



/ 07

Documentos **Técnicos**

Avances en el estudio de la ventilación natural

Esteban José Baeza Romero

Juan Ignacio Montero

Jerónimo Pérez Parra

Bernard J. Bailey

Juan Carlos López

Juan Carlos Gázquez

Avances en el estudio de la ventilación natural

Documentos **Técnicos** [nº **07**]

Avances en el estudio de la ventilación natural

Esteban José Baeza Romero
Juan Ignacio Montero
Jerónimo Pérez Parra
Bernard J. Bailey
Juan Carlos López Hernández
Juan Carlos Gázquez Garrido

AVANCES EN EL ESTUDIO DE LA VENTILACIÓN NATURAL

© del texto: los autores

© de la edición: Cajamar Caja Rural

Redacción:

IFAPA

Esteban José Baeza Romero

Jerónimo Pérez Parra

IRTA

Juan Ignacio Montero

CAJAMAR CAJA RURAL

Juan Carlos López Hernández

Juan Carlos Gázquez Garrido

Edita: Cajamar Caja Rural

www.publicacionescajamar.es

publicaciones@cajamar.com

Diseño y maquetación: Beatriz Martínez Belmonte

Depósito Legal: AL-983-2010

Fecha de publicación: septiembre 2014

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta publicación, así como la edición de su contenido por medio de cualquier proceso reprográfico o fónico, electrónico o mecánico, especialmente imprenta, fotocopia, microfilm, offset o mimeógrafo, sin la previa autorización escrita de los titulares del Copyright.

Índice

1. Introducción	7
2. Ventilación natural	10
2.1. <i>Efectos de la temperatura y de la velocidad del viento</i>	10
2.2. <i>Tipos de ventanas</i>	13
2.3. <i>Características de la ventilación del invernadero tipo parral</i>	14
2.4. <i>Diseño de ventanas en invernadero tipo parral</i>	18
2.5. <i>Desarrollo de un método simple para determinar las necesidades de ventilación en función de las condiciones climáticas locales y las propiedades ópticas de la cubierta</i>	26
3. Exclusión de insectos en invernaderos mediante mallas en las ventanas	32
3.1. <i>Efecto de las mallas antiinsecto sobre la ventilación</i>	33
3.2. <i>Mallas foto-selectivas, efectos de color y otras modificaciones</i>	37
3.3. <i>Eliminar las mallas antiinsecto de las ventanas en los momentos de menor riesgo de invasión por parte de las plagas</i>	39
3.4. <i>Maximizar el área de malla</i>	39
3.5. <i>Otros factores que afectan la entrada de insectos en los invernaderos</i>	41
4. Tendencias en el diseño de sistemas de ventilación natural en invernadero	42
4.1. <i>Introducción</i>	42
4.2. <i>Sugerencias para mejorar la ventilación natural</i>	47
4.3. <i>Ventilación en invernaderos con obstáculos alrededor</i>	52
Referencias bibliográficas	55

1. Introducción

En el sureste peninsular todos los invernaderos de cultivo de hortalizas o plantas ornamentales empleados por los agricultores para su comercio en el mercados nacional y de exportación, necesitan ser refrigerados para prevenir que las temperaturas en su interior sean demasiado altas y provoquen daños a las plantas y pérdidas de calidad en los frutos. En la mayor parte de los invernaderos comerciales su refrigeración se consigue a través de la ventilación; mediante esta el aire caliente del interior del invernadero es intercambiado por aire más frío del exterior del mismo. Aunque la ventilación se emplea principalmente como método para disminuir la temperatura, tiene otros papeles de suma importancia. Uno de ellos, es el de prevenir que la humedad en el invernadero se mantenga en valores demasiados elevados. Estos valores elevados de humedad reducen la transpiración de las plantas, lo que puede afectar a la salud de las mismas y proporciona condiciones más idóneas para el desarrollo de enfermedades fúngicas. Prácticamente la totalidad del agua que se emplea en el riego del cultivo se convierte en vapor de agua gracias a la transpiración de las plantas y este exceso de humedad se debe evacuar del invernadero. El otro papel de la ventilación es proporcionar el CO_2 que las plantas necesitan para la fotosíntesis. En condiciones de plena iluminación, la actividad fotosintética de plantas bien desarrolladas puede reducir la concentración de CO_2 en el interior del invernadero por debajo de la concentración del aire exterior. Sin ventilación que nos proporcione un suministro continuo de CO_2 , la concentración en el interior del invernadero sería muy baja y se reduciría el crecimiento y desarrollo vegetativo.

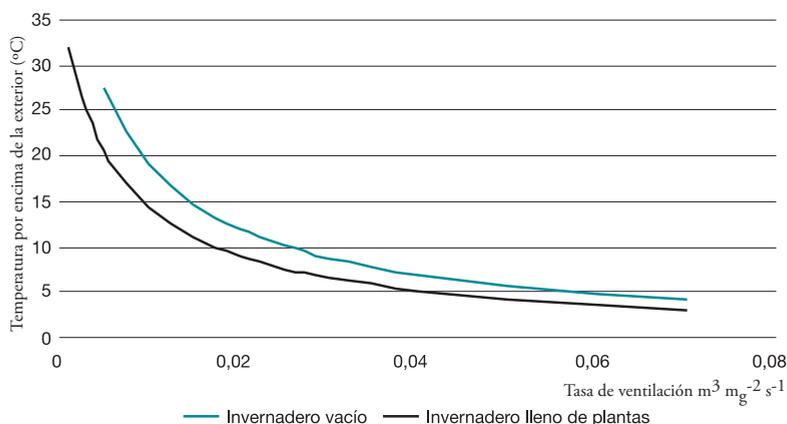
Por la noche, la ventilación natural puede evitar también situaciones no deseadas de inversión térmica. Asimismo, es fundamental ventilar tras realizar tratamientos fitosanitarios y además, en invernaderos que disponen de sistemas de combustión directa y sublimadores de azufre, hacerlo antes de que entren los trabajadores por la mañana para así evacuar gases potencialmente nocivos tanto para el cultivo (fitotóxicos) como para los jornaleros. Igualmente, una adecuada ventilación permite mantener condiciones más adecuadas de confort térmico para el capital humano que trabaja en el invernadero, lo que redundará en una mejor salud, calidad del trabajo y rendimiento en las labores de cultivo.

Los invernaderos pueden ser ventilados mediante dos formas:

- a) *Ventilación natural*: es la más común; emplea ventanas en el techo y en los laterales del invernadero que se abren cada vez que se necesita refrigerar. El intercambio de aire a través de estas aperturas se produce de forma natural por efecto del viento exterior y de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero.
- b) *Ventilación forzada*: emplea ventiladores colocados generalmente en un lateral del invernadero para extraer el aire caliente interior, el cual es reemplazado por aire exterior que penetra a través de las aperturas colocadas en el lateral opuesto.

Para que sean efectivos, los procesos de ventilación deben proporcionar un flujo de aire suficientemente grande para mantener una temperatura aceptable en el invernadero. Los diferentes ensayos realizados hasta la fecha han puesto de manifiesto que la temperatura del invernadero desciende a medida que aumenta la tasa de ventilación, pero no de forma lineal, tal y como se puede observar en el Gráfico 1. La reducción en la temperatura se hace progresivamente más pequeña a medida que crece la tasa de ventilación. Es importante tener presente que la ventilación no puede reducir la temperatura en el invernadero por debajo de la temperatura exterior.

Gráfico 1. Gradiente término (temperatura interior - temperatura exterior) en función del caudal del aire



En la ventilación natural, la tasa de ventilación depende, en gran medida, de la superficie de las ventanas. Por tanto, incrementar su área significa aumentar el flujo de aire. La experiencia práctica obtenida de refrigerar de forma natural los invernaderos comerciales nos indica que, para tener

una ventilación adecuada, el área total de ventanas debe suponer entre un 15 y un 25 % del área de suelo cubierta por el invernadero (sin considerar el efecto de la malla antiinsecto).

Como ya se ha indicado, la temperatura del aire en el invernadero desciende a medida que aumenta la tasa de ventilación. Así mismo, la temperatura en un invernadero con plantas desarrolladas es inferior a la de otro sin plantas (Gráfico 1).

Los sistemas de ventilación forzada (mecánica) se diseñan generalmente para proporcionar un caudal de aire de $0,04 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ de área de suelo cubierta por el invernadero. En la práctica se ha constatado que los beneficios que se obtienen por tener tasas de ventilación mayores son pequeños en comparación con el coste de electricidad que se deriva de emplear un mayor número de ventiladores.

El funcionamiento de un sistema de ventilación se rige normalmente por las temperaturas que se obtienen en el interior del invernadero. En la práctica, la temperatura en el interior de un invernadero que está lleno de plantas será más baja que la de uno en la que haya un menor número de estas o que las mismas estén en sus primeras fases del desarrollo (Gráfico 1). Esto ocurre porque las plantas absorben la radiación solar y parte de la energía absorbida se emplea para evaporar agua desde las hojas en los procesos de transpiración. Consecuentemente, en un invernadero con plantas desarrolladas, la transpiración consume una gran parte de la radiación solar absorbida, quedando menos de esta energía disponible para incrementar la temperatura del aire. Cuando el invernadero tiene plantas poco desarrolladas (plántulas), la transpiración total es baja y la mayor parte de la energía solar que penetra en el invernadero es transferida al aire aumentando su temperatura a valores mayores.

El objetivo de este documento es proveer de información práctica sobre la ventilación en el invernadero tipo parral que permitirá:

1. Asesorar sobre el funcionamiento de los sistemas de ventilación existentes.
2. Realizar mejoras en los sistemas de ventilación existentes.
3. Diseñar sistemas de ventilación para invernaderos de nueva construcción.
4. Diseñar sistemas de ventilación efectivos con presencia de mallas antiinsectos en las ventanas.

El presente cuaderno técnico contiene secciones que describen la ventilación natural y la exclusión de insectos. Las recomendaciones están basadas en la información obtenida a partir de los recientes estudios de ventilación natural en invernaderos tipo parral y en una revisión de la efectividad de las mallas antiinsecto, ambos trabajos llevados a cabo en la Estación Experimental de Cajamar Caja Rural ‘Las Palmerillas’.

2. Ventilación natural

La ventilación natural se emplea en la mayoría de los invernaderos para limitar la temperatura interior. En este proceso, el aire caliente del invernadero fluye hacia fuera a través de las aperturas de ventilación en el techo y en los laterales del invernadero y es reemplazado por aire más frío del exterior. Este flujo de aire es creado por el viento y por la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero.

2.1. Efectos de la temperatura y de la velocidad del viento

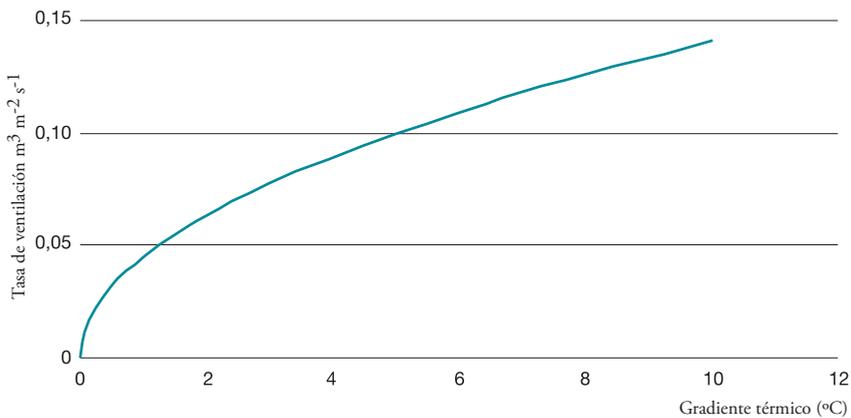
Temperatura

En ausencia de otros sistemas de refrigeración, cuando la radiación es alta, la temperatura dentro del invernadero es normalmente más elevada que en el exterior y la apertura de las ventanas provoca el intercambio de aire. El aire más caliente del interior es menos denso que el del exterior, que es más frío y, por tanto, tiende a ascender. Esto provoca un intercambio de aire a través de las ventanas abiertas; el aire caliente abandona el invernadero por la parte alta de la ventana y el aire frío entra por la parte inferior de la misma. En ausencia total de viento ($v = 0 \text{ m s}^{-1}$), la tasa de intercambio de aire depende exclusivamente de la diferencia de temperatura (salto térmico) entre el aire interior y el exterior. Sin embargo, esta relación no es lineal (p. ej. la tasa de intercambio de aire no se dobla si el salto térmico se hace el doble); la tasa de intercambio de aire por metro cuadrado de ventana depende de la raíz cuadrada del salto térmico (Ecuación [1]), tal y como se observa en el Gráfico 2.

$$G = C_a/2 \times \sqrt{\frac{g \times h \times \Delta T}{T_{promedio}}} \quad [1]$$

Donde G ($\text{m}^3 \text{m}_v^{-2} \text{s}^{-1}$) es la tasa de ventilación por unidad de superficie de ventana, C_d (adimensional) es el coeficiente de descarga de la ventana ($0 < C_d < 1$), g es la aceleración gravitacional, h es la distancia vertical entre el eje central de la ventana lateral y la cenital, ΔT es la diferencia de temperatura entre el interior del invernadero y el exterior y $T_{promedio}$ es la temperatura promedio entre la interior y la exterior del invernadero.

Gráfico 2. Tasa de ventilación por superficie media de ventana en función del gradiente térmico del invernadero (temperatura interior - temperatura exterior)



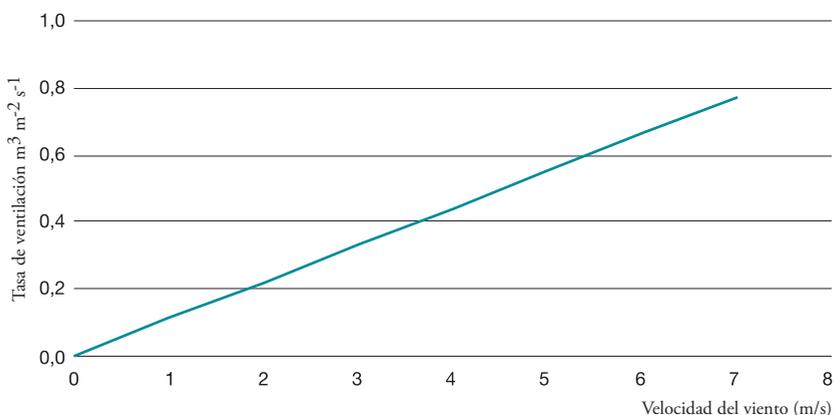
Velocidad del viento

El viento también puede ser responsable de la ventilación al crear una distribución de presiones (campo de presiones) sobre la superficie del invernadero. Dicho campo de presiones crea un flujo de salida a través de las ventanas en las regiones de presión elevada y un flujo de entrada en las zonas de presión baja. La tasa de ventilación (por unidad de superficie de ventana) que se produce en un periodo de tiempo determinado es exclusivamente proporcional a la velocidad media del viento (Ecuación [2]), siempre que la velocidad sea mayor de aproximadamente 3 m s^{-1} , tal y como se muestra en el Gráfico 3. Sin embargo, la velocidad del viento no es constante en el tiempo, sino que fluctúa. Estas fluctuaciones en la velocidad del viento dan lugar a cambios en las diferencias de presión entre ventanas e incluso en una misma. Como consecuencia de ello, existen fluctuaciones de forma que el aire entra y sale alternativamente en una misma ventana o partes de la misma.

$$G = 0,5 \times v \times C_d \times \sqrt{C_w} \quad [2]$$

Donde G ($m^3 m_v^{-2} s^{-1}$) es la tasa de ventilación por unidad de superficie de ventana, v la velocidad del viento exterior ($m s^{-1}$), C_d (adimensional) es el coeficiente de descarga de la ventana ($0 < C_d < 1$) y C_w (adimensional) es el coeficiente eólico global de viento, característico de cada estructura de invernadero y que engloba los efectos del diseño de la geometría de la estructura y sus ventanas. Los valores de C_w para distintos tipos de estructuras se encuentran tabulados en Pérez-Parra (2004).

