



Hasta qué punto la tecnología requiere contar con un invernadero eficiente. A continuación se exponen estudios presentados para aprovechar y elaborar mejores diseños de ventilación en invernaderos de clima de invierno suaves.

Invernadero para la producción sostenible en áreas de clima de invierno suaves

JUAN I. MONTERO¹
CECILIA STANGHELLINI², N. CASTILLA³

¹ Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries de Cabrils, ² Wageningen UR Greenhouseture ³ IFAPA Granada

La producción en invernadero en las regiones con inviernos suaves es una actividad establecida hace años. Desde comienzos de los años sesenta, los invernaderos y otros tipos de estructuras de protección vegetal se instalaron en primer lugar alrededor de la cuenca del Mediterráneo, y posteriormente en países tan distantes como Méjico o China. Durante la crisis energética de los setenta, el coste de la calefacción amenazó la supervivencia de la industria del invernadero de zonas frías. En

cambio, las regiones cálidas con poco o ningún consumo de calefacción se vieron beneficiadas, y sus invernaderos, con escaso nivel tecnológico pero relativamente económicos, se convirtieron en una alternativa a los invernaderos del norte, con mejor control climático pero grandes consumidores de energía.

Los invernaderos de las regiones con inviernos suaves han evolucionado desde sus comienzos, con una estructura muy simple, de madera y ventilación natu-

En invernaderos de las zonas con clima de inviernos suaves predominan los que son simples con cubierta plástica sobre los más complejos.

ral generalmente insuficiente, hasta las estructuras actuales metálicas de producción industrial, como el modelo ya clásico llamado multitúnel con gran variedad de equipos de climatización. Hay muchas opiniones sobre cuál es el nivel tecnológico que debe tener un invernadero para que sea rentable. Es frecuente encontrar a un productor que confía en la tecnología alta y el control exacto del clima, y al lado de él puede estar otro productor que opta por la tecnología simple, el control climático pasivo

(mínimo consumo de energía) y el uso eficiente de los recursos naturales disponibles. Ambos enfoques coexisten, pero el hecho indiscutible es que en los países con inviernos suaves los invernaderos sencillos con cubierta plástica predominan sobre los más complejos.

Se han llevado a cabo pruebas comparativas para encontrar la mejor combinación entre los diferentes tipos de invernadero y las técnicas de climatización (Castilla, 2007). La conclusión general es que si está bien diseñado, un invernadero sencillo puede tener casi la misma transmisión de luz y parecida tasa de ventilación que otro de tipo industrial. Como consecuencia, en las explotaciones hortícolas mediterráneas, los invernaderos construidos con técnicas locales alcanzan un balance costo-beneficio similar a los invernaderos de tipo industrial dotados de equipos de control climático. Esta conclusión es válida para los años “normales”, en los que no se presentan temperaturas extremas, períodos intensos de alta humedad o ataques severos de plagas y enfermedades. Pero si uno de estos eventos ocurre, los invernaderos industriales pueden hacer frente a esas condiciones externas desfavorables ofreciendo mayor garantía al productor. Quizás la principal ventaja de usar tecnología en zonas con invierno suave es la de añadir seguridad y estabilidad a la producción bajo invernadero, ventajas que sin duda contribuyen a elevar la rentabilidad en las condiciones actuales del mercado.

La investigación sólida, ya sea pública o privada, es la base que nos permite entender mejor cómo una tecnología nueva cambia el clima del invernadero y cómo responden los cultivos a esa tecnología. El objetivo de este artículo es discutir los progresos tecnológicos más recientes y relevantes que se han producido en el ámbito de la ingeniería hortícola, centrandolo en los invernaderos situados en zonas de inviernos suaves, como es el Mediterráneo.



En estas áreas con clima favorable, el uso inteligente de los recursos naturales disponibles junto con una tecnología bien seleccionada para superar situaciones atmosféricas adversas, son factores clave para la sustentabilidad.

Huelga decir que la conservación del medio ambiente, preocupación que preside cualquier actuación de desarrollo presente y futura, también es importante en la industria de los invernaderos. Existen herramientas cuantitativas como el Análisis de Ciclo de Vida (en adelante ACV) que sirven para evaluar el impacto ambiental de los cultivos protegidos. El impacto se calcula en referencia a una serie de categorías medioambientales, como son el calentamiento global, el riesgo de eutrofización, etc. (Anton, 2004). En este documento se presentan algunos resultados derivados de los estudios ambientales aplicados a los invernaderos.

Cualquier nueva tecnología tiene que ser al mismo tiempo eco-

nómicamente viable y respetuosa del medio ambiente. La tecnificación tiene un costo ambiental inevitable que necesita ser compensado por un aumento en la eficiencia de todos los insumos. Es decir, si el impacto ambiental se refiere al kilogramo producido por unidad de superficie de invernadero, la nueva tecnología deberá producir más kilogramos por unidad de superficie, con el fin de compensar el aporte extra de energía y materiales que el uso de la tecnología conlleva. En el texto que sigue se presentan algunos resultados de estudios previos que relacionan las tecnologías y sus efectos ambientales asociados.

