaciones ensayadas. El ensayo se realizó, por tanto, en 42 días de verano.

Se midieron las siguientes variables:

- Temperatura y humedad relativa interior del invernadero, medidas a 0,5 m (la altura de las plantas) para la humedad y a 1,5m de altura para la temperatura ambiente.

- Temperatura exterior a 1,5 m de altura.

- Radiación solar exterior e interior, lo que permitió calcular la relación entre ambos valores, con y sin pantalla de sombreo. Esta relación entre la radiación interior y la exterior aparece en la tabla adjunta con el nombre de transmitancia.

Los sensores de temperatura (Pt-100 a 4 hilos) y humedad relativa se ubicaron dentro de jaulas de poliestireno, para evitar posi-



La ventana lateral recorre toda la longitud del invernadero.



# Seed-Cas



◆ Contamos con las mejores casas de semillas del mundo, por eso garantizamos buena germinación y mejor resultado final.

◆ No dude en consultar todo tipo de variedades y consejos de cultivo. Le informaremos sin ningún compromiso.

**Apartado 324**  
**12 080 Castellón**  
**Tel. 636 988 557**  
**Fax. 964 242 284**  
**e-mail: vipesi@telefonos.es**





# El Todo en 1

## PAPILLON COMPLEX



**Con ALPHA - 3**

Unico producto con ALPHA - 3, enriquecido con todos los microelementos y aminoácidos de alta calidad.

**COFERAL-3**  
 www.ediho.es/coferal  
 e-mail: coferal@edih.es  
 Pol. Ind. Estepona, C/ Marconi, 8  
 Telfs. 952 86 26 25 - 609 55 90 57  
 Fax. 952 76 41 80  
 29680 Estepona (MALAGA)

Efectivo para rangos muy amplios de pH (3'5 a 8'9), puede ser aportado en hidroponía, fertirrigación, pulverización foliar o aplicación al suelo.

- ◆ ENRAIZANTE
- ◆ SUPERNUTRIENTE
- ◆ INDUCTOR FLORAL
- ◆ BIOESTIMULANTE



**COFERAL • 3**



Sensor de radiación interior.

- Las variables medidas corresponden a temperatura y humedad relativa interior, temperatura exterior y radiación solar interior y exterior

bles interferencias en la lectura a causa de la incidencia directa de la radiación solar. Los valores medidos por los sensores se registraron en dos sistemas de adquisición de datos.

**Resultados**

Las siete combinaciones de técnicas que se estudiaron se detallan en la tabla adjunta, donde aparecen también los resultados medios de las variables más importantes. Se tomó el periodo del

## CONTROL DE CLIMA PERSONALIZADO PARA SU INVERNADERO

### AUTOMATIZACIÓN DE:

- ➔ Ventilaciones
- ➔ Pantallas
- ➔ Calefacción
- ➔ Temperatura
- ➔ Humedad
- ➔ Dirección del viento
- ➔ Fuerza del viento
- ➔ Luz/Radiación
- ➔ Lluvia
- ➔ Control de CO<sub>2</sub>
- ➔ Nebulizaciones



**PB-Systems, S.L.**  
 Polígono Industrial La Redonda  
 Calle XIII, oficina 115  
 04700 Sta. M<sup>a</sup> del Aguila - EL EJIDO (Almería)  
 Tel.: 950 583 007 - Fax: 950 583 136  
 Móviles: 667 71 75 94  
 e-mail: info@pb-systems.com



**PB Systems, S.L.**  
 sistemas de control de clima  
 unidades de regulación  
 automatización técnica

Tabla 1:

Diferentes combinaciones de ventilación y refrigeración de bajo coste

Técnica de refrigeración	Tª. máxima exterior (°C)	Tª. máxima interior (°C)	Salto térmico (°C) (de 15 a 17 h)	HR interior (%) (de 11 a 20 h)	Transmitancia (%)
1) Ventilación lateral y cenital	33,8	39,3	3,01	25,1	59,2
2) Ventilación lateral y cenital más ciclos de nebulización	34,3	35,4	1,64	35,6	61,9
3) Ventilación lateral y cenital. Pantalla de sombreado completamente extendida (sin aperturas intermedias)	34,0	36,6	0,62	34,3	16,3
4) Ventilación lateral y cenital. Pantalla de sombreado, con aperturas de 20 cm	34,9	35,6	0,54	34,6	15,7
5) Ventilación lateral y cenital. Pantalla de sombreado, con aperturas intermedias de 20 cm más ciclos de nebulización	36,0	35,7	-0,63	35,9	16,9
6) Ventilación sólo cenital. Pantalla de sombreado con aperturas intermedias de 20 cm	36,7	40,5	3,51	33,8	16,4
7) Ventilación sólo cenital. Pantalla de sombreado, con aperturas intermedias de 20 cm más ventilación forzada con ventiladores	34,3	37,6	3,43	29,7	15,1

día de 15 a 17 h para evaluar el salto térmico entre el interior y el exterior del invernadero, por ser el periodo con temperaturas más elevadas en el interior del invernadero.