Gráfico 3. Tasa de ventilación en función de la velocidad del viento



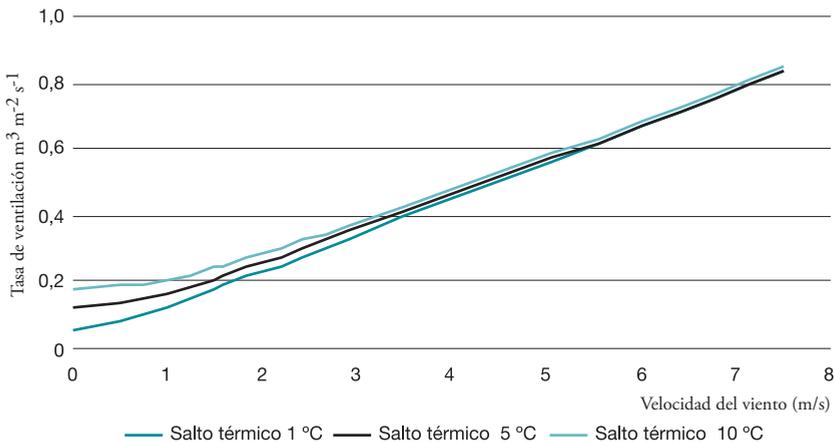
** Influencia de la velocidad del viento sobre la ventilación: la tasa de ventilación es directamente proporcional a la velocidad del viento.*

El efecto combinado de la velocidad del viento y la temperatura

Como hemos visto anteriormente, en la práctica, tanto la velocidad del viento como el salto térmico contribuyen al intercambio de aire que se produce en los invernaderos ventilados (Ecuación [3]). El análisis teórico de la ventilación, a la que están contribuyendo tanto la velocidad del viento como la diferencia de temperatura, muestra que la influencia de la temperatura tiene un peso específico importante para velocidades de viento bajas en invernaderos que solo cuentan con ventanas cenitales (ver Gráfico 4). El salto térmico se

hace más importante como motor de la ventilación cuando el invernadero cuenta tanto con ventanas laterales como con ventanas cenitales, siempre y cuando la distancia entre las laterales no sea muy grande (< 50 metros).

Gráfico 4. Flujo de ventilación por unidad de hueco de ventana cenital cuando la ventilación está provocada tanto por el salto térmico como por el viento



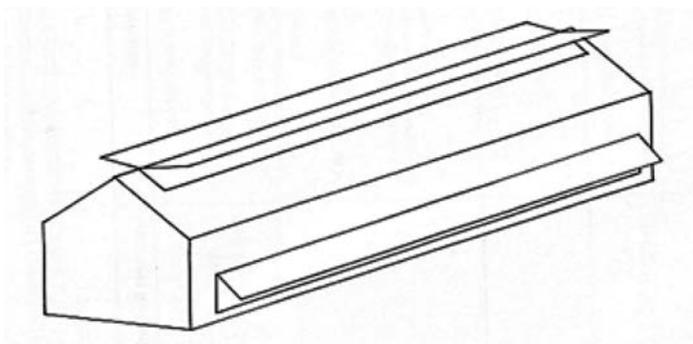
* La influencia del salto térmico solo es aparente a bajas velocidades de viento.

2.2. Tipos de ventanas

El tipo más común de ventanas cenitales y laterales son las aperturas continuas que se extienden prácticamente a todo lo largo del invernadero. Una excepción es el invernadero tipo *venlo*; este suele presentar ventanas cenitales discontinuas posicionadas de forma alterna a ambos lados de la cumbrera de cada capilla; configuración necesaria por el diseño de la cubierta empleada. Hay básicamente dos tipos de ventanas:

- El hueco se cubre con un alerón fijado a la estructura del invernadero a lo largo de su parte superior, y la ventana se abre moviendo el eje inferior de forma que el alerón rote gracias a las bisagras, tal y como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Ventanas de alerón continuas en el techo y en los laterales de un invernadero de una sola capilla



- b) El hueco se cubre con una lámina de plástico fijada a la estructura del invernadero por su eje superior, mientras que el eje inferior está fijado a un tubo metálico horizontal, de forma que al hacer girar esta tubería, se enrolla en ella el plástico y se abre la ventana, tal y como se observa en la Figura 2. Se han desarrollado muchas variantes prácticas de las ventanas enrollables. La ventana se abre enrollando el plástico a lo largo de un tubo de acero horizontal operado manualmente o mediante un motor eléctrico. El peso del tubo mantiene el plástico bajo tensión y el movimiento lateral de dicho tubo se evita mediante un marco metálico, tiras o correas plásticas.

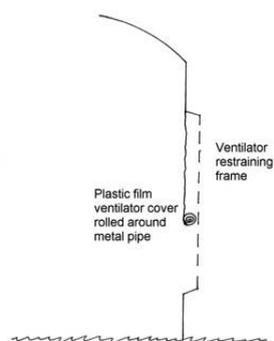


Figura 2. Ventana lateral de un invernadero de cubierta plástica

2.3. Características de la ventilación del invernadero tipo parral

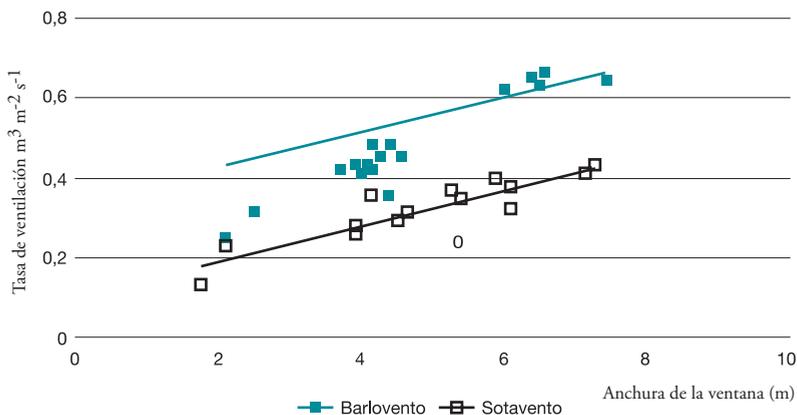
En la Estación Experimental de Cajamar Caja Rural 'Las Palmerillas' se llevó a cabo un estudio sistemático de la ventilación natural del invernadero tipo parral, consiguiéndose identificar importantes características de la ventilación. El estudio, en su primera fase, fue llevado a cabo en un invernadero tipo parral de cinco capillas con unas dimensiones de 38 m por 23,2 m que cubría un área de 880 m². En principio, se estudiaron dos tipos de ventanas

en ensayos diferentes. En el primer caso (ventanas cenitales enrollables) la ventana se abría enrollando la cubierta plástica con un tubo metálico. En el segundo caso (ventanas cenitales abatibles) la ventana se abría elevando el borde inferior de un alerón que estaba conectado a la cumbrera del invernadero. Las ventanas estaban situadas en la vertiente oeste de las capillas. El área total de las ventanas enrollables y abatibles era de 92 y 30 m² respectivamente. El invernadero contaba también con dos ventanas laterales de tipo enrollable en las bandas norte y sur, con un área total de 98 m².

Ventilación cenital

La dirección del viento tiene una fuerte influencia sobre la ventilación cuando el invernadero parral presenta ventanas cenitales abatibles. La tasa de ventilación es mayor cuando el viento sopla hacia la ventana abierta (barlovento) que cuando sopla en la dirección opuesta (sotavento), tal y como se muestra en el Gráfico 5.

Gráfico 5. Tasa de ventilación en función de la velocidad del viento en invernaderos tipo parral con ventanas abatibles

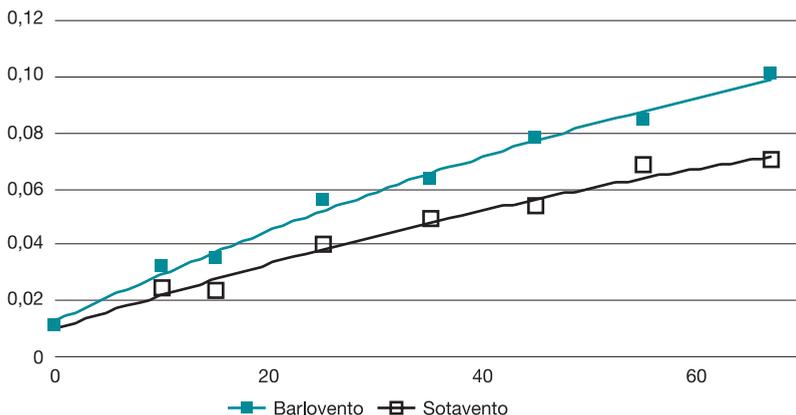


* Cuando las ventanas cenitales son de tipo abatible, se obtienen mayores tasas de ventilación con viento a barlovento que a sotavento para ventanas de igual tamaño.

La tasa de ventilación crece a medida que se van abriendo las ventanas abatibles pero de forma no lineal con el ángulo de apertura, como se puede observar en el Gráfico 6. La tasa de ventilación es siempre más alta para la ventilación de barlovento.

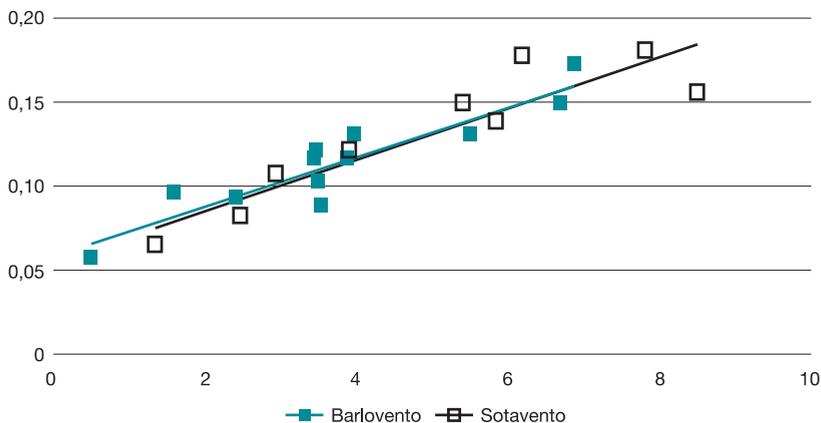
El invernadero parral de raspa y amagado presenta normalmente ángulos muy pequeños de inclinación en las capillas, en este caso, y si el invernadero presenta ventanas cenitales de tipo enrollable, la dirección del viento no ejerce influencia sobre el valor de la tasa de ventilación (Gráfico 7).

Gráfico 6. Tasa de ventilación ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$) en función del ángulo de apertura ($^\circ$) de la ventana



** Con ventanas abatibles la tasa de ventilación no crece linealmente a medida que se abre el alerón.*

Gráfico 7. Tasa de ventilación ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$) en función de la velocidad del viento (m/s) en invernaderos tipo parral con ventanas enrollables



** La dirección del viento no tiene ninguna influencia sobre la tasa de ventilación en invernaderos de raspa y amagado con ventanas cenitales enrollables.*

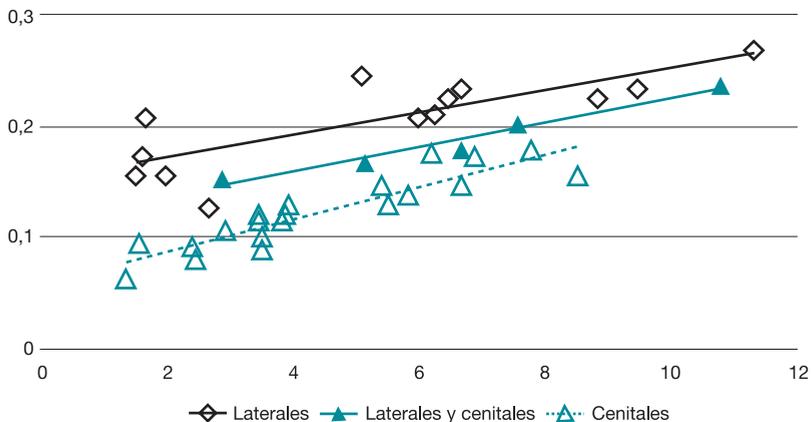
La comparación de los Gráficos 5 y 7 muestra también claramente que las ventanas cenitales abatibles son mucho más efectivas que las enrollables, dando tasas de ventilación netamente superiores.

Ventilación cenital (enrollables), ventilación lateral (enrollables) y combinación de ambas (enrollables)

El Gráfico 8 muestra las tasas de ventilación obtenidas con ventanas cenitales, ventanas laterales y con la combinación de ambas. En un invernadero de 880 m², con todas las ventanas enrollables y comparado en base a igual área de ventana, los resultados obtenidos fueron que la ventilación más efectiva era la lateral, seguida de la combinada, quedando en último lugar la cenital.

Sin embargo, aunque la ventilación lateral es más eficiente en invernaderos relativamente pequeños, tal y como se mostrará más tarde, solamente proporciona tasas de ventilación aceptables en invernaderos de anchura limitada (que no haya mucha distancia entre ventanas laterales de lados opuestos).

Gráfico 8. Tasa de ventilación (m³ s⁻¹ m⁻²) en un invernadero tipo parral con ventanas en el techo y en los laterales



2.4. Diseño de ventanas en invernadero tipo parral

El intercambio de aire proporcionado por la ventilación natural depende del tipo, ubicación y área de las ventanas. Dado que estas forman parte de la estructura del invernadero, el tipo de ventana y su ubicación vienen generalmente determinados por el diseño y no es fácil ni barato cambiar el área de una ventana una vez que el invernadero ha sido construido. El área de las ventanas se suele expresar habitualmente como porcentaje del suelo cubierto por el invernadero. La experiencia práctica ha demostrado que una ventilación satisfactoria para un invernadero con plantas desarrolladas se obtiene generalmente cuando el área de ventanas supone entre un 15 y un 25 % del total del invernadero.

Estudios recientes de ventilación forzada, realizados en diferentes países, han establecido que un valor muy adecuado de tasa de ventilación a efectos de diseño es el de $0,04 \text{ m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-2}$ de invernadero. En un invernadero completamente cubierto por un cultivo de plantas bien regadas dicha tasa debería proporcionar una temperatura interna de unos 2-3 °C por encima de la temperatura exterior.

El trabajo de investigación sobre la ventilación natural, descrito en la sección anterior, permitió la creación de modelos matemáticos que relacionan la tasa de ventilación con el área de ventanas, con la velocidad del viento y con el salto térmico. En este apartado se han empleado estos modelos para permitir:

- I. Estimar el funcionamiento de los sistemas de ventilación existentes en los invernaderos tipo parral.
- II. Determinar el tamaño de ventanas necesario para que proporcionen una ventilación adecuada en invernaderos tipo parral de cualquier tamaño.

Se presenta información para los siguientes casos:

- 1) Ventilación solo cenital.
- 2) Ventilación solo lateral.
- 3) Ventilación combinada (cenital y lateral).

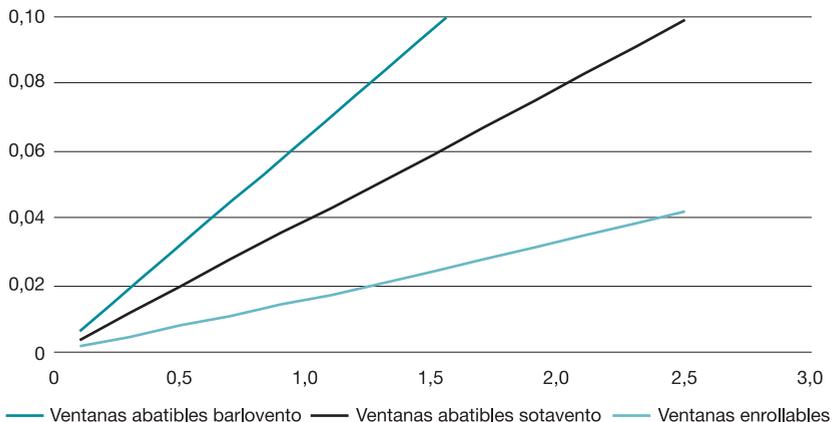
Los modelos han sido empleados para calcular la tasa de ventilación de invernaderos bajo condiciones de diseño de un viento exterior de 4 m s^{-1} y que la temperatura del invernadero esté $3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura exterior. Debe destacarse que si en la práctica el viento y el salto térmico están por debajo o por encima de estos valores de diseño, la tasa de ventilación será respectivamente más baja o más alta, que los valores aquí calculados.