Innovaciones en tecnologías para invernadero

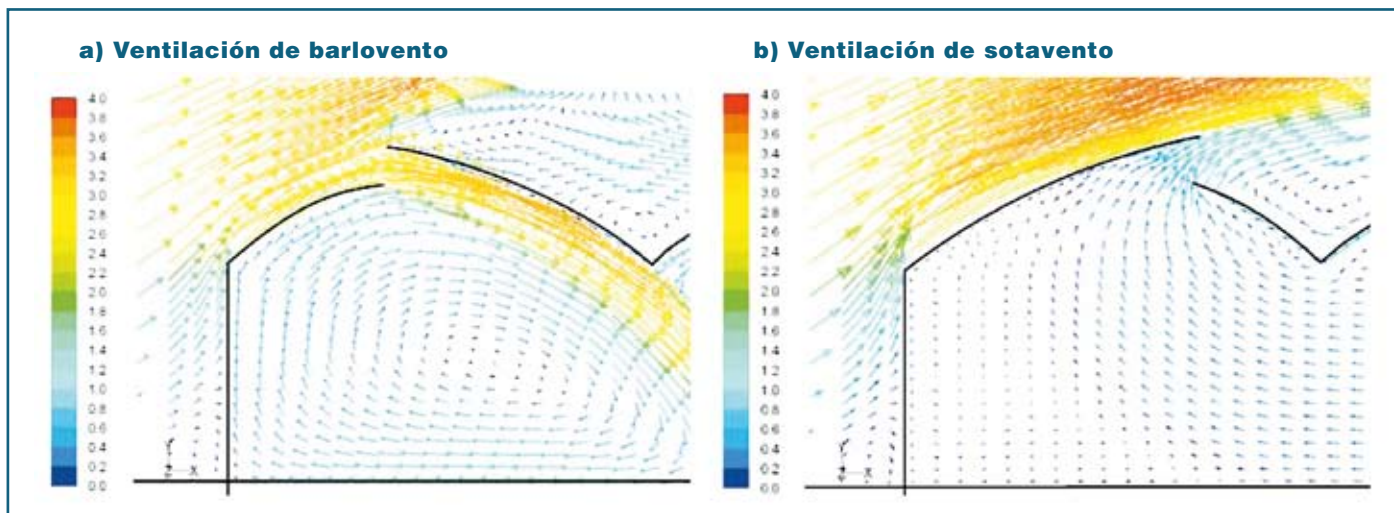
Tendencias en ventilación natural

El ser capaz de producir a lo largo de prácticamente los doce meses del año es uno de los principales retos del invernadero del mediterráneo. Es por eso que las tecnologías para refrigerar el aire

■ El hecho es que los invernaderos simples con cubierta plástica predominan sobre los más complejos en los países con inviernos suaves

Figura 1:

Vectores de velocidad dentro y alrededor del primer arco del invernadero para la ventilación de barlovento y sotavento.



en días soleados y calurosos han llegado a ser muy importantes, particularmente los sistemas de ventilación natural, que consumen significativamente menos energía que los sistemas de ventilación mecánica o forzada (Sase, 2006).

Los últimos avances en el diseño de la ventilación se basan en la aplicación de los métodos numéricos y la simulación con ordenador. Estos modelos, que integran la llamada Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, del inglés Computational Fluid Dynamic), permiten obtener con mucho detalle los campos de velocidad del aire dentro y fuera del invernadero, así como la distribución de temperatura, humedad o de cualquier otra variable relevante al estudio del clima en invernadero.

Los estudios de CFD se desarrollaron a partir de los primeros trabajos de Okushima y cols. (1989). A partir de ese estudio se han analizado invernaderos cada vez más complejos, a veces de grandes dimensiones, que incorporan la interacción del cultivo con el clima interior (por ejemplo, Fatnassi y cols., 2006). Para el diseño de la ventilación son extremadamente útiles los modelos más simples de CFD, incluso aquellos que consideran solamente el mo-

vimiento del flujo de aire de un invernadero vacío bajo condiciones isotérmicas.

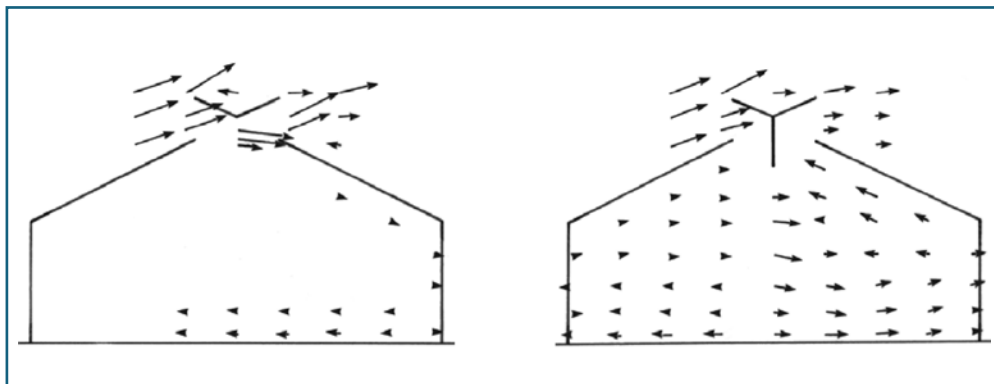
Sase (2006) revisó las características primarias de la circulación de aire en invernaderos de una o varias naves y el efecto de la velocidad y dirección del aire externo sobre la uniformidad del clima interior. Los principales casos a considerar son la ventilación a barlovento (ventanas del techo abiertas de cara al viento) y sotavento (ventanas de espaldas al viento). Para los invernaderos situados en áreas calidas es más recomendable la ventilación a barlovento puesto que así se aumenta la tasa de ventilación (Pérez-Parra, 2002). Sin embargo, en invernaderos de tamaño medio o grande (anchura superior a 50 metros) el clima dentro del invernadero es generalmente menos uniforme con la ventilación a barlovento.

