

DESARROLLO DE ESTRUCTURAS PARA INVERNADEROS

*Juan I. Montero
(IRTA)*

RESUMEN

Este artículo presenta un “estado del arte” referido a las estructuras de invernadero. Se analizan las repercusiones que sobre la luminosidad, la ventilación y otras variables internas del cultivo tienen los diversos diseños de invernadero. Asimismo, se discute cuáles son los más convenientes para las condiciones ambientales del área mediterránea.

SUMMARY

This article presents a "state of the art" referred to the greenhouse structures. We analyze the impact of various greenhouse designs on the light, ventilation and other internal variables of the crop. We also discuss which are most suitable for environmental conditions in the Mediterranean area.

1. Introducción

La horticultura mediterránea está ubicada en una zona de inviernos suaves con abundancia de iluminación natural; el clima favorable ha permitido el desarrollo de invernaderos relativamente económicos, adaptados a las condiciones locales y con pocos sistemas de climatización aparte de la ventilación natural. Las condiciones de cultivo en dichas estructuras están con frecuencia alejadas del óptimo, pero aunque las producciones sean inferiores a las de los invernaderos muy tecnificados de zonas más frías, el modelo de invernadero sencillo es el más extendido en el Mediterráneo por su mayor rentabilidad (Castilla, 2005).

Este capítulo repasa brevemente las características de distintos tipos de invernaderos y hace hincapié en el invernadero sencillo, pasivo (esto es, con bajo consumo de energía para calefacción o mantenimiento), sin alto nivel tecnológico pero bien pensado para aprovechar los recursos naturales de la costa mediterránea, como son la luz y el clima. Por ello el capítulo discute especialmente la transmisión de luz y la ventilación de las estructuras de invernaderos.

2. Principales tipos de estructuras en el mediterráneo

2.1. Invernaderos autóctonos

La mayoría de las 150.000 Has. aproximadamente de invernaderos en la cuenca mediterránea son de tipos autóctonos, construidos con la experiencia en el uso de los materiales locales de los instaladores de cada zona. En muchos casos, en el diseño de estos invernaderos ha predominado la tradición constructiva de una zona determinada sobre la racionalidad científico-técnica. En el conjunto de invernaderos mediterráneos la madera es el elemento estructural más extendido, y la película de polietileno de distintas propiedades ópticas y mecánicas es el material de cubierta por excelencia.

El invernadero parral y sus versiones derivadas del diseño original plano es el ejemplo más extendido de invernadero autóctono. Sólo en Almería hay aproximadamente 27000 del tipo parral y de su variante de “raspa y amagado” (EFSA, 2009). Sus características constructivas pueden consultarse en diversas fuentes bibliográficas (por

ejemplo, Pérez-Parra, 1998). Desde que en 1961 se cubrieran con plástico los primeros parrales, este invernadero ha tenido un impacto enorme en el desarrollo socio-económico de Almería, así como también en muchos otros países del mundo. El parral ha alcanzado un balance positivo en términos de coste-beneficio y ha permitido la creación de pequeñas empresas familiares (que poco a poco han ido creciendo) debido a la baja inversión inicial.

Sin embargo, bajo el punto de vista técnico todos los tipos de invernaderos autóctonos tienen una serie de limitaciones que conviene señalar y que se resumen en tres puntos:

- La transmisión de luz es baja, sobre todo en las estructuras con techos de poca pendiente (este asunto se discute más adelante).
- Ventilación mal: la superficie de ventanas es muy reducida y el tipo de ventanas (plástico enrollado) suele ser poco eficaz. Con frecuencia no se guarda apenas distancias entre invernaderos, lo que reduce el intercambio de aire (Figura 1).
- En periodos fríos suelen tener exceso de humedad por goteo de la condensación y a veces por entrada de lluvia.

Como consecuencia las producciones son comparativamente bajas y la calidad depende mucho de las condiciones meteorológicas. Posteriormente se marcan pautas para la mejora de la transmisión de luz y de la ventilación.



Figura 1. Invernaderos parral en Almería con alta ocupación del suelo

2.2. Invernaderos industriales con cubierta plástica

Este grupo incluye una variedad de estructuras generalmente de acero galvanizado, aunque la que más predomina es la de naves adosadas estructura arqueada multitúnel. La cubierta del techo es de filme plástico mientras que los frontales y laterales pueden ser de lámina plástica semi-rígida, como por ejemplo de policarbonato. Es la estructura preferida en el mediterráneo norte (Valencia, Barcelona, sur de Francia y norte de Italia) para producción de hortalizas, flor cortada y plantas ornamentales. En Israel también se prefiere el invernadero industrial a los autóctonos. En Almería se utiliza poco (alrededor del 2 % de la superficie cubierta, EFSA 2009) y lo emplean sobre todo las empresas de semilleros y ornamentales.