Por tanto, cuando se emplee la información presentada en este cuaderno técnico para determinar el tamaño de las ventanas de un invernadero se recomienda que, a no ser que haya otros requerimientos más específicos, la tasa de ventilación de diseño sea de $0,04 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ de invernadero.

Ventilación cenital

Las tasas de ventilación obtenidas en invernadero tipo parral con ventanas cenitales en un lado de cada capilla se proporcionan en el Gráfico 9. El tamaño que ha de tener la ventana para obtener una determinada tasa de ventilación, tanto para ventanas enrollables como abatibles, que van de un extremo al otro en el ancho del invernadero (de lateral a lateral) pueden interpolarse fácilmente en el gráfico.

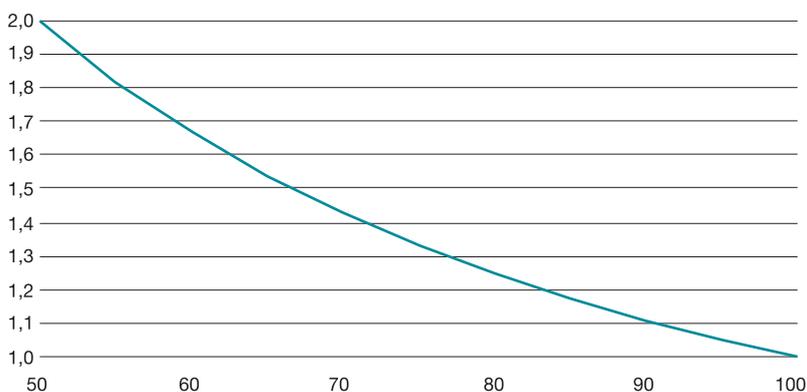
Gráfico 9. Tasa de ventilación por unidad de superficie de suelo. Ventilación proporcionada por ventanas cenitales abatibles y enrollables en un invernadero tipo parral multicapilla simétrico (raspa y amagado)



La tasa de ventilación obtenida con ventanas cenitales enrollables en un invernadero con una pendiente de 12° no se ve afectada por la dirección del viento, sin embargo, sí se ve afectada en el caso de ventanas abatibles. Como la dirección del viento cambia es necesario utilizar el funcionamiento del menos efectivo de las condiciones en ventana abatible, en este caso el de sotavento, como base para diseñar las ventanas, pues así aseguraremos una ventilación adecuada sea cual sea la dirección del viento.

En los invernaderos parral multicapilla (raspa y amagado) las ventanas no se extienden completamente por todo el ancho del invernadero, de lateral a lateral, por lo que la tasa de ventilación por unidad de superficie de invernadero será inferior a la reflejada en el Gráfico 9. Para saber la anchura que deben tener las ventanas cenitales, el valor obtenido en el Gráfico 9, por interpolación, debe ser multiplicado por un factor que se obtiene a partir del Gráfico 10; esta operación permite conocer la anchura de la ventana requerida para obtener una determinada tasa de ventilación en un invernadero cuyas ventanas cenitales no se extienden de lado a lado, que es lo habitual.

Gráfico 10. Factor de multiplicación de la anchura de la ventana en función de la relación de longitud de ventana y ancho del invernadero. En porcentaje

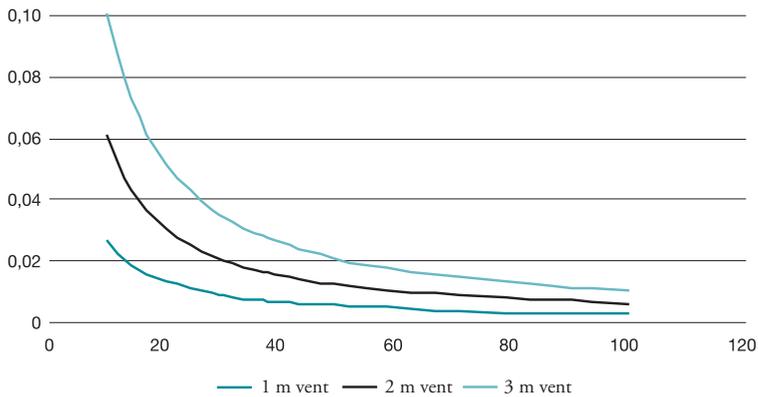


Ventilación lateral

Las ventanas laterales proporcionan una forma muy efectiva de ventilar los invernaderos que son estrechos pero no así en los más anchos. Esto se debe a que a medida que el aire fresco que entra por la ventana lateral se mueve por el invernadero, absorbe el calor y vapor de agua, volviéndose así más húmedo y caliente y, por tanto, menos efectivo. En consecuencia, el efecto refrigerador de las ventanas laterales se restringe a las regiones próximas a los laterales del invernadero. Hay un límite a la hora de incrementar el flujo de aire haciendo las ventanas laterales más grandes, dado que el área de estas está acotado por la altura del lateral y en la práctica no suele ocuparlo todo.

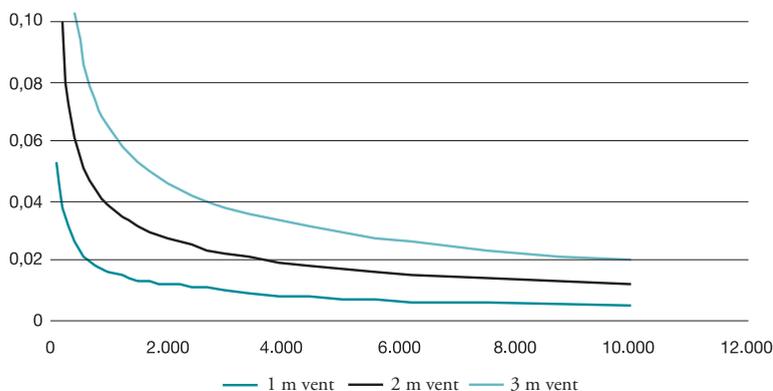
La máxima anchura para que un invernadero esté ventilado eficientemente con ventanas en dos de los laterales se muestra en el Gráfico 11.

Gráfico 11. Tasa de ventilación por unidad de superficie de suelo en relación a la anchura del invernadero. Máxima anchura del invernadero para que pueda ser ventilado eficientemente con ventanas en dos laterales del invernadero. En metros



El área que puede ser ventilada cuando existen ventanas en los cuatro laterales del invernadero se muestra en el Gráfico 12.

Gráfico 12. Áreas de invernadero que pueden ser ventiladas con ventanas en los cuatro laterales. En m²

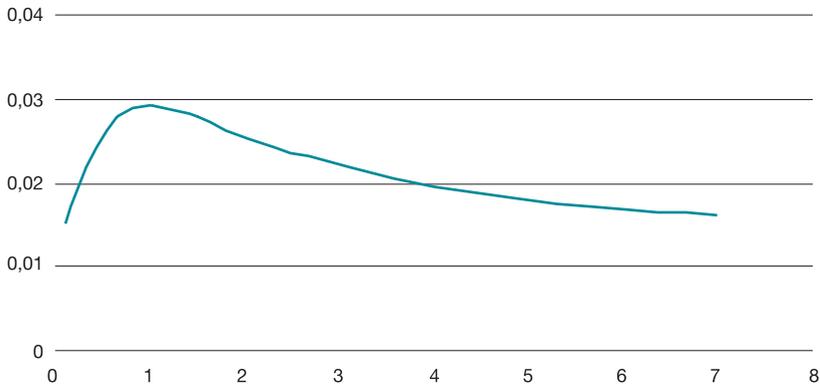


La anchura máxima que debe tener el invernadero cuando este dispone de ventanas en dos de los laterales, no debería sobrepasar los 30 m. El invernadero más grande que puede ser ventilado de forma eficiente cuando dispone de ventanas en los cuatro laterales es de tan solo 1.500 m², si las ventanas tienen una altura de 2 m y, de 4.000 m², si miden 3 m de altura.

Ventilación lateral (enrollables) y cenital (abatibles) combinada

La ventilación más eficiente se consigue cuando se disponen ventanas tanto cenitales como laterales, especialmente si la superficie del invernadero es pequeña. El Gráfico 13 muestra como la relación entre superficie de ventanas laterales y cenitales influye sobre los valores de tasa de ventilación (notar que el área total de ventilación es constante). Es evidente que la mayor ventilación tiene lugar cuando el área de ventanas cenitales es igual al de las laterales (Kittas *et al.*, 1997).

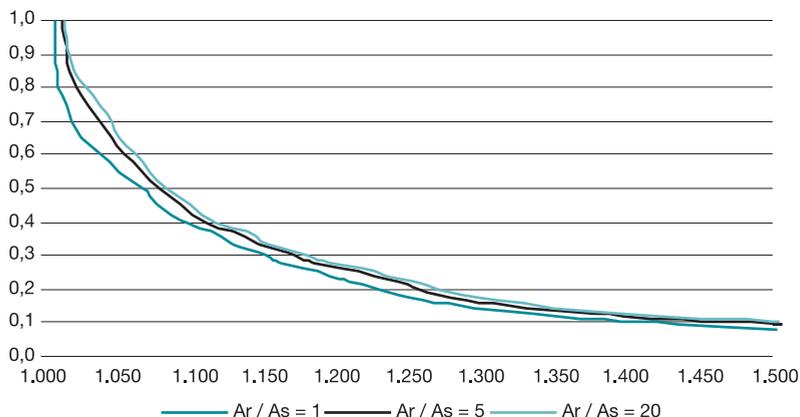
Gráfico 13. Influencia de la relación entre área de ventanas laterales y cenitales sobre la tasa de ventilación



Por lo tanto, al diseñar los sistemas de ventilación de invernaderos que cubran superficies relativamente pequeñas (menos de 1 ha), el objetivo debe ser aproximar lo máximo posible el área de ventanas laterales y el de cenitales.

Sin embargo, a medida que el tamaño del invernadero se hace mayor, no es posible conseguir dicho objetivo. El área total de ventanas cenitales se incrementa y las ventanas laterales contribuyen cada vez menos a la superficie total de ventilación. El Gráfico 14 muestra como la relación de superficie de ventanas cenitales a superficie de ventanas laterales influye sobre la eficiencia de la ventilación. Cuando esta relación es mayor de 10, el beneficio adicional que se consigue al disponer de ventanas en los laterales es muy pequeño.

Gráfico 14. Área total de ventilación necesaria para mantener 26 °C en un invernadero en Almería con el clima del 2007 con diferentes relaciones entre área de ventanas cenitales (Ar) y laterales (As). En horas



Por tanto, las ventanas cenitales son muy importantes, especialmente en invernaderos de gran tamaño, ya que proporcionan una ventilación muy uniforme en su interior. En contraste, tal y como se ha descrito anteriormente, la influencia de las ventanas laterales se limita a las regiones más próximas a las mismas (entre 20 y 40 m, si las líneas de cultivo son perpendiculares a las laterales, o con cultivo pequeño, independientemente de su orientación respecto a las ventanas).

Dado que en invernaderos tipo parral, las ventanas cenitales no se suelen extender completamente de lado a lado, las ventanas laterales son muy útiles proporcionando una buena ventilación en esas áreas no cubiertas por las cenitales, muy importante sobre todo en el lado sur del invernadero. Los Gráficos 15, 16 y 17 proporcionan las áreas del invernadero que pueden ser ventiladas con ventanas cenitales enrollables y ventanas en dos de los laterales, para tres tamaños diferentes de ventana lateral y tres tamaños diferentes de ventana cenital.

Gráfico 15. Ventilación combinada con ventanas de 1 m de altura en dos de los laterales del invernadero. En m²

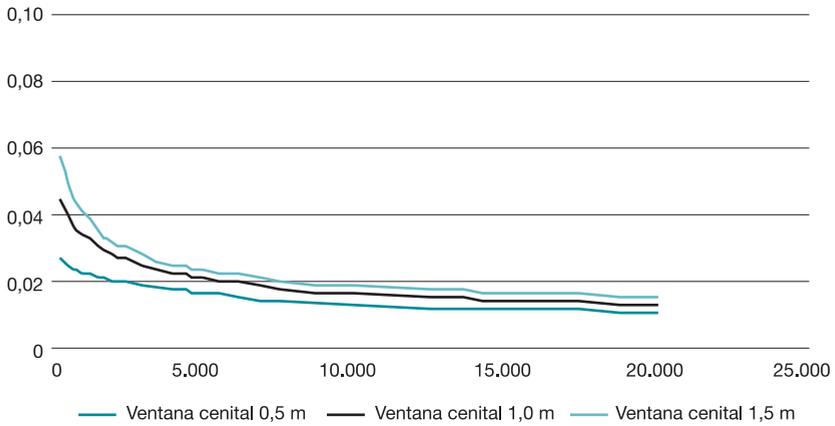


Gráfico 16. Ventilación combinada con ventanas de 2 m de altura en dos de los laterales del invernadero. En m²

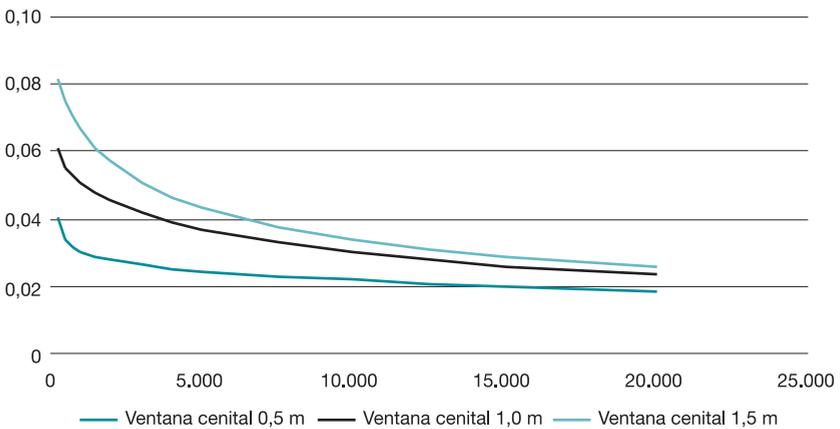
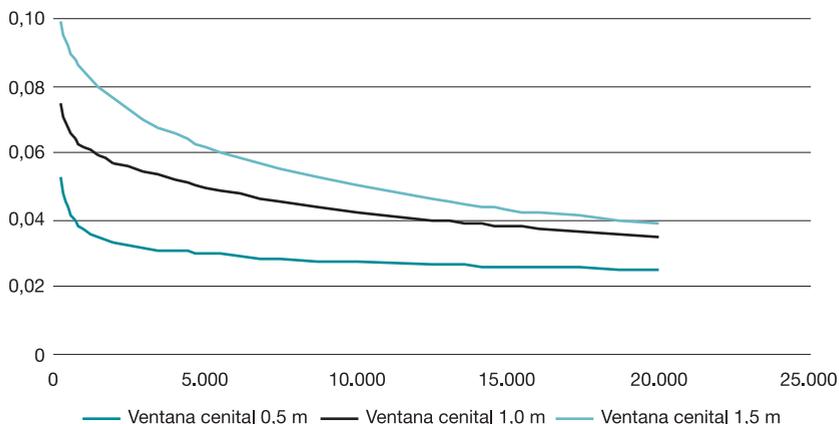


Gráfico 17. Ventilación combinada con ventanas de 3 m de altura en dos de los laterales del invernadero. En m²



2.5. Desarrollo de un método simple para determinar las necesidades de ventilación en función de las condiciones climáticas locales y las propiedades ópticas de la cubierta

Los modelos basados en balances de energía son muy útiles para realizar estimaciones relacionadas con las necesidades de ventilación de un invernadero, si se disponen de datos climáticos locales. Así, se puede contestar a preguntas recurrentes por parte de técnicos y agricultores relacionadas con la ventilación natural: (i) ¿Qué superficie de ventanas se necesita en relación al clima local y a la temperatura máxima deseable en el interior del invernadero? (ii) ¿Qué beneficio se obtiene con la reducción de horas de ventilación al usar un cierto nivel de sombreado? (iii) ¿Durante qué meses se pueden mantener temperaturas aceptables?