La nueva tecnología deberá producir más kilogramos por unidad de superficie, con el fin de compensar el aporte extra de energía y materiales que requiere

Ventilación a Barlovento (Ventanas cenitales de cara al viento) Para este tipo de ventilación el aire externo “es capturado” por la ventana de la primera nave (Figura 1a), creando un flujo interno con la misma dirección del aire externo. La primera ventana del techo es la que más influye en el intercambio de aire y en el movimiento de aire interno. La ventilación a barlovento tiene algunas desventajas. Según lo expuesto por Sase, el aire entrante sigue la superficie interna del techo y crea un flujo sobre el cultivo. Existe el riesgo que el aire que entra por la primera nave salga del invernadero a través de la segunda o tercera ventana, pasando por encima del cultivo sin mezclarse con el aire de la zona cultivada. Para evitar esto se está recomendando muy recientemente el uso de pantallas o deflectores con el fin de cambiar la dirección de la corriente de aire. Nielsen (2002) propuso un método para dirigir la circulación de aire en las ventanas de mariposa hacia el área cultivada (Figura 2). Utilizando una pantalla vertical de 1 m., montada sobre la ventana de mariposa, logró mejorar el intercambio de aire en el cultivo en un 50%. Montero y cols. (2001) también demostraron la eficacia de

Figura 2:

Efecto de un deflector en el ventilador de techo del interior de la circulación del aire. Nielsen, 2002.



desviar el aire usando un deflector en las ventanas de caballete.

El aumento de la pendiente del techo también ayuda a dirigir el aire entrante hacia la superficie cultivada. Baeza (2007) comparó el intercambio de aire y el flujo de aire interno de invernaderos con pendientes entre 12 y 32 grados. Concluyó que la ventilación aumenta conforme crece la pendiente del techo hasta alcanzar 25 grados; para pendientes mayores, el aumento en la ventilación fue mínimo. Baeza (2007) analizó el efecto del tamaño de las ventanas en el clima del invernadero. Con ese fin aumentó el tamaño de la ventana de 0.8 a 1.6 m en las dos primeras y dos últimas naves y mantuvo el tamaño normal de 0.8 m en los arcos centrales. Para invernaderos de 10 arcos el aumento de tamaño de la ventana tuvo un gran efecto sobre la tasa de ventilación. Además, se mejoró el movimiento de aire en la superficie cultivada. Como consecuencia, la temperatura fue más uniforme, el gradiente de temperatura en relación al exterior se redujo y el número y el tamaño de las áreas estancadas de aire (puntos calientes) fue significativamente menor. El estudio sugiere que el clima del invernadero puede mejorarse al hacer una pequeña inversión en los ventiladores de las primeras y últimas naves, que son los que tienen mayor importancia en el intercambio de aire.

La ventilación a través de la pared lateral es similar a la ventilación de barlovento del techo, puesto que el aire externo también entra al invernadero por el lado de barlovento y pasa a todo lo largo del invernadero. Kacira y cols. (2004) hicieron simulaciones de CFD para investigar el efecto de las ventanas laterales en relación al número de naves adosadas en invernadero gótico con ventanas cenitales. Respecto a la ventilación sólo cenital, la ventilación lateral aumentó notablemente la tasa de ventilación. Como es lógico, la importancia relativa de la ventilación lateral frente a la cenital decrece conforme aumenta el número de naves del invernadero, pero el estudio de Kacira demostró que las ventanas laterales fomentan la ventilación también en invernaderos de gran anchura con hasta 24 naves adosadas. La ventilación lateral es por tanto muy importante. Aún así muchos agricultores son renuentes a abrir los laterales para

■ Para una apropiada ventilación, los diseños futuros de invernaderos considerarán un grupo de invernaderos y no a uno solo de ellos, puesto que la circulación de aire en un invernadero es afectada por sus alrededores

proteger los cultivos de la posible mayor incidencia del ataque de plagas. En cada caso deben ponderarse las ventajas e inconvenientes de abrir los laterales. También debe recordarse la necesidad imperiosa de contar con un equipo de control que cierre las ventanas abiertas al viento cuando la velocidad exterior supere el umbral de seguridad.

Todo este conocimiento científico recientemente adquirido puede aprovecharse para mejorar los diseños de ventilación. Resumiendo lo dicho, los próximos modelos de invernaderos, si ventilan a barlovento, deberán ser relativamente estrechos (no más de 50 m de ancho) para evitar excesivos gradientes de temperatura. Además, es de esperar que tengan ventanas de gran tamaño, especialmente en el primer y último arco. Estos invernaderos incorporarán pantallas o deflectores para redirigir el flujo de aire hacia la superficie cultivada, produciendo así una mezcla homogénea del aire entrante e interno que proporcione condiciones uniformes de crecimiento. Una ventilación de barlovento eficaz requerirá mantener un área libre de obstáculos entre los invernaderos. Para ventilar con eficacia, los diseños futuros de invernaderos se pensarán para optimizar un grupo de invernaderos y no uno solo de ellos aislado, puesto que la circulación de aire en un invernadero afecta a las otras estructuras que están en su entorno.

Ventilación a sotavento (Ventanas cenitales de espalda al viento) En la ventilación a sotavento, el viento externo sigue el perfil del techo de barlovento de la primera nave y se acelera a lo largo del techo. El flujo externo se separa de la estructura del invernadero más o menos cerca de la cumbre de la primera nave y crea una zona de poca velocidad sobre las naves siguientes. El aire del invernadero sale a través de la primera ventana del techo creando un flujo interno opuesto al flujo externo (Figura 1b). Del mismo modo que en el caso de la ventilación a barlovento, también para la

ventilación a sotavento el primer ventilador desempeña un papel determinante en el proceso del intercambio de aire.