En el sistema de referencia (invernadero con ventilación lateral y cenital, opción 1 en la tabla) el salto térmico medio entre el interior y el exterior fue de 3 °C. Al añadir la nebulización a baja presión, el salto medio se reduce a 1,6 °C (opción 2); con la pantalla de sombreado, el salto pasa a 0,6 °C (opciones 3 y 4). No se apreciaron diferencias entre extender completamente la pantalla de sombreado o dejar aperturas de 20 cm entre sectores de la pantalla (opciones 3 y 4).

Con la combinación de pantalla de sombreado y nebulizadores por encima, se consiguió un salto térmico negativo (-0,6 °C, opción 5).

Las dos últimas opciones sólo utilizaban ventilación cenital. La combinación de ventilación cenital con la pantalla de

sombreado produjo un salto térmico superior (3,5 °C, opción 6). Añadir ventilación activa (opción 7) para sustituir a la ventana lateral no consiguió reducir apreciablemente el salto térmico (3,4 °C), aunque este resultado no es concluyente, porque la colocación de los ventiladores se podía mejorar sensiblemente.

Otros parámetros que se midieron fueron la humedad relativa y la radiación solar. La humedad relativa no registró variaciones apreciables, utilizando el valor medio de 11 a 20 h, entre las siete opciones ensayadas. Esto probablemente significa que se podían haber utilizado dosis superiores de nebulización. Los valores de radiación indicaron que, sin pantalla de sombreado, llega al cultivo el 60% de la radiación exterior, en el invernadero utilizado; mientras que con pantalla de sombreado el porcentaje de radiación que llega al cultivo es del 16%. Esto indica que la pantalla evita el paso de aproximadamente el 75% de la

**En este estudio se han comparado siete combinaciones distintas de técnicas de ventilación y refrigeración de bajo coste, buscando la combinación más efectiva para la producción en invernadero**

radiación (el valor nominal de la pantalla era del 65% de sombreado).

### Conclusiones

Los ensayos realizados tienen una validez limitada para extrapolar las conclusiones, ya que se han realizado en un invernadero de pequeñas dimensiones y en la zona centro de la península. Con estos supuestos, las principales conclusiones que se extraen



son las siguientes:

- La combinación de ventilación lateral y cenital redujo la temperatura interior en 3 °C respecto a la ventilación sólo cenital (comparando las opciones 4 y 6). Este factor resultó el más importante en los ensayos; la ventilación sólo cenital parece insuficiente en las condiciones climáticas de la zona centro. El coste de instalación de ventana lateral está en torno a los 30 euros/m lineal (200 pts/m<sup>2</sup> - 1,20 euros/m<sup>2</sup>).

- La ventilación activa no consiguió compensar la ausencia de ventana lateral y su efecto no fue significativo. Sin embargo, la colocación de los ventiladores se podía haber mejorado, de forma que tomaran exclusivamente aire exterior. El coste de instalación de ventiladores, para 10 renovaciones/hora, puede estar en torno a las 150 pts/m<sup>2</sup> (0,90 euros/m<sup>2</sup>).

- La malla de sombreo redujo la temperatura interior en 2,5 °C, respecto al ensayo con sólo ventilación (comparando las op-

ciones 1 y 4). El coste de instalación de una pantalla de sombreo automatizada está en torno a las 800 pts/m<sup>2</sup> (4,80 euros/m<sup>2</sup>) pero la instalación de mallas de sombreo fijas tiene un coste sensiblemente inferior.

- La nebulización a baja presión redujo la temperatura interior en 1,5 °C, respecto al ensayo con sólo ventilación (comparando las opciones 1 y 2). El coste de instalación de la nebulización a baja presión puede estar en torno a las 150 pts/m<sup>2</sup> (0,90 euros/m<sup>2</sup>).

- La combinación de ventilación lateral y cenital, pantalla de sombreo y nebulización consiguió bajar la temperatura aún más (3,5 °C por debajo de la mencionada referencia), con un salto térmico negativo, y sin elevar la humedad relativa (opción 5). Parece una técnica prometedora, con un coste relativamente bajo, para reducir la temperatura interior sin mojar el cultivo, porque la pantalla puede recoger las gotas de agua que no se evaporen.

**En la foto de la izquierda, los sensores de humedad relativa se sitúan a unos 50 cm del suelo (aproximadamente la altura de las plantas). Al igual que con estos últimos, los sensores de temperatura exterior e interior están protegidos por jaulas de poliestireno, tal como muestran las imágenes.**

Todos los costes indicados son aproximados y referidos a un invernadero tipo de 5.000 m<sup>2</sup>. El presente trabajo ha sido realizado dentro de los siguientes proyectos de investigación:

- Proyecto MICYT AGL2000-1536-C02 de título «Algoritmos para el control integral del clima del invernadero orientados a una producción de calidad».

- Proyecto UPM 10508 (Ayuda I+D para grupos potencialmente competitivos) de título «Desarrollo de un controlador del clima de invernaderos con estrategias avanzadas».

Para saber más...

- jlgarcía@iru.etsia.upm.es

**- GREENHOUSE CLIMATE CONTROL**

Varios autores  
279 págs. 1995

Ref. 2011 108,18 Euros  
www.ediho.es/biblioteca