Se ha empleado un modelo de balance de energía alimentado con datos climáticos locales para conocer el flujo de aire necesario para mantener el invernadero a unas temperaturas determinadas. Los modelos de ventilación que relacionan el flujo de aire que se genera a través de las ventanas del invernadero con las temperaturas interior y exterior, y la velocidad del viento con la geometría de las ventanas, han sido posteriormente empleados para determinar el área de ventanas necesaria para proporcionar el flujo de aire necesario. También se ha incluido el efecto de aplicar un cierto sombreado al invernadero en los meses de mayor radiación para reducir las

necesidades de ventilación, aumentando su eficiencia. Los datos del análisis se presentan en una tabla en la que la relación entre el área de ventanas por área cubierta de invernadero se puede obtener, para cada mes del año, el número de horas que el invernadero permanece por encima de una temperatura preestablecida como consigna de ventilación.

Necesidades de ventilación

El modelo de balance de energía empleado (HortiAlmería) está basado en los modelos HortiCern y HortiTrans descritos por Jolliet *et al.* (1991) y Jolliet (1994) respectivamente, y se ejecuta en una hoja de cálculo. El balance de energía del invernadero se expresa como:

$$Q_{\text{solar}} + Q_{\text{conducción}} + Q_{\text{suelo}} + Q_{\text{ventilación}} = 0 \quad [3]$$

Donde Q_{solar} es la energía solar transmitida al interior del invernadero, $Q_{\text{conducción}}$ el calor conducido a través de la cubierta del invernadero, Q_{suelo} el calor transferido hacia/desde el suelo y $Q_{\text{ventilación}}$ la energía evacuada por la ventilación. Q_{solar} se calcula usando la radiación global exterior, un valor de transmisividad para la radiación solar que depende del material de cubierta del invernadero empleado y una parte que se sustrae debido a la energía solar absorbida por la cubierta. $Q_{\text{conducción}}$ se calcula a partir de los intercambios de energía entre la cubierta y el cielo, entre la cubierta y el aire exterior y entre la cubierta y el aire interior. Q_{suelo} se obtiene de los datos registrados en la Estación Experimental de Cajamar Caja Rural ‘Las Palmerillas’ en invernaderos sin cultivo. $Q_{\text{ventilación}}$ se obtiene a partir de los balances de energía y vapor de agua del aire ventilado:

$$Q_{\text{ventilación}} = Q_{\text{calor sensible}} + Q_{\text{calor latente}} \text{ y } Q_{\text{transpiración}} = Q_{\text{calor latente}} + Q_{\text{condensación}} \quad [4]$$

Donde $Q_{\text{calor sensible}}$ y $Q_{\text{calor latente}}$ son los calores sensible y latente transferidos por el flujo de aire de la ventilación respectivamente, $Q_{\text{transpiración}}$ es la energía contenida en el vapor de agua transpirado por las plantas del invernadero y $Q_{\text{condensación}}$ la energía transferida a la cubierta del invernadero mediante la condensación de agua en su cara interna. La transpiración se calculó usando un modelo desarrollado en la Estación Experimental de Cajamar Caja Rural ‘Las Palmerillas’ para un cultivo de tomate. La condensación ha sido estimada usando el método desarrollado por Jolliet (1994),

en el cual la temperatura de la cubierta se calcula asumiendo que el aire interior está saturado y se aplica entonces una corrección basada en la presión de vapor interior actual. La condensación ocurre cuando la presión de vapor interior excede a la saturada en la cubierta. Si la temperatura exterior es superior a la temperatura de ventilación, la temperatura del invernadero se calcula usando un valor máximo para el coeficiente de transferencia de calor por ventilación de $100 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (equivalente a una tasa de ventilación de $0,82 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). El efecto del sombreado se incluye cambiando la transmisión a la radiación solar de la cubierta del invernadero. El modelo se usa con datos de clima horarios de temperatura del aire, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento para calcular valores horarios de temperatura del invernadero y de flujo de ventilación necesario para mantener el invernadero a la temperatura de consigna deseada. Las tasas de ventilación se expresan por m^2 de área de invernadero.

Modelos de ventilación

En la literatura científica se pueden encontrar numerosos modelos capaces de predecir el flujo de aire que se intercambia a través de diferentes diseños de ventanas, posición de las mismas en el invernadero y tipos y tamaños de invernaderos. Algunos incluyen el efecto de la diferencia de temperatura y de la velocidad del viento en la generación del flujo de ventilación, otros solo incluyen el efecto eólico. Se han generado modelos para ventanas con alerón y enrollables para invernaderos de capilla curva (p. ej. tipo multitúnel) y para invernadero con capillas rectas, así como para las ventanas laterales. Se han empleado tres modelos diferentes para el presente sistema de ayuda a las decisiones. Entre los tres contemplan ventanas abatibles en techo y laterales, invernaderos curvos y rectos, y el uso combinado de efecto térmico y eólico y solamente eólico.

El modelo de Boulard y Baille (1995) se desarrolló para un invernadero de cubierta plástica de dos capillas (416 m^2), con ventanas cenitales continuas en uno de los lados de cada capilla curva. Tiene en cuenta tanto el efecto térmico como el eólico en la predicción del flujo de ventilación. La dirección principal del viento fue paralela a los laterales mayores del invernadero.

Kittas *et al.* (1997) generaron un modelo (también tenía en cuenta efecto térmico y eólico) para el mismo invernadero que incluía también el flujo de aire a través de dos ventanas abatibles laterales de 32 m de longitud (además de las cenitales).

El modelo de Bailey *et al.* (2004) se obtuvo usando un modelo de un *venlo* a escala 1/3 con ventanas discontinuas espaciadas de forma alterna a ambos lados de cada capilla, validado para superficies de 200, 5.200 y 37.800 m². No se incluyen las ventanas laterales y solamente tiene en cuenta el efecto eólico para estimar el flujo de aire.

Las tasas de ventilación predichas por cada modelo se expresan por m² de superficie de ventana.

El modelo de balance de energía y vapor de agua HortiAlmería ha sido empleado para obtener las necesidades globales de ventilación a lo largo del año climático 2007, cuyos datos a intervalos horarios han sido obtenidos de la estación meteorológica de la Estación Experimental de Cajamar Caja Rural 'Las Palmerillas'. El valor horario que se obtiene se expresa en caudal de ventilación por unidad de superficie de invernadero ($\text{m}^3 \text{m}_s^{-2} \text{s}^{-1}$), valores que divididos por la tasa de ventilación proporcionada, para esa misma temperatura y velocidad de viento y, expresados como caudal de ventilación por unidad de superficie de ventana ($\text{m}^3 \text{m}_v^{-2} \text{s}^{-1}$), dan como resultado el área de ventana necesaria por unidad de superficie de invernadero cubierta ($\text{m}_v^2 \text{m}_s^{-2}$), ofreciendo el flujo de ventilación necesario para mantener la temperatura por debajo de la consigna en esa hora. La transmisividad de la cubierta del invernadero para la radiación solar se tomó como un 90 % para el vidrio o para un PE estándar. Esto resultó en una transmisividad global para el invernadero del 65 %. Al considerar el uso de blanqueo aplicado a la cubierta, se consideró una transmisividad del 28 %, dando una global al invernadero de 25 %.

El Gráfico 18 muestra como el número total de horas en un año en las que la temperatura del invernadero sobrepasa la temperatura de ventilación (en este caso 26 °C) se reduce a medida que el área total de ventanas se incrementa. Hay una buena concordancia entre los resultados de los diferentes modelos de ventilación, así que se usará el valor promedio de los tres modelos.

La Tabla 1 es un ejemplo de las salidas que pueden generarse con el método presentado. Para la temperatura de ventilación de consigna especificada, ubicación, sombreado y relación de área de ventanas/área cubierta entre 0 y 1, se muestra el número de horas en las que la temperatura, durante cada mes, excede la temperatura consigna de ventilación. El número de horas en que la temperatura exterior excede la temperatura de ventilación durante cada mes se muestra en la parte superior de la Tabla 1. La columna final proporciona el número de horas anuales en que la temperatura del invernadero excede la temperatura de ventilación para cada relación de área

de ventanas. Se pueden obtener tablas similares para diferentes condiciones de temperatura de consigna, nivel de sombreado, año climático, etc. Los resultados muestran que a partir de mayo y hasta septiembre los valores recomendados en la literatura, de un 25 % de área de ventilación (sin contar el efecto de las mallas), no garantizan estar siempre por debajo de los 26 °C de la consigna, y obligaría por tanto a la combinación con blanqueo (y/o refrigeración evaporativa) lo que permitiría que en los meses de mayo a septiembre no se alcanzase un número elevado de horas en que el invernadero tuviera una temperatura muy por encima de la temperatura óptima usada como consigna. Se ganaría mucho pasando de los valores actuales del 10 % a valores en torno al 25 % pero, a partir de este valor, por más que crece el área de ventanas, no se reduce mucho el número de horas que no se alcanza la temperatura de consigna.

Gráfico 18. Áreas de ventilación necesarias para mantener 26 °C en un invernadero ubicado en Almería en el año climático 2007

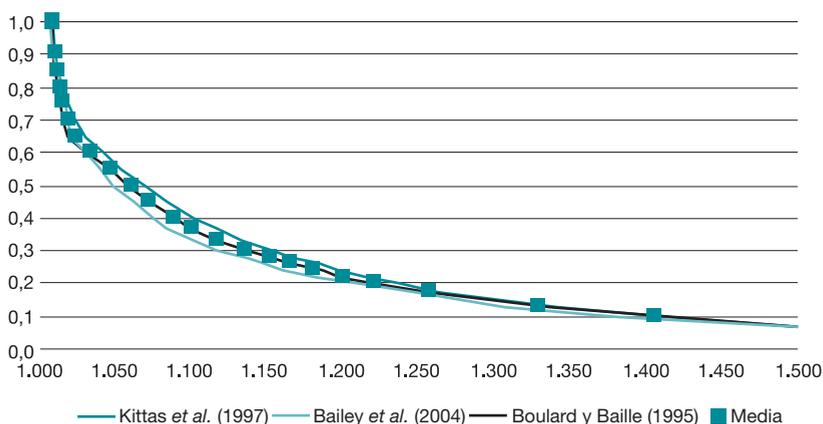


Tabla 1. Tabla típica de datos de salida del modelo

Temperatura ventilación 26 °C													
Almería 2007													
Sin sombreado													
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	Nov	Dic	Total
Horas en las que la temperatura exterior excede la temperatura de ventilación													
	0	0	0	0	52	138	324	373	140	9	0	0	1.036
área vent./área inv.	Horas en que la temperatura del invernadero es superior a la temperatura de ventilación												
0,000	209	211	287	306	378	386	403	397	321	284	228	212	3.622
0,005	154	172	235	247	341	363	397	371	292	238	188	140	3.138
0,010	96	146	197	201	306	348	391	357	274	210	149	99	2.774
0,025	17	89	99	126	267	313	362	342	240	162	74	25	2.116
0,050	0	45	33	64	222	301	349	334	226	133	14	2	1.723
0,075	0	18	9	37	196	280	341	327	210	103	4	0	1.525
0,100	0	5	4	21	175	268	337	323	199	76	0	0	1.408
1,120	0	2	3	14	164	256	337	320	189	68	0	0	1.353
0,140	0	0	2	4	148	247	335	312	187	61	0	0	1.296
0,160	0	0	0	2	139	243	332	310	183	55	0	0	1.264
0,180	0	0	0	2	135	239	331	307	180	54	0	0	1.248
0,200	0	0	0	0	131	235	328	301	178	51	0	0	1.224
0,225	0	0	0	0	129	230	327	295	169	45	0	0	1.195
0,250	0	0	0	0	128	227	325	290	164	42	0	0	1.176
0,275	0	0	0	0	128	220	323	284	159	41	0	0	1.155
0,300	0	0	0	0	124	216	321	277	156	39	0	0	1.133
0,333	0	0	0	0	123	215	316	275	153	38	0	0	1.120
0,367	0	0	0	0	120	214	308	269	150	38	0	0	1.099
0,400	0	0	0	0	118	214	305	264	148	38	0	0	1.087
0,450	0	0	0	0	117	212	301	258	146	38	0	0	1.072
0,500	0	0	0	0	115	211	298	253	145	36	0	0	1.058
0,550	0	0	0	0	115	211	293	247	144	36	0	0	1.046
0,600	0	0	0	0	115	209	290	241	142	36	0	0	1.033
0,700	0	0	0	0	114	207	284	237	141	36	0	0	1.019
0,800	0	0	0	0	114	207	281	234	141	36	0	0	1.013
0,900	0	0	0	0	113	207	280	232	141	36	0	0	1.009
1,000	0	0	0	0	113	207	277	232	141	36	0	0	1.006

3. Exclusión de insectos en invernaderos mediante mallas en las ventanas

La mayoría de los invernaderos en el Mediterráneo y el sureste de Europa están equipados con aperturas de ventilación para proporcionar unas buenas condiciones microclimáticas para el crecimiento de los cultivos. Desafortunadamente, estas ventanas son, asimismo, el mayor puerto de entrada de plagas y, en consecuencia, los agricultores se ven forzados a cubrirlas completamente de forma permanente con mallas de muy baja porosidad (Figura 3) para impedir la invasión de los insectos plaga. Dado que los insectos plaga pueden ser muy pequeños (p. ej. moscas blancas y trips) se necesitan mallas muy finas para impedir su entrada. En consecuencia, estas mallas dificultan la ventilación y, en algunos casos, reducen la transmisión de luz (Bethkel *et al.*, 1994; Klose y Tantau, 2004; Teitel, 2001).

Además, los insectos para los cuales se quiere prevenir la entrada son más abundantes durante las estaciones más cálidas, justo cuando una ventilación eficiente es esencial para evitar condiciones estresantes en el cultivo y los trabajadores (Teitel, 2001) y, por tanto, se empeora el problema de falta de ventilación.

Las mallas se caracterizan por su porosidad (la relación entre el área de hueco y el área total de la malla), el tamaño de los huecos, la dimensión de los hilos (diámetro o espesor), la textura (tejida, trenzada, tejidas/trenzadas), el color, y la transmisión/reflexión y su resistencia al flujo de aire. La mayoría de mallas antiinsectos tienen aperturas cuadradas o rectangulares y están fabricadas con hilos monofilamento. Estas mallas se caracterizan generalmente por el término «mesh», que es el número de espacios abiertos (huecos) por pulgada en cada dirección, delineados por los hilos (p. ej. una malla de 50 «mesh» tiene 50 huecos por pulgada tanto en la dirección de la urdimbre como en la de la trama). Normalmente las mallas son productos tejidos, es decir, un conjunto de hilos (la urdimbre) extendidos en un marco o un telar que se unen para formar un tejido coherente mediante otros hilos (la trama) introducidos en los ángulos adecuados de la urdimbre y pasándolos en un determinado orden sobre y bajo los mismos.