Lo dicho hasta aquí es un esquema general del movimiento del aire a sotavento, pero en invernaderos de grandes dimensiones el flujo interno puede ser diferente. Mistrionis y cols. (1997) utilizaron una simulación de CFD para el estudio del efecto de la longitud del invernadero (32 m, 64 m, 96 m de largo) en el movimiento interior de aire. El comportamiento del invernadero de 96 m fue diferente al de los demás, porque aproximadamente a partir del 60% de la anchura del invernadero se observó una zona de muy baja circulación de aire con una celda de circulación diferente a la observada en invernaderos más estrechos. Reichrath y Davies (2001) confirmaron la presencia de esta zona de baja velocidad y alta temperatura

en un invernadero de vidrio tipo Venlo de 60 naves. Actualmente se están llevando a cabo estudios para mejorar el clima de los invernaderos de naves múltiples ventilados a sotavento (Montero y cols, 2007). Basados en el estudio de la presión estática sobre una estructura de 15 arcos, las simulaciones demostraron que podrían alcanzarse mejoras significativas en tempe-

ratura y uniformidad. Por ejemplo, las simulaciones mostraron un área de presión negativa en el techo cerca del canal de la primera nave que encara al viento (Figura 3). Si se construye una ventana en esa zona de succión la salida del aire del invernadero aumenta notablemente. Otra mejora posible consiste en mantener cerrado el lateral de barlovento y abierto el de sotavento. Así se evita el impacto de aire sobre el cultivo y se mejora la ventilación. En invernaderos relativamente ancho se detectan zonas calientes con escaso movimiento de aire. Este problema es solucionable aumentando el área de la ventilación cenital cada cinco naves (Figura 4). El estudio demostró que es posible diseñar sistemas eficientes de ventilación de sotavento con sólo hacer modificaciones de poca inversión en los sistemas de ventilación existentes.

■ La ventilación de la pared lateral puede ayudar con temperaturas altas a reducir esta zona muerta, pero no es la mejor solución para muchos productores que son renuentes a abrir los ventiladores de la pared lateral y del techo y así proteger de daños que pueda ocasionar el viento

Invernaderos cubiertos con mallas para producción a ciclo parcial o total

Cubrir los cultivos con mallas porosas se está convirtiendo en una práctica común. Los llamados “invernaderos de malla” o screenhouses en inglés son estructuras eficaces y económicas para darle sombra a los cultivos, protegerlos del viento y granizo, mejorar los regímenes de temperatura y humedad, ahorrar agua de riego y rechazar insectos y pájaros (Tanny y cols., 2006).

Los invernaderos de pantalla pueden ahorrar alrededor del 30% del agua de irrigación anual requerida para las condiciones exteriores, sin ninguna pérdida de producción e incluso mejorándola

El suministro de productos hortícolas de calidad durante todo el año puede lograrse o bien con invernaderos de alta tecnología o cultivando en dos sitios cuyos períodos de cosecha sean complementarios. (Castilla y Hernández, 2007). La ausencia de producción de los invernaderos de las zonas costeras del sur de España, durante el verano, viene siendo substituida por la producción en invernaderos de malla localizados en zonas de montaña, permitiendo así un abastecimiento de productos durante todo el año. Son zonas económicamente deprimidas con problemas importantes de desempleo agrícola (Romacho y cols., 2006).

Hay una relación entre la porosidad de una malla y la transmisión de rayos solares; sin embargo, existen otros parámetros que también influyen en la difusión de la radiación y por lo tanto en los porcentajes de sombreo y transmisión de luz (Sica y Picudo, 2008). Romacho y cols., 2006, reportan valores de transmisión del 62% y 58% para una malla blanca y de color verde respectivamente de pantalla verde (Calibre 15 mesh). La deposición de polvo en las pantallas puede alterar ampliamente su transmisión, en porcentajes que van desde un 73% hasta un 56% en mallas de 32 mesh (Santos et al., 2006). La reducción de la radiación solar entrante se puede considerar un efecto positivo para sombrear instalaciones, mientras que en otros usos agrícolas, como la protección anti-insectos o anti granizo es un factor negativo (Candura y cols., 2008).

Las pantallas son una protección eficaz contra el daño mecánico causado por el viento. Moller y cols. (2003) midieron una reducción de 75% al 95% en la velocidad del aire respecto al viento. En invernaderos de malla de gran tamaño las variaciones de la velocidad del viento exterior afectaron más a los bordes que al centro del invernadero (Tanny y cols., 2003, 2006).

Figura 3:

Presión sobre el terreno de un invernadero con ventilación de sotavento. Las zonas rojas son presión positiva. Las verdes y azules son zonas de presión negativa.



Hay modelos matemáticos para predecir la temperatura interior de los invernaderos de malla (e.g. Desmarais y cols, 1999). Como en los invernaderos de cubierta plástica, la ventilación juega un papel relevante en el clima del invernadero de malla, y la porosidad de la malla condiciona en gran manera la tasa de ventilación.. En invernaderos de malla de 15 mesh se han registrado temperaturas más bajas que el aire exterior (hasta 1°C) (Raya y cols., 2006; Romacho y cols., 2006), mientras que otras mallas más densas (35 mesh)

Figura 4:

Temperatura del terreno en un invernadero con ventilación de sotavento.





inducen 1°C más alto que la temperatura del aire externo (Santos y cols., 2006). La altura del invernadero de malla también afecta al clima interno; la oscilación térmica es mayor en los invernaderos bajos (3.5 m de altura) que en altos (5.0 m de altura) (Raya y cols., 2006). Es relativamente frecuente observar casos de inversión térmica durante las noches claras (Raya y cols., 2006). Por otra parte, cuando la tasa de ventilación es baja la temperatura máxima del aire sube significativamente. (Santos et y cols, 2006; Tanny y cols, 2006).

Durante las horas de luz del día se han reportado únicamente reducciones de menor importancia del Déficit de la Presión de Vapor en invernaderos de malla con una cobertura de cultivo completamente desarrollada (Romacho y cols, 2006). Un dato muy interesante es que los invernaderos de malla pueden ahorrar alrededor del 30% del agua de irrigación anual requerida para las condiciones exteriores, sin ninguna pérdida de producción e incluso mejorándola (Tanny y cols, 2006).