Los multitúneles ventilan mejor que los parrales. Suelen tener una ventana cenital por cada nave de invernaderos, aunque a veces tienen dos ventanas en cumbre (Figura 2) lo cual es muy conveniente en condiciones de viento débil aunque no tan útil con brisas moderadas, como se discutirá más adelante. Algunos constructores instalan las ventanas del techo alternando la dirección de apertura a izquierda o derecha, pero tal práctica no tiene base científica alguna y por tanto no es recomendable (Baeza, 2007)

Son invernaderos más estancos y pueden climatizarse (calefacción, ventilación forzada, refrigeración por evaporación, pantallas de sombreado y de ahorro de energía, enriquecimiento carbónico, etc.). Los invernaderos industriales suponen un salto cualitativo frente al grupo de invernaderos autóctonos; con todo no están exentos de problemas:



Figura 2. Invernadero multitúnel con ventana cenital doble y paredes frontales de policarbonato

- La condensación. Se acumula en la parte superior del arco donde es difícil de eliminar. Reduce la transmisión de luz (del orden del 9 %, Stanghellini y Montero 2010) y gotea sobre el cultivo. Los invernaderos comerciales de techo puntiagudo o gótico han disminuido, pero no resuelto, este problema.
- La ventilación es insuficiente cuando hay mallas anti insectos en las ventanas. El diseño del sistema de ventilación debe mejorarse.
- El coste sólo de la estructura ronda los 18 €/m² para superficies cubiertas mínimas de 1 Ha (Euphoros, Deliverable 5, 2011).

2.3. Invernaderos de vidrio

Son las estructuras típicas de países fríos, y el modelo más característico es el Venlo holandés. Se suelen construir en grandes superficies para disminuir costes de instalación y ahorrar energía: por ejemplo, la superficie media en Holanda es de 1,5 Ha con tendencia a aumentar (Bunschoten & Pierik, 2003).

Bajo el punto de vista técnico el invernadero Venlo es excelente, con la única objeción de que la ventilación debe adaptarse a las condiciones del sur de Europa: En zonas más frías los Venlo tienen ventanas del techo discontinuas y no tienen ventilación lateral. En zonas más cálidas se recomienda la ventana del techo continua a lo largo de la longitud del invernadero. También se recomienda combinar la ventilación cenital con la lateral, particularmente en condiciones de viento débil como demuestra el trabajo de Baeza *et al.* (2009).

En los países del Sur de Europa la superficie con cubierta de vidrio es muy escasa. En España no llega al 1 %, y en Almería todavía menos. La razón es obvia: el coste sólo de la estructura es aproximadamente el doble que el del multitúnel (Vanthoor, 2011). Un estudio reciente demuestra que, en clima mediterráneo, el Venlo con equipos de climatización es más rentable que ningún otro tipo de invernadero (Vanthoor, 2011). Para ello es preciso que los precios de los productos hortícolas sean estables y que la financiación de las instalaciones no sea un factor limitante. Como ambas circunstancias son difíciles de mantener, el agricultor opta por inversiones menores con la vista puesta a corto o medio plazo y no elige el invernadero de vidrio.



Figura 3. Invernadero de vidrio modelo Venlo holandés. A veces la altura bajo canal llega a los seis metros

3. La transmisión de luz

En la transmisión de luz del invernadero intervienen una serie de factores: las características del material, la orientación del invernadero, la pendiente del techo y los elementos opacos de la estructura (arcos, piezas de fijación, etc.).

En cuanto al material de cubierta otro capítulo de este libro se ocupará de esta materia. Baste aquí decir que los materiales transmiten la máxima radiación solar cuando ésta incide perpendicularmente al material, y que la transmisión cae notablemente a partir de ángulos de incidencia de 45 a 60 °C en función de las características del material. También conviene recordar que, según datos de campo medidos en la costa de Granada (Montero *et al.*, 2001) la acumulación de polvo reduce la transmisión del orden del 6-7 % en plásticos tricapas y del orden del 20 al 30 % en las mallas anti-insectos en función de la porosidad (las mallas menos porosas acumulan más polvo y pierden mayor porcentaje de transmisión).

3.1. Orientación y pendiente del techo del invernadero

En cuanto a la orientación y pendiente del invernadero y su efecto en la transmisión de luz, la Figura 4 ilustra la relación entre estas variables (Castilla, 2005). Son cálculos hechos para la latitud del sur peninsular (37 °C) para invernaderos de techos planos. La Figura 4a compara la transmisión a lo largo del año (de diciembre a junio) de dos invernaderos de pendiente 10 °C (aproximadamente la de los tipos raspa y amagado),

uno de ellos con el eje longitudinal orientado de norte a sur (N-S) y el otro con el eje este-oeste (E-O). Puede verse que en invierno la orientación E-O supera en un 5 % aproximadamente a la N-S, mientras que en junio ocurre lo contrario. En verano se suele sombrear el invernadero, por lo que la transmisión de luz en estos meses no es de interés. En cualquier caso, para esta pendiente de techo las diferencias no son muy grandes.