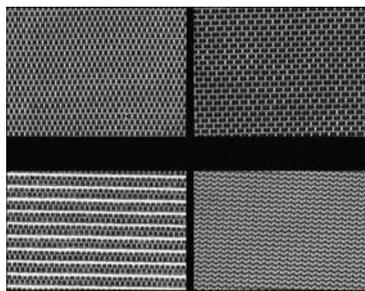


Figura 3. Muestras de mallas antiinsecto

En Europa, las mallas se suelen caracterizar por el número de huecos por centímetro en cada dirección (p. ej. una malla de 20 x 10 hilos tiene 10 huecos por centímetro en una dirección y 20 en la otra). Sin embargo, todavía resulta difícil caracterizar una malla con un tejido complejo p. ej. cuando los hilos no forman huecos con geometría rectangular o cuadrada simple, o cuando los hilos no son una fibra de monofilamento redondeado en los cuales medir el diámetro resulta fácil (Figura 3). Para tales mallas no existe aún un método fiable documentado, y solamente se pueden realizar ensayos de laboratorio que relacionan la caída de presión en el tejido en función de la velocidad de aproximación del aire.

Se muestran mallas con geometrías simple y compleja, arriba y abajo respectivamente. Las mallas de la parte superior están fabricadas con hilos monofilamento redondeados y tienen huecos rectangulares. La malla inferior derecha también está hecha de hilos de monofilamento redondeados, sin embargo, las formas de los huecos no son regulares y sus áreas, difíciles de medir. La malla inferior izquierda presenta hilos monofilamento redondeados en la dirección vertical e hilos horizontales de los cuales una parte está hecha con monofilamentos redondeados y la otra parte tiene flecos.

3.1. Efecto de las mallas antiinsecto sobre la ventilación

Una importante consideración a la hora de diseñar la instalación de las mallas es el efecto que tienen estos materiales sobre el flujo de aire que pasa a través de las ventanas. Está muy bien documentado que las mallas generan un incremento en la caída de presión en las ventanas, reduciendo en consecuencia la ventilación. Se conoce perfectamente que la caída de presión en las mallas es función principalmente de la porosidad de la malla. Para una malla tejida que está fabricada de hilos monofilamento y que tiene una textura simple, la porosidad puede calcularse a partir de las dimensiones de la malla:

$$\varepsilon = \frac{(l-d)(m-d)}{ml} \quad [5]$$

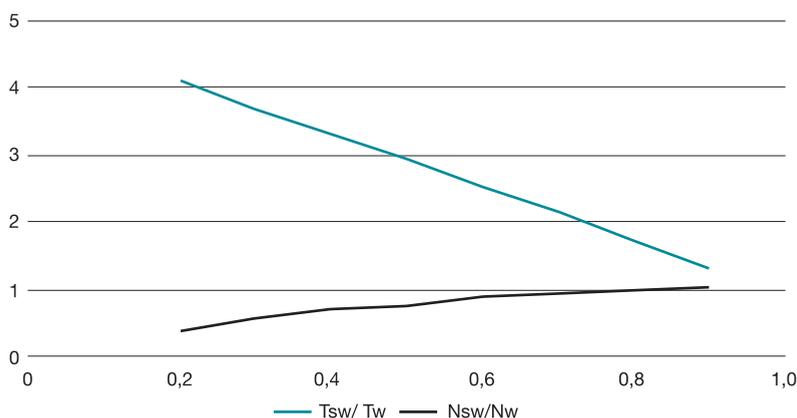
Siendo l y m las distancias entre los centros de dos hilos de urdimbre y trama, respectivamente, y d el diámetro de los hilos. Esta porosidad es relativa a la proyección ortogonal de la malla. Teitel (2007), basándose en datos de la literatura, sugirió la siguiente correlación:

$$\Delta T_{sw} = \Delta T_w (5 - 4\varepsilon) \quad [6]$$

Para estimar el efecto de la malla sobre la diferencia de temperatura entre el ambiente del invernadero con mallas (T_{sw}) y sin mallas en las ventanas (T_w).

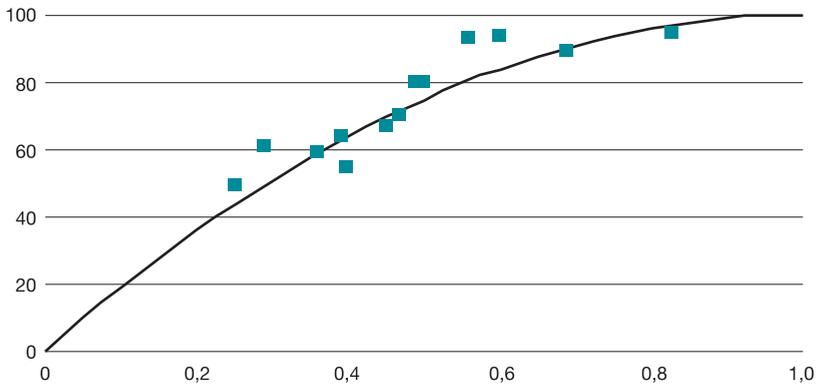
Sin embargo, debemos tener en cuenta que la ecuación [6] proporciona solamente una estimación grosera de T_{sw} , dado que la relación entre las diferencias de temperatura con o sin malla dependen del tipo de invernadero, del cultivo, del clima exterior y de la ubicación del punto de medida de la temperatura ambiente en el interior del invernadero. La evolución de la relación T_{sw} / T_w con la porosidad se muestra en el Gráfico 19. A medida que incrementa el valor de la porosidad, incrementa la tasa de ventilación, y la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero disminuye.

Gráfico 19. Cambio de la tasa de ventilación normalizada (N_{sw}/N_w) y de la diferencia de temperatura (T_{sw}/T_w)



* La tasa de ventilación y la diferencia de temperatura entre dentro y fuera del invernadero están normalizadas por los valores obtenidos sin mallas en las ventanas.

El efecto de la porosidad de la malla sobre la tasa de ventilación se muestra en el Gráfico 20, basada en medidas de ventilación llevadas a cabo en invernaderos de diferentes países.

Gráfico 20. Relación entre la tasa de ventilación y la porosidad de la malla

La tasa de ventilación se reduce cuando se fija una malla antiinsecto a las ventanas del invernadero. El cambio en la ventilación así depende de la porosidad de la malla.

La curva mostrada proporciona una buena representación de los valores medidos en diferentes invernaderos con diferentes mallas y se define por la siguiente ecuación (Pérez-Parra *et al.*, 2004):

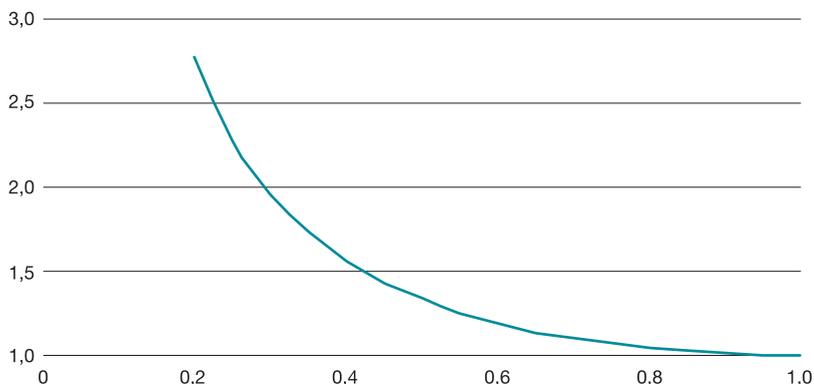
$$V_s / V_{ns} = \text{porosidad} (2 - \text{porosidad}) \quad [7]$$

Donde V_s es la tasa de ventilación con malla y V_{ns} el valor sin la malla.

Reducción del efecto negativo de las mallas antiinsecto sobre la ventilación

El descenso en la ventilación puede reducirse incrementando el área de las ventanas con malla. Una mayor área con malla proporcionará más poros, incrementándose el área para el flujo de aire. El Gráfico 21 muestra el factor por el se debe incrementar el área de las ventanas para compensar la reducción en la ventilación.

Gráfico 21. Factor por el cual se debe incrementar el área de ventanas cuando se colocan mallas antiinsecto para que no se reduzca la tasa de ventilación



La curva que se muestra en el Gráfico 21 se define por la ecuación:

$$A_s / A_v = 1 / [\text{porosidad} (2\text{-porosidad})] \quad [8]$$

Donde A_s es el área de ventanas con malla y A_v el área original de ventanas.

De forma reciente se han desarrollado diversos métodos para mejorar las condiciones desfavorables que se generan en el invernadero debido al uso de las mallas antiinsecto. Estas combinaciones permitirán a los agricultores usar mallas de pocos «mesh» manteniendo al mismo tiempo un alto nivel de protección frente a las plagas.

1. Hay mallas que incorporan disuasión óptica o eléctrica. Estas combinaciones permitirán a los agricultores emplear mallas más porosas mientras se mantiene un elevado nivel de protección frente a las plagas.
2. Retirar las mallas de las ventanas cuando el riesgo de entrada de plagas sea bajo.
3. Maximizar el área de la malla.

A continuación se describen con mayor detalle los métodos descritos arriba.

3.2. Mallas foto-selectivas, efectos de color y otras modificaciones

Los mecanismos por los cuales las mallas foto-selectivas proporcionan protección contra las plagas de artrópodos no han sido dilucidados aún. Pueden ser explicados mediante dos hipótesis alternativas: 1) la luz dentro del invernadero de malla contiene menos carga de ultravioleta y por tanto se vuelve «invisible» para la plaga; 2) los niveles más elevados de luz reflejada disuaden a los insectos de aterrizar. La primera hipótesis se apoya en diferentes informes que han demostrado que el trips y la mosca blanca prefieren ir hacia ambientes con luz UV debido a que tienen receptores en esta región del espectro además de algunos picos en el espectro visible (p. ej. Antignus *et al.*, 2001; Costa *et al.*, 2002; Doukas y Payne, 2007). La segunda hipótesis se apoya en trabajos que indican que los trips resultan repelidos por altos niveles de luz UV reflejada (Matteson *et al.*, 1992; Vernon and Gillespie, 1990). La reflexión total de la luz mediante acolchados aluminizados y mallas de color aluminio también reducen las infestaciones tanto en campo abierto como en cultivos protegidos (p. ej. Creer y Dole, 2003). De hecho, en un reciente trabajo (Ben Yakir *et al.*, 2012) se muestra que en regiones que tienen niveles elevados de intensidad de luz solar durante las estaciones en que los insectos plaga succionadores (áfidos, trips, etc.) son abundantes, la manipulación del comportamiento de estas plagas mediante reflexiones de la luz solar natural constituye una herramienta fundamental para reducir los daños directos e indirectos (virosis) causados por estas plagas.

La respuesta de estos insectos a la luz está fuertemente afectada por la intensidad de la radiación, la forma y contraste de la fuente de la radiación y el estado fisiológico del insecto. Las trampas circulares y cilíndricas son significativamente más atractivas para el trips que otras formas con el mismo color y tamaño (Vernon y Gillespie, 1995; Mainali y Lim, 2010). Un elevado contraste entre la trampa coloreada y su fondo (p. ej. trampa amarilla sobre un fondo negro) incrementó la atracción a los trips (Mainali y Lim, 2010). De forma similar, círculos amarillos sobre un fondo negro atrajeron 2 veces más *B. Tabaci* por unidad de área que las trampas cromáticas amarillas normales (Kim y Lim, 2011). Ben Yakir *et al.* (2012) proponen diversas estrategias para interferir en el hallazgo de los insectos plaga de las plantas huésped a base de engaños ópticos. La manipulación óptica puede alcanzarse mediante engaños de repulsión, atracción y camuflaje. Los engaños de repulsión incluyen el uso de colores poco atractivos y con gran intensidad de reflexión (las mallas, como Bionet® u Optinet®, con un pigmento blanco altamente reflectivo, como el dióxido de titanio, para bloquear el ultravioleta, presen-

tan sobre su superficie un nivel de aterrizaje de trips netamente inferior; las mallas color perla también presentan niveles de reflexión 2-3 veces más elevado en el rango de 400-500 nm en relación a otras mallas). Los engaños de atracción incluyen el uso en las mallas de colores atractivos (p. ej. amarillo o perla); 40 o 50 veces más aterrizajes de mosca blanca en mallas amarillas que en mallas negras o rojas, según Ben-Yakir *et al.*, (2008) o de formas que hacen una función de «arresto» de la plaga (que aterriza y se queda en la malla, incluso intentando alimentarse de los hilos de la misma, pero no penetran hacia el cultivo) o las desvía de ir hacia el cultivo, respectivamente. Los engaños de camuflaje reducen el contraste entre las plantas y su ambiente o bloquean las señales ópticas de las plantas antes de que alcancen el ojo del insecto. Se pueden colocar engaños bajo las plantas o sobre ellas, sobre la propia planta o en su vecindad. Por supuesto, dichas modificaciones ópticas deberían ser compatibles con proporcionar condiciones óptimas de producción (p. ej. actividad de insectos beneficiosos como los polinizadores). Hay que profundizar, por tanto, en el desarrollo de engaños de este tipo dentro de programas de manejo integrado de plagas.

En años recientes se han realizado cultivos bajo mallas de color para promover diferentes respuestas fisiológicas beneficiosas (Shahak *et al.*, 2008). Algunas de las mallas empleadas eran de color amarillo o azul, colores que se sabe que pueden resultar atrayentes para las moscas blancas y el trips, respectivamente. Sin embargo, el riesgo de infestación bajo estas mallas atrayentes fue igual o menor que el riesgo bajo mallas de color negro. Aunque las plagas preferían aterrizar sobre estas mallas de color, parece ser que se quedaban sobre las mallas durante más tiempo. Esta forma de respuesta de secuestro (Bukovinszky *et al.*, 2005) hace menos probable que la plaga infeste las plantas bajo estas mallas. Añadir «colores de secuestro» a las mallas antiinsecto podría reducir el riesgo de invasión de plagas dentro del invernadero.

Una prometedora malla antiinsecto electrostática (malla eléctrica bipolar) ha sido desarrollada por Tanaka *et al.* (2008). Esta malla impidió la entrada de adultos de mosca blanca a través de mallas poco densas con huecos de 30 mm entre los alambres. Las plantas de tomate cultivadas bajo la malla electrostática no tuvieron infestación de plaga en comparación con las infestaciones graves de plantas cultivadas bajo mallas similares sin carga.

3.3. Eliminar las mallas antiinsecto de las ventanas en los momentos de menor riesgo de invasión por parte de las plagas

En el invernadero se mantienen a menudo condiciones climáticas óptimas mediante el cierre y la apertura de las ventanas. Sin embargo, las mallas antiinsectos que se colocan en las ventanas no se regulan en respuesta a los cambios en el riesgo de invasión por parte de las plagas. Se puede mejorar en principio la ventilación del invernadero si de las aperturas de ventilación se retirara la malla en los momentos en que el riesgo de invasión por parte de las plagas es pequeño (Ben Yakir *et al.*, 2008). Durante el otoño, periodo en el que hay mejores picos de población de mosca blanca, aproximadamente el 97 % de las moscas blancas penetraron en el invernadero entre las 7:00 y la 13:00 (Teitel *et al.*, 2005). Por tanto, el riesgo de que entren moscas blancas al invernadero por la tarde y por la noche es despreciable. El vuelo de los trips se estudió empleando trampas poste pegajosas y trampas similares montadas sobre veletas. Durante la mayor parte del año, un 85% de los trips fueron atrapados por la mañana y un 10% al anochecer (Ben-Yakir y Chen, 2008). Mateus *et al.* (1996) también hallaron que *F. occidentalis* presenta dos picos diarios de vuelo, por la mañana y por la tarde, en un invernadero de pimiento. Se relacionó el tiempo de vuelo con los periodos con baja velocidad de viento y raramente se atrapaban trips cuando la velocidad del viento excedía los 10 km/h. Hay información que indica que trips del género *Frankliniella* no despegan su vuelo cuando la velocidad del viento excede los 9 km/h (Lewis, 1997). En resumen, es poco probable que las moscas blancas y los trips penetren en los cultivos protegidos durante las tardes cálidas y ventosas o por las noches. Por tanto, las mallas antiinsecto podrían retirarse de las ventanas durante esas horas.