Algunos autores recomiendan el uso de mallas coloreadas en vez de las del blanco o negro convencionales para manipular el crecimiento vegetativo de la cosecha y mejorar la producción y la calidad (Oren-Shamir y cols, 2001). La elección del color de la malla se dirige específicamente a provocar las respuestas fotomorfogénicas/fisiológicas deseadas a base de manipular el espectro lumínico. Por otra parte es mejor usar mallas con poder de dispersión luminosa para mejorar la penetración de luz en el dosel vegetal (Shahak, 2008). Con el fin de limitar el impacto visual de los invernaderos de malla, algunos autores sugieren tener en cuenta el color del entorno al elegir el color de la malla (Castellano y cols., 2008; Romacho y cols, 2006).

■ **La tendencia a ventilar menos (invernaderos semi-cerrados) podría reducir aún más la cantidad de agua requerida**

Invernaderos cerrados o semi-cerrados

El almacenaje térmico activo en acuíferos naturales o artificiales es cada vez más aplicado en invernaderos holandeses cerrados o semi-cerrados. Dicho almacenaje podría atenuar la oscilación térmica del día y la noche en invernaderos sin calefacción y prolongar la estación de crecimiento, así como reducir el uso del agua y la entrada de parásitos. Con el uso de un modelo general, Vanthoor y cols (2008, este simposio) demostraron que al aumentar el almacenaje térmico natural del suelo también aumenta la productividad cuando la ventilación es insuficiente (clima mediterráneo en verano). Sin embargo, también demostraron que el efecto puede ser opuesto durante el invierno en que el almacenaje puede reducir la temperatura diurna.

El uso del invernadero como colector solar fue una de las soluciones utilizadas en los años ochenta para reducir la dependencia de los combustibles fósiles (por ejemplo, Baille, y cols, 1985, Levav, N., 1985). El rendimiento térmico y el consumo de energía fue muy positivo pero el costo de las instalaciones evitó la difusión de esta tecnología.

Recientemente se han realizado algunos proyectos de desarrollo de invernaderos cerrados en regiones mediterráneas, tales como el proyecto de Watergy (Buchholz y cols, 2006). Estos invernaderos no sólo son útiles para conservar el combustible fósil sino también para ahorrar agua, aspecto que hace ver a los invernaderos cerrados como un concepto nuevamente atractivo. El principal elemento innovador del invernadero Watergy es una torre de enfriamiento en el centro de la estructura, donde el aire caliente, a lo largo del día, se eleva desde la zona del cultivo hasta la torre de enfriamiento donde es humedecido y refrigerado por unos rociadores de agua. Durante las evaluaciones de primavera, las temperaturas diurnas variaron 20°C y 35°C, mientras que la humedad relativa osciló entre 80%

De acuerdo con su nivel tecnológico, estructura y tamaño se pueden identificar dos tipos principales de invernaderos: de baja tecnología, con una estructura muy simple, con cubierta de plástico, control climático pobre, e invernaderos de alta tecnología, donde los costos de inversión son muy altos.

y 90%. Se logró una reducción del 75% en el consumo de agua, y no fue necesario usar energías adicionales ni pesticidas. Tampoco se observó ningún problema por enfermedades fúngicas.

Sin embargo, el control de la humedad en invernaderos cerrados o semi-cerrados tiene que ser mejorado puesto que no todos los cultivos pueden crecer bajo regímenes de humedad alta. Sería deseable que el agua condensada en el techo interno pudiera ser recogida y reutilizada. Pero este objetivo no se puede alcanzar en los invernaderos con cobertura plástica disponibles actualmente. Hacen falta estructuras que eviten el goteo de la condensación. Los invernaderos innovadores deben proporcionar un mejor control de humedad, toda vez que las enfermedades producidas por hongos suelen producir pérdidas severas en la producción y la calidad de los cultivos hortofrutícolas. (Baptista, 2007).

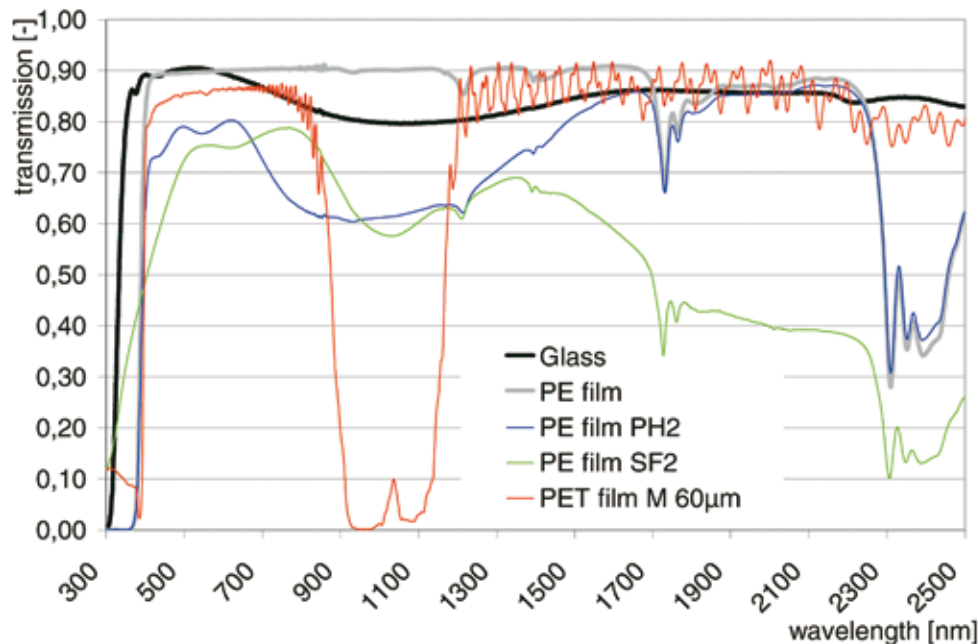
Progresos en los materiales de revestimiento del invernadero

Las características térmicas y ópticas de los materiales de cubierta, plástico y vidrio están experimentando cambios importantes, aunque todavía la mayoría de innovaciones no penetran en el mercado. Waaijberg (2006) revisó las posibilidades de mejora de las cubiertas plásticas de los invernaderos. A continuación se enumeran las principales:

- Bloqueo de la radiación infrarroja cercana (NIR, del inglés Near-infrared) para reducir el efecto natural del calentamiento.
- Bloqueo de la radiación ultravioleta (UV, del inglés Ultraviolet) para limitar la actividad de insectos dañinos.
- Mejora del efecto invernadero (mejor bloqueo de la transmisión la radiación térmica de onda larga).
- Mejora de las características antiniebla y antipolvo.