3.4. Maximizar el área de malla

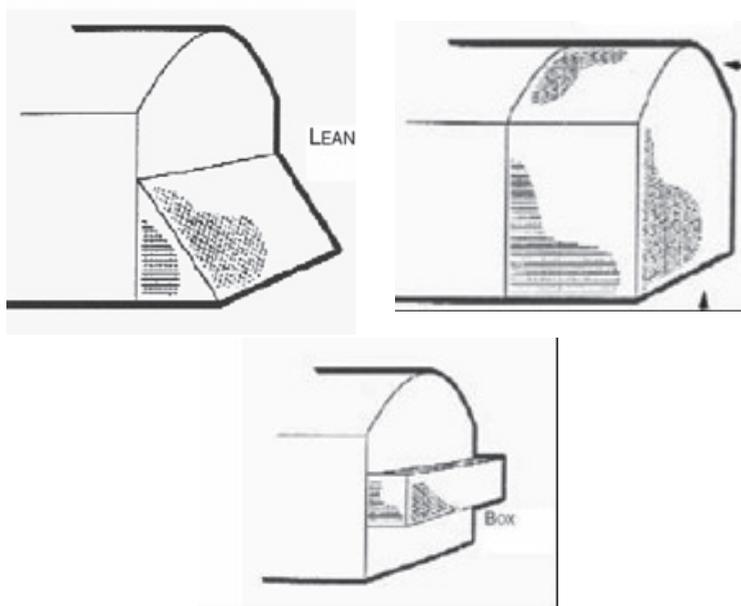
No es tan sencillo incrementar el área de ventanas cenitales en invernaderos parral multicapilla de gran tamaño. En invernaderos de cubierta plástica, es a menudo posible incrementar el área de las ventanas laterales si son de tipo enrollable. O bien, se pueden hacer ventanas de mayor altura, extendiéndolas más hacia el suelo o hacia arriba, si hay margen.

En el caso de las ventanas cenitales, una posibilidad sería incrementar el tamaño de las ventanas de tipo abatible, que generalmente se construyen de un tamaño 2/3 más pequeño que las de tipo enrollable. La razón es la estabilidad constructiva de las mismas frente al viento, algo que se podría

subsanan contando con un pequeño programador de clima que controlara la apertura y cierre de dichas ventanas, estableciendo un margen de seguridad adecuado de cierre con vientos elevados.

También se debe intentar incrementar el ángulo de apertura máximo de los alerones. En cualquier caso, la reducción en la ventilación puede también subsanarse intentando incrementar la superficie de malla (p. ej. mediante la construcción de cajones o «cobertizos de malla en las bandas») (Figura 4).

Figura 4. Diferentes soluciones constructivas para incrementar la superficie de entrada de aire a través de ventanas con malla en aperturas laterales



Otra forma es fijar los marcos a las ventanas con mallas prefabricadas en forma de acordeón (zigzag) que se abren cuando la ventana abre y se repliegan cuando cierra (Figura 5). Teitel *et al.* (2008) probaron que la malla en forma de acordeón permite aumentar el flujo de aire (en aproximadamente un 25 %) en relación a una malla plana sometida a diferencias de presión similares a ambos lados de la malla. Simulaciones CFD recientes realizadas por Teitel (2012; datos no publicados) sugieren que las mallas tipo acordeón pueden permitir tasas de ventilación mucho mayores (dependiendo de la relación entre el área de la malla en acordeón y la plana) que con una malla plana (Figura 6). Además de sus efectos sobre la entrada de insectos y so-

bre la tasa de ventilación, las mallas reducen la transmisión de luz dentro del invernadero creando franjas de sombra sobre el cultivo al instalarse en las ventanas cenitales. En regiones secas con mucho polvo en la atmósfera, el efecto de sombreo puede empeorar con el tiempo debido a la acumulación de polvo sobre las mallas. Klose y Tantau (2004) hallaron que, aunque las mallas que tenían mayor distancia entre hilos adyacentes permitían la mayor transmisión de luz, las mallas con menor distancia no necesariamente tenían la menor transmisión. Por tanto, concluyeron que la transmisión a la luz estaba, en el caso de las mallas, influida por otros parámetros adicionales, como la estructura de los hilos y, por supuesto, la acumulación de suciedad sobre los mismos.

Figura 5. Mallas en forma de acordeón instaladas sobre las ventanas cenitales de un invernadero tipo *venlo*



** Otra vista más detallada de una malla tipo acordeón se muestra en la esquina inferior derecha.*

3.5. Otros factores que afectan la entrada de insectos en los invernaderos

Aunque las ventanas son la principal vía de entrada de los insectos en el invernadero, estas no son la única. Dejar las puertas abiertas, especialmente en los laterales a barlovento, permite la entrada directa de aire y de insectos, de ahí la importancia de las dobles puertas. En los invernaderos tipo parral, los huecos o agujeros en la cubierta pueden suponer puntos de

entrada gracias al flujo entrante de aire. Consecuentemente, se requiere realizar un buen mantenimiento del invernadero si se quiere conseguir una exclusión efectiva de los insectos. Tras un periodo de uso, especialmente en zonas con mucho polvo en el ambiente, las mallas se ensucian y bloquean aún más el paso de aire, reduciendo la ventilación. Por tanto, un lavado cada cierto tiempo de las mallas es aconsejable. También es una buena práctica eliminar las malas hierbas en los alrededores del invernadero. Esto eliminará posibles huéspedes de los insectos reduciendo su población en las vecindades del invernadero.

4. Tendencias en el diseño de sistemas de ventilación natural en invernadero

4.1. Introducción

Los últimos avances en el conocimiento de la ventilación natural están basados en el uso de modelos numéricos. Estos métodos se conocen como dinámica de fluidos computacional o CFD. Mediante el uso de modelos CFD es posible obtener campos vectoriales detallados de la velocidad del aire dentro y alrededor del invernadero, o campos precisos de temperatura, humedad y de cualquier otra variable relevante en los estudios de clima del invernadero.

El estudio de la ventilación de los invernaderos mediante aplicaciones CFD ha levantado un gran interés. Para un mejor diseño de la ventilación, incluso los modelos CFD más simples, que tienen en cuenta solamente los movimientos de los flujos de aire en un invernadero sin cultivo bajo condiciones isotérmicas, pueden ser extremadamente útiles (Baeza, 2007).

Los dos principales casos de estudio considerados son la ventilación a barlovento y a sotavento. La ventilación a barlovento es preferible sobre la de sotavento para invernaderos ubicados en zonas cálidas, dado que la ventilación a barlovento incrementa claramente la tasa de ventilación (Pérez-Parra, 2002). Sin embargo, el clima interior es generalmente menos uniforme para la ventilación a barlovento.

Ventilación de barlovento: en la ventilación de barlovento el aire exterior es «captado» por la ventana de la primera capilla (Figura 6). Esto genera un flujo interior de la misma dirección que el exterior. La primera ventana de barlovento tiene el efecto más significativo sobre la intensidad del intercambio de aire y sobre el flujo de aire interior (Baeza, 2007).

Ventilación de sotavento: para la ventilación de sotavento, el viento exterior sigue el techo de barlovento de la primera capilla y se acelera a lo largo del techo. El flujo exterior se separa de la estructura del invernadero en la parte superior de la primera ventana de barlovento y crea una zona de baja velocidad de viento sobre las siguientes capillas. El aire del invernadero sale de este a través de la primera ventana cenital, creando un flujo interno de dirección opuesta al flujo exterior (Figura 6b). En el caso de la ventilación de barlovento, la primera ventana juega un papel primordial en el proceso de intercambio de aire (Flores, 2010).

Esta es una descripción de los patrones de flujo de aire para la ventilación de barlovento y de sotavento, pero en invernaderos muy anchos el flujo interior puede ser distinto. Mistriotis *et al.* (1997b) emplearon simulaciones CFD para un estudio paramétrico sobre el efecto de la longitud del invernadero (32 m, 64 m, 96 m largo) sobre el patrón de flujo de aire interior. El comportamiento del invernadero de 96 m fue distinto del de los otros, ya que aparecía un flujo de salida en la parte posterior del invernadero. Reichrath y Davies (2001) confirmaron que este flujo inverso en la parte de sotavento del invernadero y la existencia de una zona muerta con muy baja velocidad del aire en aproximadamente un 60 % de la longitud total de un invernadero de vidrio tipo *venlo* de gran tamaño (60 capillas) bajo condiciones de ventilación de sotavento puro muy similares. De la misma forma, la ventilación de barlovento en invernaderos de gran tamaño produce dos áreas de circulación de aire claramente diferenciadas (Figura 7). La zona donde ambas células de circulación se encuentran es una zona muerta con bajo movimiento de aire y elevada temperatura. La recomendación general es, cuando sea posible, limitar la anchura del invernadero a unos 50 m (Baeza, 2007) y dejar una separación entre invernaderos adyacentes para permitir que se evacúe el aire caliente.

Figura 6. Vectores de velocidad del aire dentro y alrededor de la primera capilla sobre la que incide el viento para ventilación de barlovento y de sotavento

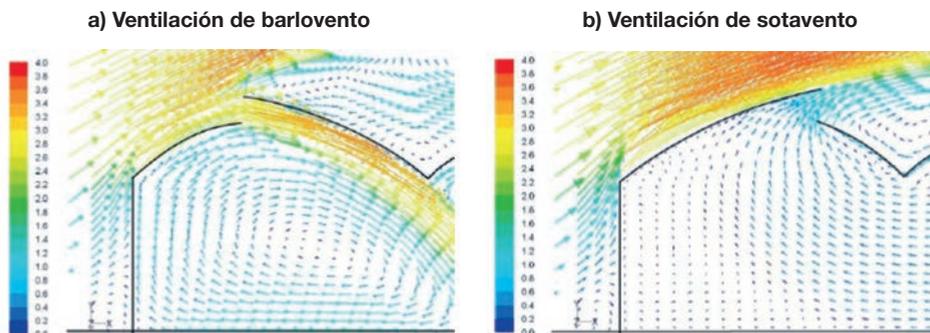
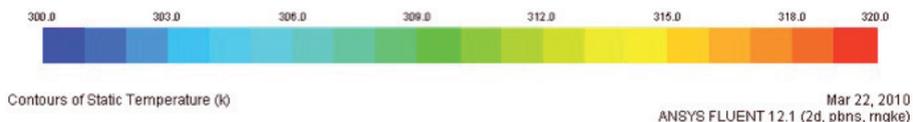
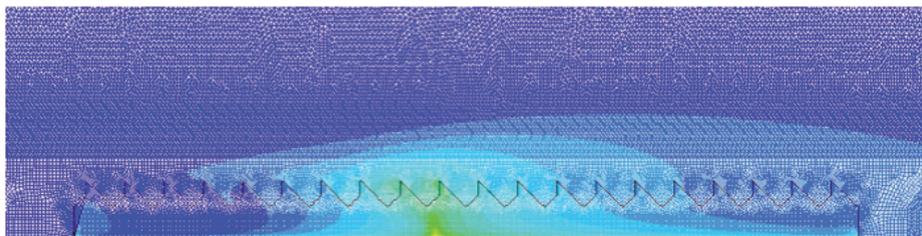


Figura 7. Mapa de temperatura de un invernadero de 100 m de anchura con ventilación de barlovento



** La zona central está normalmente a mayor temperatura que el resto del invernadero.*

Fuente: Montero (2010).

Ventilación cenital con viento paralelo a la cumbrera: un estudio realizado por Boulard y col. (1998) reveló que un viento soplando paralelo a la cumbrera daba lugar a un flujo de aire fresco hacia el interior del invernadero en la parte final de la ventana y un flujo de salida de aire caliente desde el invernadero en la parte de la ventana donde impacta primero el viento (barlovento). Esto produjo temperaturas más altas en el espacio interior adyacente al frontal de barlovento y temperaturas más bajas en el espacio adyacente al frontal de sotavento. Se ha documentado que cuando el viento es paralelo al eje del invernadero, el intercambio de aire es menor que cuando el viento es perpendicular o con un cierto ángulo con el eje del invernadero (Figura 8).

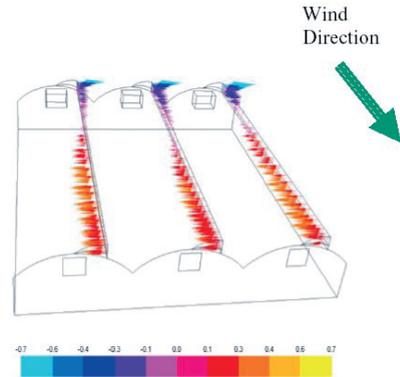
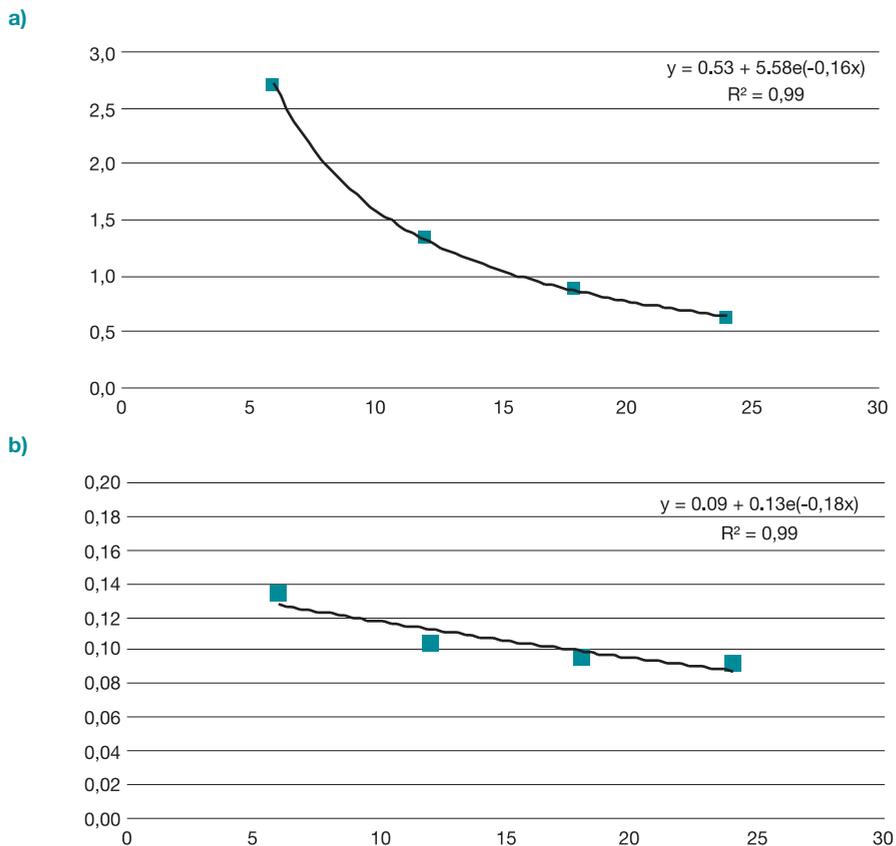


Figura 8. Ventilación cenital con viento paralelo a la cumbrera: flujo saliente a través de la zona de barlovento y flujo entrante a través de la zona de sotavento de la ventana. (Flores, 2010).