Las cubiertas de plástico más prometedoras son aquellas que incorporan aditivos para bloquear la

Figura 5: Transmisión espectral de invernaderos con diferentes materiales de revestimiento.



radiación NIR. Aproximadamente la mitad de la energía que entra en un invernadero como radiación del sol está en el rango de longitud de onda útil para la fotosíntesis, es decir la Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR, del inglés Photosynthetically Active Radiation). Casi toda la fracción restante se encuentra en la gama NIR (Near Infrared Radiation), que calienta el invernadero y el cultivo y contribuye a la transpiración, aspectos que no siempre son deseables.

Hemming y cols (2006) investigaron prototipos de cubiertas plásticas con pigmentos reflectores de radiación NIR en varias concentraciones, Figura 5. La figura muestra que es posible lograr una

reducción significativa en el contenido de energía de la radiación del sol en la gama NIR, sin reducción importante de la radiación PAR. La efectividad de estas cubiertas en la reducción de la temperatura del aire y del cultivo en invernaderos y su efecto sobre la producción y calidad depende de varios factores, tales como la cantidad de radiación NIR filtrada por la cubierta, la capacidad de la ventilación del invernadero, la densidad y transpiración del cultivo, etc. El estudio de Hemming y cols (2006) demostró que, bajo las condiciones existentes en Holanda, la temperatura del aire en un invernadero tipo Venlo se puede reducir en aproximadamente 1°C durante los meses del verano, pero a cambio hace aumentar el consumo de energía para calefacción en los meses de invierno. Las pruebas realizadas en el sur de España produjeron resultados más optimistas. Se han documentado reducciones de temperatura de hasta 4°C durante los meses de verano. La cubierta que filtra el NIR favoreció el aumento del rendimiento y calidad en un cultivo de pimiento

Se recomienda el uso de pantallas coloreadas en vez de las del blanco o negro convencionales, para manipular el crecimiento vegetativo de la cosecha y mejorar la producción y la calidad

(García-Alonso y cols 2006). El estudio en campo se llevó a cabo probablemente en un invernadero con baja tasa de ventilación, donde cualquier tipo de reducción de radiación tiene un efecto más fuerte que en invernaderos bien ventilados como el del estudio holandés (Hemming y cols 2006).

■ **El estudio de Hemming demostró que, bajo las condiciones existentes en Holanda, la temperatura del aire en un invernadero tipo Venlo se puede reducir en 1°C durante el verano e incrementar el consumo de energía para calefacción en invierno**

Además de disminuir la temperatura del invernadero (principal objetivo), las cubiertas plásticas reflectoras de radiación NIR tienen algunos efectos secundarios que pueden ser relevantes en los invernaderos pasivos o semi-pasivos, típicos de clima suave. Por ejemplo, como reducen las necesidades de ventilación, esas cubiertas pueden obstaculizar la afluencia del dióxido de carbono (CO₂) del aire exterior, de tal modo que pueden limitar el proceso de la fotosíntesis. Por otro lado y particularmente en invernaderos pasivos, el corte de una fracción significativa de energía solar es perjudicial en determinadas condiciones, sobre todo en invierno.

Los filtros NIR-selectivos disponibles en el mercado se pueden aplicar de tres formas: como aditivo permanente añadido a la cubierta; como "lechada de cal" o blanqueo estacional o como panta-



lla móvil con el aditivo incorporado. Respecto a la primera forma de aplicación (aditivo añadido al plástico de la cubierta) Kempkes y cols (2008, este simposio) realizaron simulaciones para estudiar el efecto de los filtros NIR a lo largo de todo el año, llegando a la conclusión de que es muy improbable que el filtro NIR aumente la productividad en zonas climáticas de inviernos suaves, a menos que la energía reflejada por la cubierta se pueda utilizar de otra manera. Sonneveld y cols (2008, este simposio) describen una aplicación avanzada encaminada a transformar la energía solar reflejada en energía eléctrica. En conclusión, los filtros NIR permanentes pueden ser muy útiles en climas tropicales, pero en climas mediterráneos pueden ser perjudiciales en las épocas frías. Los blanqueos o pinturas con filtro NIR tienen el problema de que no reflejan la radia-

Turquía posee algunas ventajas en términos de condiciones climáticas, fuentes geotérmicas y mano de obra barata, todo lo que incrementa las posibilidades de la exportación.

ción NIR filtrada sino que la absorben y también cortan en exceso la radiación PAR. Los filtros estacionales son técnicamente los mejores para climas mediterráneos, ya sean en forma de pantallas pantalla móviles, filtros de temporada estival o filtros cuyas propiedades ópticas varíen con la temperatura, alternativa actualmente en investigación. Como siempre, la idoneidad técnica debe coincidir con la rentabilidad de la innovación para no quedar relegada.