Ventilación lateral: la ventilación lateral es similar a la cenital en relación al patrón de flujo, dado que para la ventilación lateral el aire exterior también pasa al interior a través de la parte de barlovento y atraviesa la anchura del invernadero. Kacira *et al.* (2004) llevaron a cabo simulaciones CFD para investigar el efecto de las ventanas laterales en relación al número de capillas de un invernadero tipo gótico con ventanas cenitales continuas en la parte de sotavento de cada capilla (Gráfico 22). Comparada con la ventilación solamente cenital, se halló que cuando ambas ventanas laterales estaban totalmente abiertas aumentaba mucho la tasa de ventilación. El estudio mostró que la máxima tasa de ventilación del invernadero se alcanzaba cuando ambas ventanas laterales estaban abiertas así como las ventanas cenitales. Sin tener en cuenta el efecto térmico en las simulaciones, la tasa de ventilación incrementó de forma lineal con la velocidad del viento exterior. La relación entre el área de ventilación respecto al área cubierta por el invernadero resultó ser del 9,6 %, muy pequeño comparado con los valores recomendados del 15-25 %. Los resultados mostraron que se producía una reducción significativa de la tasa de ventilación al aumentar el número de capillas (de 6 a 24 capillas) y un decrecimiento exponencial explicó la relación entre la tasa de ventilación y el número de capillas.

Gráfico 22. El efecto del número de capillas sobre la tasa de ventilación
(a) Ventanas laterales y cenitales totalmente abiertas
(b) Solamente ventanas cenitales



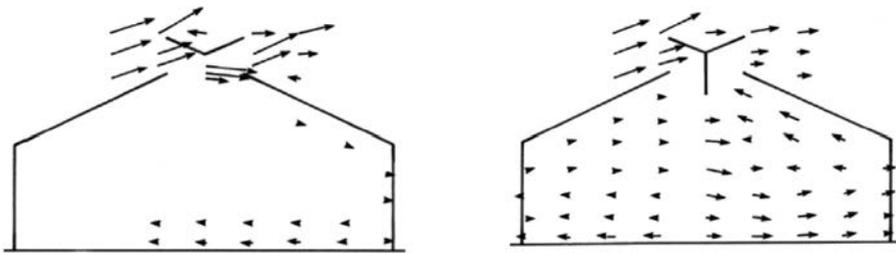
Fuente: Kacira *et al.* (2004).

La ventilación lateral puede ayudar a reducir el área de la zona muerta de elevadas temperaturas, típica de invernaderos muy anchos. Sin embargo, la ventilación lateral no es aceptada por muchos agricultores que son reacios a abrir las ventanas cenitales y laterales en la dirección de barlovento, para proteger sus cultivos y estructuras del invernadero de daños potenciales por viento. Por esta razón, los deflectores laterales están siendo ensayados (Baeza, 2007), como se verá más adelante, así como los mecanismos simples para proteger las ventanas frente al viento, que se están popularizando en países Mediterráneos.

4.2. Sugerencias para mejorar la ventilación natural

Uso de deflectores. Como fue apuntado por Sase (2006), en muchos tipos de ventanas el aire entrante sigue fielmente la forma de la superficie interior del techo y crea un flujo cruzado sobre el cultivo, sin mezclarse con el aire de la zona de cultivo. Para evitar este problema, ha sido recomendado usar pantallas o deflectores para redirigir la corriente de aire. Nielsen (2002) ofreció un método para dirigir el flujo de aire que pasaba bajo las ventanas cenitales fijadas a la cumbrera hacia la zona de cultivo (Figura 9). Usando una pantalla vertical de 1 m fijada a la cumbrera, se conseguían aumentos en el intercambio de aire en la zona del cultivo de un 50 % de promedio.

Figura 9. Efecto de un deflector colocado bajo las ventanas cenitales sobre la circulación interior del aire



Fuente: Nielsen (2002).

Kacira *et al.* (2004) evaluaron la optimización de la configuración tradicional de ventanas en un invernadero de cristal de dos capillas para mejorar la renovación de aire, especialmente en la zona ocupada por el cultivo, mediante simulaciones numéricas en tres dimensiones empleando CFD. El estudio evaluó tanto ventanas tipo enrollable como de tipo abatible en los laterales y varias configuraciones de apertura en las ventanas cenitales (Figura 10). Las tasas de ventilación mayores del invernadero se alcanzaron cuando se emplearon ventanas laterales enrollables abiertas en combinación con las cenitales también totalmente abiertas. Sin embargo, el uso de ventanas laterales enrollables mejoró considerablemente la tasa de ventilación en la zona de cultivo. Esto puso de manifiesto que la ventilación en la zona de cultivo se ve afectada de forma significativa por los patrones de flujo de aire interno provocados por las diferentes configuraciones de ventanas (Tabla 2).

Figura 10. Efecto de la configuración de ventanas laterales sobre la ventilación y los procesos de intercambio de aire en la zona de cultivo. a) Ventanas laterales enrollables b) Ventanas laterales abatibles

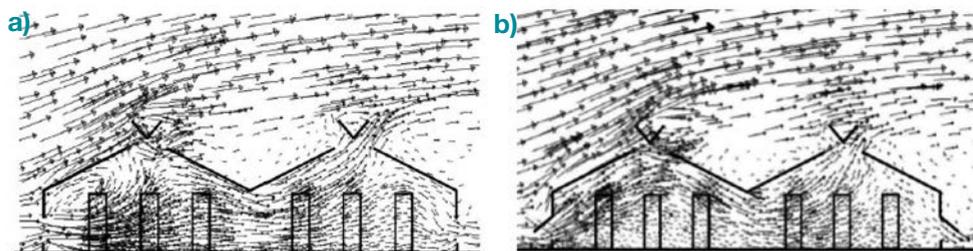


Tabla 2. Los efectos de la velocidad del viento y la configuración de ventilación sobre las tasas de ventilación del invernadero y de la zona de cultivo del invernadero

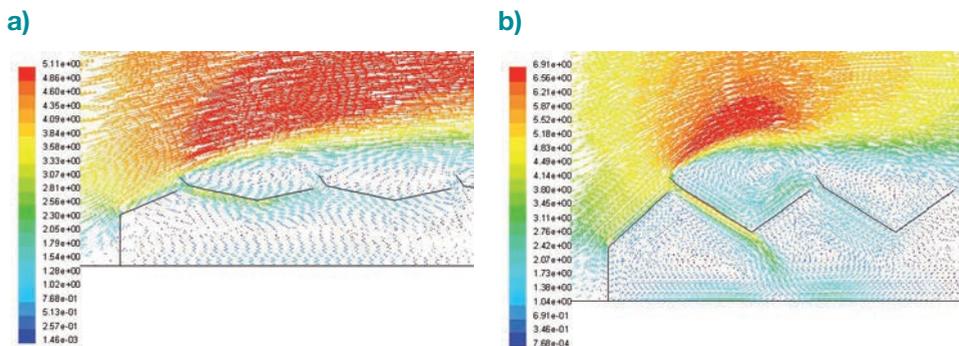
Ventilación del invernadero								
m s ⁻¹	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
0,5	1,54	0,59	1,91	0,84	1,47	1,49	1,63	1,46
1,0	3,16	1,21	3,95	1,77	3,16	3,15	3,49	3,00
1,5	4,78	1,84	6,03	2,72	4,86	4,83	5,38	4,56
2,0	6,40	2,46	8,11	3,68	6,59	6,53	7,29	6,12
Ventilación de la zona de cultivo del invernadero								
0,5	0,69	0,43	1,84	0,99	1,41	1,43	1,56	2,11
1,0	1,50	0,98	4,25	2,50	3,43	3,43	3,74	4,74
1,5	2,29	1,55	6,64	4,09	5,45	5,44	5,93	7,35
2,0	3,07	2,17	9,02	5,68	7,47	7,45	8,11	9,95
2,5	3,86	2,80	11,38	7,27	9,49	9,44	10,29	12,55

Kacira y col (2004) pusieron de manifiesto la importancia y la necesidad de analizar las tasas de ventilación de la zona del cultivo así como de todo el invernadero. Por ejemplo, bajo las mismas condiciones de viento exterior y de existencia de plantas, las tasas de ventilación del invernadero fueron similares entre la configuración con ventanas laterales de tipo abatible y la configuración con enrollables (Caso 1 y Caso 3, Tabla 2). La mayor parte del aire entrante en el caso de ventanas laterales abatibles no alcanzaba la zona de cultivo. Sin embargo, en el caso de ventanas laterales enrollables, se halló que el aire entrante contribuyó a mejorar la uniformidad en los flujos de aire y en la consecución de mayores tasas de ventilación en la zona

del cultivo de forma muy significativa. Los datos globales mostraron que la ventilación en la zona de cultivo se veía considerablemente afectada por los patrones de flujo de aire interior provocados por las diferentes configuraciones de ventilación.

Cambios en la pendiente del invernadero. Incrementar la pendiente de las capillas del invernadero tiene un efecto positivo sobre la tasa de ventilación. Baeza (2007) comparó las tasas de ventilación y el flujo de aire interior de invernadero con pendientes que oscilaron entre los 12 y los 32°. De acuerdo con este estudio, la tasa de ventilación creció de forma drástica al alcanzarse una pendiente de 25°. A partir de este valor, el incremento en la tasa de ventilación fue mucho menor. Las pendientes muy bajas no solamente afectan la tasa de ventilación sino que también lo hacen sobre el movimiento del aire en el invernadero. La Figura 11 muestra el campo vectorial de velocidades del aire de dos invernaderos con distintas pendientes. Como se observa la mayor parte del flujo de aire que entra por la primera ventana de barlovento se fija a la cubierta del invernadero. Con mayores pendientes parte del flujo de aire contribuye a la ventilación de la primera capilla y otra parte avanza hacia la siguiente capilla disminuyendo el efecto de fijación a la cubierta observado para pendientes menores.

Figura 11. Efecto de la pendiente de las capillas sobre la tasa de ventilación en un invernadero de 5 capillas
a) pendiente de 12 °C, b) pendiente de 32 °C



Tamaño y tipo de ventanas. Baeza (2007) analizó el efecto del tamaño de las ventanas sobre el clima del invernadero. Incrementó el tamaño del alerón (y del hueco) desde 0,8 m hasta 1,6 m en las primeras dos capillas y

las dos últimas, manteniendo un tamaño de 0,8 m en las capillas centrales para un invernadero de 10 capillas, hallándose que el aumento de tamaño de las ventanas en las capillas extremas tuvo un gran efecto sobre la tasa de ventilación. Además, el movimiento de aire en la zona de cultivo fue mayor. Como consecuencia de ello, el campo de temperaturas fue más uniforme, el gradiente en relación al exterior se redujo y el número y el tamaño de las zonas sin movimiento de aire (puntos cálidos) fue significativamente menor. Este estudio sugiere que el clima del invernadero puede mejorarse haciendo inversiones modestas solamente en las ventanas ubicadas en las capillas extremas, cuyas ventanas son críticas para los procesos de intercambio de aire.

En relación al tipo de ventanas, Perez-Parra (2004) comparó las ventanas cenitales abatibles con las enrollables bajo condiciones de barlovento y de sotavento. Las ventanas abatibles fueron en ambos casos más eficientes para aumentar la tasa de ventilación que las enrollables. Fue interesante observar que, en el caso de las ventanas abatibles, la orientación a barlovento proporcionaba el doble de intercambio de aire que las de sotavento.

Orientación de las líneas de cultivo. Sase (1989) llevó a cabo un estudio de ventilación para comparar el efecto de que las líneas de cultivo estuvieran orientadas de forma perpendicular o de forma paralela a las ventanas laterales. La velocidad del aire interior en el invernadero con líneas de cultivo perpendiculares a la ventana era casi el doble que cuando las líneas de cultivo eran paralelas, ya que el cultivo es un medio poroso que ofrece una resistencia al paso a través del aire, por lo que se recomienda que los pasillos entre las líneas de cultivo se orienten en la dirección de los flujos internos de aire. El estudio de Sase se llevó a cabo en un invernadero pequeño donde la ventilación lateral era predominante sobre la cenital. Para invernaderos que solo presenten ventilación cenital la orientación de las líneas de cultivo en relación a las ventanas (o viceversa) puede ser de menor importancia, dado que en invernaderos con ventilación cenital, solamente hay un fuerte movimiento de aire sobre la zona del cultivo a una velocidad mayor que entre el cultivo (Flores, 2010).

Nuevos diseños de invernadero con ventilación mejorada. Todo este conocimiento, recientemente desarrollado, puede ser puesto en común para producir mejores diseños de los sistemas de ventilación. Se espera que los próximos modelos de invernadero, si confían en la ventilación natural, deben ser suficientemente estrechos (no mucho más de 50 m de anchura) para evitar gradientes de temperatura excesivos. Además, se espera que cuenten con ventanas de mayor tamaño, especialmente en las

capillas extremas. Deben incorporar pantallas o deflectores para redirigir el flujo de aire hacia la zona de cultivo produciendo una mezcla homogénea del aire exterior y el interior, para poder tener condiciones homogéneas de crecimiento (Figura 12 y 13). Una buena ventilación de barlovento implicará mantener una separación entre invernaderos libre de obstáculos. Para una ventilación adecuada, los futuros diseños no considerarán los invernaderos aislados sino en grupos o polígonos de invernaderos, dado que el flujo de aire en un invernadero se ve afectado por los edificios u obstáculos de alrededor.

Figura 12. Estudio CFD del patrón de los flujos de aire en un invernadero con sistemas de ventilación mejorados

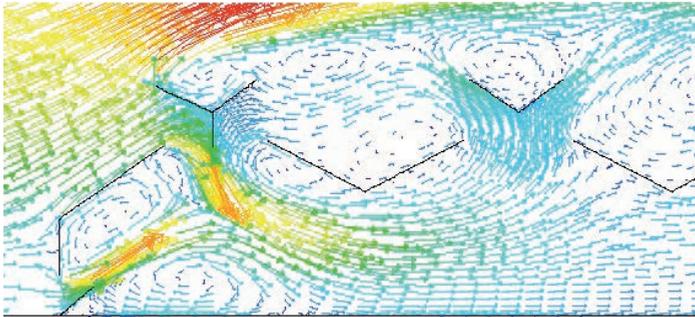


Figura 13. Invernadero prototipo «Inversos». Prototipo evaluado en la Estación Experimental de Cajamar Caja Rural ‘Las Palmerillas’, Almería, España



4.3. Ventilación en invernaderos con obstáculos alrededor

La ventilación natural de un invernadero puede verse fuertemente afectada por la existencia de una obstrucción a barlovento del mismo, la cual puede producir un cambio significativo en los patrones de flujo de aire y en el campo de presiones alrededor del invernadero. Esta situación es muy común en zonas de cultivo con gran densidad de invernaderos, en la cual estos están ubicados muy cerca unos de otros (p. ej. Almería, Sicilia, etc.)

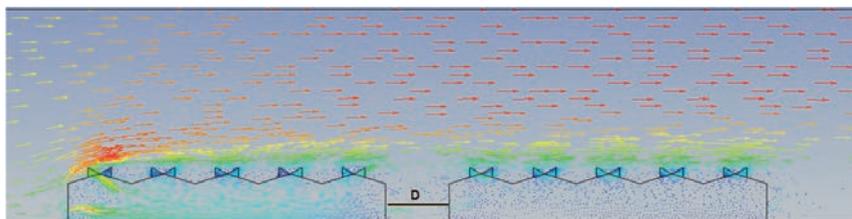
Para abordar el estudio de este tipo de situaciones se han desarrollado una serie de acciones:

1. Usar un modelo simplificado para el cálculo de la tasa de ventilación en invernaderos sin obstáculos.
2. Llevar a cabo simulaciones CFD para determinar un conjunto de «funciones de ajuste» que relacionen la tasa de ventilación de un invernadero con obstáculo y sin obstáculo con la distancia entre ellos.
3. Aplicar las «funciones de ajuste» a la tasa de ventilación obtenida con el modelo simplificado. Esto permite conocer la ventilación en el invernadero con el obstáculo.

Funciones de ajuste

Habiendo llevado a cabo simulaciones CFD en dos grupos de invernaderos multicapilla, se incrementó la distancia entre invernaderos de $D = 2$ m a $D = 60$ m (Figura 14). Podemos llamar invernadero A al primer invernadero (el que no tiene obstáculo) y B al que está a sotavento de este (invernadero obstaculizado).

Figura 14. Esquema de los invernaderos A y B separados una distancia D



Se han incluido dos estructuras diferentes en el análisis: invernadero con ventanas cenitales dobles en cada capilla y con una sola ventana cenital por capilla (orientadas en la misma dirección) (Figura 15).

Figura 15. Ventanas cenitales dobles y simples



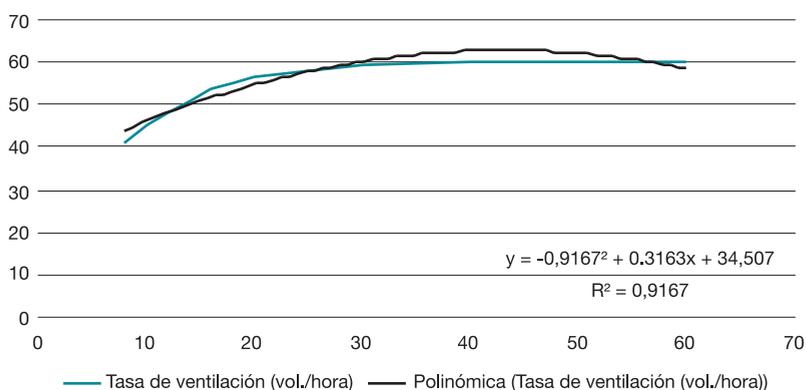
Para cada tipo de estructura se simularon 4 casos:

- Invernadero de 5 capillas con ventanas cenitales y laterales abiertas.
- Invernadero de 5 capillas con ventanas cenitales abiertas y laterales cerradas.
- Invernadero de diez capillas con ventanas cenitales y laterales abiertas.
- Invernadero de 10 capillas con ventanas cenitales abiertas y laterales cerradas.

Por tanto, para cada tipo de invernadero se estudiaron 4 casos. Para cada caso estudiado la distancia D se incrementó y la tasa de ventilación del invernadero B se comparó con la del invernadero A, cuya ventilación se consideraba la de referencia.

El Gráfico 23 corresponde al invernadero de 10 capillas y ventanas laterales y cenitales abiertas. Se puede observar que existe una gran correlación entre la distancia D y la tasa de ventilación. Para todos los casos se obtuvo una regresión estadística del tipo de la mostrada en el Gráfico 20.

Gráfico 23. Tasa de ventilación del invernadero B como una función de la distancia al obstáculo A.
Invernadero de 10 capillas con ventanas cenitales y laterales abiertas



Como conclusión general se puede afirmar que el efecto negativo de la obstrucción es mucho menor para el invernadero con dobles ventanas cenitales que para el de ventana cenital simple: si el invernadero tiene muy buena ventilación, la distancia al obstáculo no produce una gran reducción en la tasa de ventilación. Por el contrario, para invernaderos con ventilación cenital simple, incluso para distancias D tan elevadas como 60 m, la reducción de la ventilación podría ser de casi el 50 % en relación al invernadero de referencia. Obviamente, el efecto con ventanas laterales es muy acusado, por lo que, en la práctica, si los invernaderos vecinos están muy juntos, los invernaderos se comportan como un invernadero cuasiinfinito que prácticamente ventila solo por las ventanas cenitales.

Referencias bibliográficas

- ABDEL-GHANY, A. M. y KOZAI, T. (2006): «Cooling Efficiency of Fogging Systems in Greenhouses»; *Biosystems Engineering* 94(1); pp. 97-109.
- ABDEL-GHANY, A. M.; GOTO, E. y KOZAI, T. (2006): «Evaporation characteristics in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse»; *Renewable Energy* (31); pp. 2207-2226.
- ANTIGNUS, Y.; NESTEL, D.; COHEN, S. y LAPIDOT, M. (2001): «Ultraviolet-deficient greenhouse environment affects whitefly attraction and flight-behavior»; *Environ. Entomol.* (30); pp. 394-399.
- ARBEL, A. A.; SHKLYAR, A. y BARAK, M. (2006): «Simulation modelling for buoyancy-driven flow for a greenhouse cooled by a fogging system»; *Acta Hort.* (719); pp- 417-424.
- BAEZA, E. J. (2007): «Optimización del diseño de los sistemas de ventilación en invernaderos tipo parral»; *Tesis doctoral*. Escuela Politécnica Superior. Departamento de Ingeniería Rural. Universidad de Almería.
- BAILEY B. J.; ROBERTSON, A. P. y LOCKWOOD, A. G. (2004): «The influence of wind direction on greenhouse ventilation»; *Acta Horticulturae* (63); pp. 197-204.
- BEN-YAKIR, D.; TEITEL, M.; TANNY, J.; CHEN, M. y BARAK, M. (2008): «Optimizing ventilation of protected crops while minimizing invasion by whiteflies and thrips»; *Acta Hort.* (797); pp. 217-222.
- BEN-YAKIR, D. y CHEN, M. (2008): «Studies of thrips migratory flights in Israel»; *Acta Phyt. Entomol. Hung.* (43); pp. 243-248.

- BEN-YAKIR, D.; ANTIGNUS, Y.; OFFIR, Y. y SHAHAK, J. (2012): «Optical Manipulation of Insect Pests for Protecting Agricultural Pests»; *Acta Horticulturae* (956); pp. 609-616.
- BETHKE, J. A.; REDAK, R. A. y PAINE, T. D. (1994): «Screens deny specific pests entry to greenhouses»; *California Agric.*, May-June; pp. 37-40.
- BOT, G. P. A. (1983): «Greenhouse climate: from physical process to a dynamic model»; *PhD dissertation*, Agricultural University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands.
- BOULARD, T. y BAILLE, A. (1995): «Modelling of Air Exchange Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents»; *J. Agric. Engng. Res.* (61); pp. 37-65.
- BUKOVINSZKY, T.; POTTING, R. P. J.; CLOUGH, Y.; LENTEREN, J. C. V. y VET, L. E. M. (2005): «The role of pre- and post-alighting detection mechanisms in the responses to patch size by specialist herbivores»; *Oikos* (109); pp. 435-446.
- CABRERA, F. J.; BAILLE, A.; LOPEZ, J. C.; GONZALEZ-REAL, M. M. y PEREZ-PARRA, J. (2009): «Effects of cover diffuse properties on the components of greenhouse solar radiation»; *Biosystems Engineering* (103); pp. 344-356.
- CASTILLA, N. y HERNÁNDEZ, J. (2007): «Greenhouse technological packages for high-quality crop production»; *Acta Horticulturae* (761); pp 285-297.
- COSTA, H. S.; ROBB, K. L. y WILEN, C. A. (2002): «Field trials measuring the effects of ultraviolet- absorbing greenhouse plastic films on insect populations»; *J. Econ. Entomol.* (95); pp. 113-120.
- DE JONG, T. D. (1990): *Natural ventilation of large multi-span greenhouses*; University of Wageningen; p.116.
- DOUKAS, D. y PAYNE, C. C. (2007): «Greenhouse whitefly (Homoptera : Aleyrodidae) dispersal under different UV-light environments»; *J. Econ. Entomol.* (100); pp. 389-397.
- FLORES, J. (2010): «Análisis del clima en los principales modelos de invernadero en México (malla sombre, multitunel y baticenital) mediante la técnica del CFD»; *Tesis Doctoral*. Universidad de Almería (España); p. 160.
- GARCÍA ALONSO, Y.; GONZÁLEZ, A.; ESPÍ, E.; SALMERÓN, A.; LÓPEZ, J. y FONTECHA, A. (2006): «New Cool plastic films for greenhouse covering in tropical and subtropical areas»; *Acta Horticulturae* (719); pp. 131-138.

- GONZÁLEZ, A.; RODRIGUEZ, R.; BAÑÓN, S.; FRANCO, J. A.; FERNANDEZ, J. A.; SALMERÓN, A. y ESPÍ, E. (2003): «Strawberry and cucumber cultivation under fluorescent photoselective plastic films cover»; *Acta Horticulturae* (614); pp. 407-414.
- GREER, L. y DOLE, J. M. (2003): «Aluminum foil, aluminum-painted plastic and degradable mulches increase yields and decrease insect-vectored viral diseases of vegetables»; *HortTech*. (13); pp. 276-284.
- HEMMING, S.; DUECK, T.; JANSE, J. y VAN NOORT, F. (2008): «The effect of diffuse light on crops»; *Acta Horticulturae* (801); pp. 1293-1300.
- JOLLIET, O.; DANLOY, L.; GAY, J. B.; MUNDAY, G. L. y REIST, A. (1991): «HOTRI-CERN: an improved static model for predicting the energy consumption of a greenhouse»; *Agr. and For. Meteorol.* (55); pp. 265-294.
- JOLLIET, O. (1994): «HORTITRANS, a Model for Predicting and Optimizing Humidity and Transpiration in Greenhouses»; *J. Agric. Engng. Res.* (57); pp. 23-57.
- KACIRA, M., SHORT, T. H. y STOWEL, R. R. (1998): «A CFD evaluation of naturally ventilated, multi span Sawtooth greenhouses»; *Transactions of the ASAE* 41(3); pp. 833-836.
- KACIRA, M.; SASE, S. y OKUSHIMA, L. (2004): «a. Effects of side vents and span numbers on wind- induced natural ventilation of a gothic multi-span greenhouse»; *JARQ*, 38(4); pp. 227-233.
- KACIRA, M.; SASE, S. y OKUSHIMA, L. (2004): «b. Optimisation of vent configuration by evaluating greenhouse and plant canopy ventilation rates under wind-induced ventilation»; *Transactions of the ASABE* 47(6); pp. 2059-2067.
- KEMPKES, F.; STANGHELLINI, C. y HEMMING, S. (2008): «Cover materials excluding Near Infrared Radiation. What is the best strategy in mild climates?»; *Acta Horticulturae* (807); pp. 67-72.
- KIM, S. y LIM, U. T. (2011): «Evaluation of a modified sticky card to attract *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) and a behavioural study on their visual response»; *Crop prot.* (30); pp. 508-511.
- KITTAS, C.; BOULARD, T. y PAPANAKIS, G. (1997): «Natural Ventilation of a Greenhouse with Ridge and Side openings: Sensitivity to Temperature and Wind Effects»; *Trans. ASAE* 40(2); pp. 415-425.

- KLOSE, F. y TANTAU, H. J. (2004): «Test of insect screens- Measurement and evaluation of the air permeability and light transmission»; *Europ. J. Hort. Sci.* (69); pp. 235-243.
- LEWIS, T. (1997): «Thrips as Crop Pests»; *CAB international*. Londres.
- LI, S.; WILLITS, D. H. y YUNKER, C. A. (2006): «Experimental study of a high pressure fogging system in naturally ventilated greenhouses»; *Acta Horticulturae* (719); pp. 393-400.
- LORENZO, P., SANCHEZ-GUERRERO, M. C., MEDRANO, E., GARCÍA, M. L., CAPARROS, I., COELHO, G. y GIMENEZ, M. (2004): «Climate control in the summer season: a comparative study of external mobile shading and fog system»; *Acta Horticulturae* (659); pp. 189-194.
- MAINALI, B. P. y LIM, U. T. (2010): «Circular yellow sticky trap with black background enhances attraction of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera, Thripidae)»; *Appl. Entomol. Zool.* (45); pp. 207-213.
- MATEUS, C.; ARAÚJO, J. y MEXIA, A. (1996): «Daily flight periodicity of *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera: Thripidae)»; *Folia Entomol. Hungar* (57, Suppl); pp. 97-102.
- MATTESON, N.; TERRY, I.; ASCOLI, C. A. y GILBERT, C. (1992): «Spectral efficiency of the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis*»; *J. Insect Physiol.* (38); pp. 453-459.
- MITRIOTIS, A.; ARCIDIACONO, C.; PICUNO, P.; BOT, G. P. A. y MUGNOZZA G. S. (1997): «a. Computational analysis of ventilation at zero and low wind speeds»; *Agricultural and Forest Meteorology* (88); pp. 121-135.
- MISTRIOTIS, A.; BOT, G. P. A.; PICUNO P. y MUGNOZZA G. S. (1997): «b. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics»; *Agricultural and Forest Meteorology* (85); pp. 217-228.
- MONTERO, J. I.; CASTILLA, N.; ANTÓN, A. y HERNÁNDEZ, J. (2001): «Direct and diffuse light transmission of insect-proof screens and plastic films for cladding greenhouses»; *Acta Horticulturae* (559); pp. 203-209.
- Montero, J. I. (2010): «New Technologies for environmental control of greenhouse climate with special reference to evaporative cooling»; *Workshop on Protected Cultivation-Present Status and Future Trends*. Riyadh. Saudi Arabia, 6-8 April 2010.
- NIELSEN, O. F. (2002): «Natural ventilation of a greenhouse with top screens»; *Biosys. Eng.* (81); pp. 443-452.

- PAPADAKIS, G.; MERMIER, M.; MENESES, J. F. y BOULARD, T. (1996): «Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings»; *Journal of Agricultural Engineering Research* (63); pp. 219-228.
- PEREZ-PARRA, J., BAEZA, E., MONTERO, J.I. Y BAILEY, B.J. (2004): «Natural ventilation of parral greenhouses»; *Biosystems Engineering* 87(3); pp. 355-366.
- REICHRATH, S. y DAVIES, T. W. (2001): «Using CFD to model the internal climate of greenhouses: past, present and future»; *Agronomie* (22); pp. 3-19.
- SASE, S. (1989): «The effects of plant arrangement on airflow characteristics in a naturally ventilated glasshouse»; *Acta Hort.* (245); pp. 429-435.
- SASE, S. (2006): «Air movement and climate uniformity in ventilated greenhouses»; *Acta Horticulturae* (719); pp. 313-324.
- PÉREZ PARRA, J.; BAEZA, E.; MONTERO, J. I. y BAILEY, B. J. (2004): «Natural Ventilation of Parral Greenhouses»; *Biosystems Engineering* 87(3); pp. 355-366.
- SHAHAK, Y.; GAL, E.; OFFIR, Y. y BEN-YAKIR, D. (2008): «Photosensitive shade netting integrated with greenhouse technologies for improved performance of vegetable and ornamental crops»; *Acta Hort.* (797); pp. 75-80.
- TANAKA, N.; MATSUDA, Y.; KATO, E.; KOKABE, K.; FURUKAWA, T.; NONOMURA, T.; HONDA, K. I.; KUSAKARI, S. I.; IMURA, T.; KIMBARA, J. y TOYODA, H. (2008): «An electric dipolar screen with oppositely polarized insulators for excluding whiteflies from greenhouses»; *Crop Protection* (27); pp. 215-221.
- TEITEL, M. (2001): «The effect of insect-proof screens in roof openings on greenhouse microclimate»; *Agric. Forest Meteorol.* (110); pp. 13-25.
- TEITEL, M.; TANNY, J.; BEN-YAKIR D. y BARAK M. (2005): «Airflow patterns through roof openings of a naturally ventilated greenhouse and their effect on insect penetration»; *Biosyst. Eng.* (92); pp. 341-353.
- TEITEL, M. (2007): «The effect of screened openings on greenhouse microclimate»; *Agric. Forest Meteorol.* (143); pp. 159-175.
- TEITEL, M.; LIRAN, O.; HAIM, Y. y SEGNER, I. (2008): «Flow through inclined and concertina-shape screens»; *Acta Hort.* (801); pp. 99-106.
- VERNON, R. S. y GILLESPIE, D. R. (1990): «Spectral responsiveness of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera: Thripidae) determined by trap catches in greenhouses»; *Environ. Entomol.* (19); pp. 1229-1241.

- VERNON, R. S. y GILLESPIE, D. R. (1995): «Influence of trap shape, size and background color on captures of *Frankliniella occidentalis* (Thysanoptera, Thripidae) in a cucumber greenhouse»; *J. Econ. Entomol.* (88); pp. 288-293.
- WAAIJENBERG, D. y SONNEVELD, P. J. (2004): «Greenhouse design for the future with a cladding material combining high insulation capacity with high light transmittance»; *Acta Horticulturae* (633); pp. 137-143.