Control del clima: uso inteligente del CO₂

Todas las mejoras técnicas que reduzcan la necesidad de ventilación en el invernadero tienen la consecuencia involuntaria de limitar la afluencia natural del CO₂ contenido en el aire exterior, restringiendo la fotosíntesis y reduciendo la producción. Stanghellini y cols (2007) demostraron que en las regiones con inviernos suaves, una ventilación pobre puede ser el factor limitante máximo para la producción, debido a la reducción de la concentración interna del CO₂. De hecho, la ventilación en periodos fríos debe compensar los beneficios de reducir la humedad y controlar la temperatura con el perjuicio de reducir el CO₂. Hoy en día el CO₂ se encuentra disponible en muchas regiones de invernaderos, gracias a que viene co-

mercializándose embotellado o comprimido, y su precio tiende a bajar debido al impuesto europeo sobre la emisión de gas carbónico. Stanghellini y cols. (2008, este simposio) compararon distintas estrategias de ventilación y enriquecimiento carbónico y concluyeron que la inyección de CO₂ hasta llegar al menos a la concentración exterior, es una práctica con probabilidades de ser rentable también en invernaderos simples, siempre y cuando la velocidad de inyección se controle en función del grado de apertura de las ventanas.

Aspectos medioambientales en cultivos protegidos

Muchas personas dan opiniones a la ligera sobre los problemas medioambientales. La mayoría de las veces dichas opiniones no se basan en datos sólidos, y por este motivo los sistemas de producción intensivos, como la horticultura de



El simposio fue una excelente oportunidad para todos los participantes de intercambiar información e ideas que permitan reunir y diseminar los conocimientos y experiencias técnicas en esta área.

invernadero, son percibidos por algunos como procesos artificiales y altamente contaminantes. Sin embargo, las evaluaciones ambientales cuantitativas no suelen estar de acuerdo con este punto de vista, entre otras cosas porque dentro de la horticultura intensiva hay modelos productivos muy tecnificados o muy sencillos. Por ejemplo, Muñoz y cols, (2007) hicieron un Análisis del Ciclo de Vida (ACV) para comparar el impacto medioambiental de los invernaderos ver-

sus la producción de tomate al aire libre en regiones mediterráneas. Los resultados demuestran que la producción en invernadero, si es manejada correctamente, tiene un menor impacto ambiental que los cultivos de tomate al aire libre en la mayoría de las categorías de impacto consideradas en la evaluación. Como los impactos ambientales se calcularon en función de los kilos de tomate producidos por cada metro cuadrado de suelo, al ser la producción en invernadero claramente mayor, los impactos por Kg de tomate fueron menores que en la producción al aire libre. Es especialmente significativo señalar la gran ventaja que consiguen los invernaderos situados en regiones semiáridas frente a la producción al aire libre. En el estudio comparativo de Muñoz, el consumo de agua para producir un kilogramo de tomate fue de 24.2 litros para la producción de inverna-

dero y 42.8 litros para la producción al aire libre (Cuadro 1). La tendencia a ventilar menos (usando invernaderos semi-cerrados) podría reducir aún más la cantidad de agua aplicada en el invernadero.

Esto no significa que los invernaderos no tengan una carga negativa sobre el medioambiente. Por ejemplo, las áreas extensas cubiertas con invernaderos crean un gran impacto visual, aspecto especialmente importante en la turística costa mediterránea. Nuestra intención es identificar los factores asociados a la producción de invernaderos que afectan el medio ambiente y sugerir soluciones para atenuar los problemas derivados. Citando nuevamente el trabajo de Muñoz et al. (2007), se observó que la estructura del invernadero tenía la mayor influencia en la categoría de impacto de Cambio Climático, debiéndose las mayores emisiones de CO₂ a la construc-

ción de la propia estructura (uso acero y hormigón). Es posible reducir este impacto al utilizar materiales reciclados o prolongando la vida útil de los materiales empleados. Adicionalmente, el análisis estructural puede ayudar a disminuir la cantidad de materiales de la estructura del invernadero, puesto que, por ejemplo, las estructuras y cimentaciones de los invernaderos locales o artesanales se diseñan más por la experiencia que en base al análisis estructural.

Otros estudios de ACV (Antón, 2004) demuestran que la pro-

ducción y uso de fertilizantes son los principales factores que influyen la carga ambiental asociada a la acidificación y eutrofización. El riesgo de acidificación se debe a las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) y de amoníaco (NH₃) durante el proceso de producción de los fertilizantes, y la eutrofización se debe a la lixiviación de nitratos (NO₃) en el agua. Un estudio realizado sobre producción de flor de corte concluyó que los cultivos sin suelo redujeron la carga del agente contaminante en el ambiente en más del doble con respecto a la producción de suelo (Scarascia Mugnozza y cols, 2007).

Algunos productores han tecnificado el invernadero mejorando la estructura tradicional e introduciendo nuevos equipos como ventilación forzada y/o calefacción. Estas modificaciones, como se ha comentado, aseguran la calidad de

■ **Algunos productores han tecnificado el invernadero mejorando la estructura tradicional e introduciendo nuevos equipos como ventilación forzada y/o calefacción**

la producción, pero aumentan el consumo de energía y de otros recursos, con implicaciones directas en el medio ambiente. Se están realizando estudios de ACV para evaluar el impacto medioambiental de las mejoras tecnológicas en sistemas mediterráneos de invernadero (Antón, resultados sin publicar). Los resultados demuestran que los mayores impactos medioambientales se deben al manejo de los diversos sistemas climáticos, como la ventilación forzada y la calefacción. Para tener el mismo impacto por Kg de tomate producido, el invernadero tecnificado tiene que producir más que el invernadero pasivo. De acuerdo con el indicador de impacto ambiental "Riesgo de eutrofización" el invernadero tecnificado tendría que producir un 10% más que el invernadero pasivo para tener el mismo impacto por Kg de tomate. En cambio, para el indicador "Agota-

Cuadro 1:

Resultados generales del impacto ambiental del invernadero (I) y campo abierto (C) para producir 1 kg de tomates (Muñoz y otros, 2007).

Categorías de Impacto	Unidades	Invernadero	Campo abierto	C/I
Agotamiento de recursos no renovables	Kg Sb eq.	3,65E-04	4,79E-04	1,31
Calentamiento global	Kg CO ₂ eq.	7,44E-02	5,01E-02	0,67
Agotamiento de ozono	Kg CFC-11 eq.	8,97E-09	8,95E-09	1,00
Acidificación	Kg SO ₂ eq.	4,84E-04	6,38E-04	1,32
Eutrofización	Kg PO ₄ ⁻² eq.	1,23E-04	1,52E-04	1,24
Consumo de agua	MJ eq.	0,94	1,19	1,27
water consumption	L	24,24	42,84	1,77

Los invernaderos individuales pueden no alcanzar la meta de cero impacto ambiental, pero agrupándolos en "clusters" van a proporcionar ventajas ambientales adicionales

miento de recursos no renovables" sería necesario que la productividad del invernadero tecnificado fuese 3,5 veces mayor que la del pasivo, aumento difícilmente alcanzable. En general, la alta tecnificación aumenta el impacto ambiental.

El invernadero del futuro tendrá el objetivo de minimizar los impactos en el medio ambiente



(Proyecto Euphoros de la UE). Las condiciones climáticas favorables en climas de invierno suave son el factor más importante en el que se basa la sustentabilidad de los invernaderos pasivos. En estas áreas, el uso inteligente de los recursos naturales disponibles junto con una tecnología bien seleccionada para superar situaciones atmosféricas adversas son factores clave para lograr la sustentabilidad. Para regiones con inviernos suaves, el invernadero del futuro tendrá una buena transmisión de luz, materiales de cubierta específicamente elegidos para cada necesidad del cultivo y una ventilación natural más eficaz y mejor controlada, combinada con una protección contra la entrada de insectos. Las buenas prácticas agrícolas, especialmente las relacionadas con el riego y la fertilización, son imprescindibles para reducir emisiones. El manejo de residuos mediante el compostado de la biomasa y el reciclado de los materiales será obligatorio en los futuros invernaderos sostenibles.

Finalmente vale la pena mencionar que los invernaderos individuales puede que no alcancen la meta de cero impacto ambiental, pero agrupándolos en polígonos o "clusters" pueden proporcionar ventajas ambientales adicionales. Posiblemente el invernadero del futuro sea parte de un complejo con una planta central para tratamiento de agua de irrigación y reutilización de lixiviados, un suministro de energía centralizado, quizás basado en energías renovables, una planta común de tratamiento de desechos para compostaje de biomasa y materiales reciclados y, entre otras características, disponga de unas áreas comunes abiertas y sin cultivo donde se fomente la biodiversidad para compensar la pérdida debido a la ocupación de la tierra por el invernadero.

Resumen

La producción en invernadero del futuro deberá reducir significativamente su impacto ambiental. Para tal efecto, elementos como estructura, materiales de cristal, equipos y controladores del clima, tienen que ser desarrollados y administrados inteligentemente con el fin de mermar la dependencia de los combustibles fósiles, lograr el máximo aprovechamiento de los recursos naturales (radiación solar y agua) y reducir al mínimo la entrada de productos químicos y fertilizantes. Este documento analiza los más recientes cambios en las tecnologías de invernadero para climas de inviernos suaves. En cuanto a las estructuras, se han realizado estudios basados en dinámica de fluidos computacional para investigar el efecto de parámetros tales como el tamaño y disposición de las ventanas, pendiente del techo y anchura y altura del invernadero sobre el intercambio de aire. En la próxima generación de invernaderos se espera incorporar algunas de las innovaciones derivadas de los últimos estudios de ventilación. El cubrimiento de cultivos con mallas porosas se está convirtiendo en una práctica común. Las principales ventajas y limitaciones de los invernaderos de malla se discuten en este documento. El almacenamiento térmico es aplicado cada vez más en invernaderos cerrados o semicerrados. Bajo algunas condiciones los invernaderos semicerrados podrían atenuar la oscilación térmica del día y la noche reduciendo el uso de agua y la entrada de plagas. Las cubiertas foto-selectivas que reflejan una fracción de la radiación NIR son eficaces en la reducción de la temperatura del invernadero y, en algunos casos, pueden ser rentables. La estrategia de enriquecimiento de CO₂ en invernaderos controlados por ordenador esta determinada por el análisis de las ventajas de aumentar la concentración del CO₂ versus el costo requerido. No hay estrategias claras para la aplicación de CO₂ en invernaderos sin calefacción, donde la mayor parte del tiempo la fuente de CO₂ es el aire exterior. Algunos autores sugieren ventilar lo menos posible y fertilizar con dióxido de carbono embotellado hasta alcanzar al menos la concentración exterior. La introducción de nuevas tecnologías puede tener un impacto adicional sobre el medio ambiente. Desde un punto de vista medioambiental, la incorporación de la tecnología necesita incrementar el rendimiento para compensar la carga ambiental asociada. Resultados previos demostraron que la instalación de ventiladores mecánicos y calefactores son los principales causantes del aumento de impacto ambiental en invernaderos de clima controlado. En este documento se discuten también otros estudios en el ámbito de la tecnología hortícola y sus efectos en el medio ambiente.

El incremento de la competencia internacional, los costos de producción y la creciente atención prestada por los consumidores a la calidad del producto y a la sostenibilidad del proceso productivo son los problemas principales que afectarán el desarrollo futuro del cultivo protegido.

Hay que ser optimista puesto que hay suficientes conocimientos para diseñar sistemas de producción provechosos y sostenibles. Es hora de continuar desarrollando soluciones tecnológicas y ambientales, de diseminar la experiencia y conocimientos disponibles y de tomar medidas para eliminar los obstáculos que dificultan la aplicación de las soluciones medioambientales existentes.

Para saber más...

- Encontrará más información y otros artículos relacionados con el tema en la Plataforma Horticom, www.horticom.com
- La información de este artículo está extraída del Simposio Internacional sobre estrategias de sostenibilidad en cultivo protegido en climas de invierno suave de la Sociedad Internacional de Ciencias Hortícolas (ISHS)
- Traducción Jorge Luis Alonso