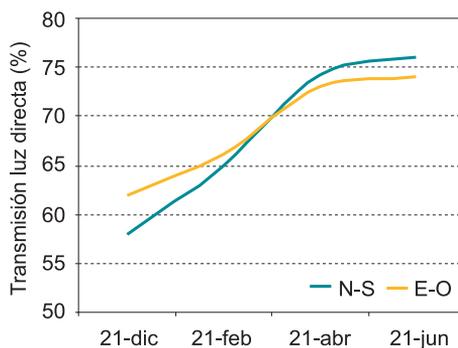
La Figura 4b compara invernaderos de 30 °C de pendiente. En este caso puede observarse que, en los meses de invierno, la orientación E-O transmite del orden de un 15 % más de luz que la N-S. Conforme avanza la estación las transmisiones se acercan, y a partir de abril las diferencias no tienen valor en la práctica.

Comparando las Figuras 4a y 4b se comprueba que los invernaderos de mayor pendiente transmiten más luz en los meses invernales, y por tanto son recomendables sobre los planos o de escasa pendiente. Uno de los motivos de que las producciones en Almería no sean altas es la mala transmisión de luz de la mayoría de las estructuras locales.

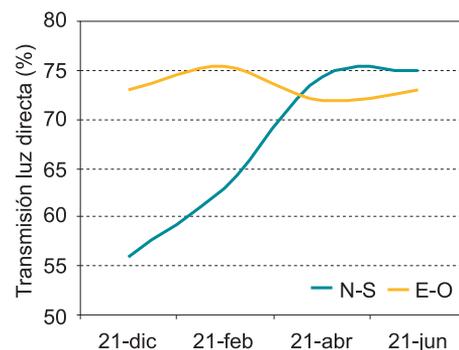
Castilla (2005) comparó distintas pendientes entre 11 y 45 °C con estructuras simétricas y asimétricas, y llegó a la conclusión de que los invernaderos simétricos con pendientes entre 25 y 30 °C son un buen compromiso entre transmisión de luz y coste constructivo. Ésta es la regla general y éstas son las pendientes a respetar; con todo hay algunas estructuras especialmente pensadas para recoger la condensación del techo. Dichas estructuras tienen pendientes mayores, del orden de 45 °C, como se discutirá más adelante.

Figura 4. Transmisión de luz directa en invernaderos con orientación Norte-Sur y Este-Oeste para la latitud 37° Norte

a) Pendiente del techo 10°



b) Pendiente del techo 30° (Castilla, 2005)



Por tanto la orientación E-O es mejor que la N-S en cuanto a la transmisión de luz en invierno. Sin embargo, hay razones que matizan esta afirmación:

- La uniformidad de la luz es mejor en los invernaderos N-S, puesto que las sombras principales de la estructura (las producidas por el canalón y las mallas anti-insectos de las ventanas cenitales) se desplazan a lo largo del día con el movimiento del sol.
- La ventilación es mayor cuando las ventanas cenitales son perpendiculares a la dirección del viento. Por tanto, a veces puede haber conflicto de intereses entre la mejor orientación para transmitir luz o para ventilar.
- En situaciones de conflicto debe estudiarse si es posible mantener la orientación E-O y aplicar medidas compensatorias para aumentar la ventilación (ventanas en los frontales, aumento de superficie de ventanas cenitales, etc.)
- En cualquier caso, independientemente de la orientación del invernadero las líneas de cultivo deben estar orientadas N-S para que el cultivo se desarrolle uniformemente.

3.2. Forma del techo: asimétrico, simétrico de techos planos y curvo

Desde los primeros estudios de los sesenta se han publicado diversos análisis comparativos de la transmisión de luz de distintas formas de invernadero, a veces con resultados contradictorios. En España, Castilla *et al.* (1994) realizaron un estudio comparativo de la transmisión de un invernadero parral de techo plano y de otro con cubierta a dos aguas asimétrica (8° sur-18 ° norte). El resultado fue que el modelo asimétrico mejoraba la transmisividad global y reducía la heterogeneidad espacial.

Más tarde, con el objetivo de optimizar la forma del techo de los invernaderos para la latitud 37° N, Soriano *et al.* (2004) estudiaron varias combinaciones de pendiente de cubierta. El estudio concluyó que el incremento de la pendiente aumentaba la transmisividad del invernadero, y además demostró que los modelos asimétricos no mejoran sustancialmente la transmisividad con respecto a los simétricos de alta pendiente. Como además los asimétricos son más caros, la gran mayoría de invernaderos tienen techo simétrico.

En cuanto a la comparación de techos planos simétricos (tipo parral de alta pendiente) y techos curvos, Hernández Barros (2009) hizo un estudio exhaustivo de dos invernaderos E-O con pendiente de 26 °C aproximadamente (para el curvo se consideraba la pendiente como la formada por la recta que une el canalón con la cumbrera y la horizontal). Los resultados de la tesis doctoral de Hernández Barros se pueden resumir así:

- La integral o suma de radiación transmitida en el periodo octubre-marzo fue muy similar en ambas estructuras, aunque en días soleados y en algunos meses del año se midieron pequeños aumentos (4 a 5 %) en el invernadero curvo. En parte estas posibles diferencias pueden deberse a errores experimentales por la posición de los medidores de radiación solar.
- En cuanto a la uniformidad de la radiación los modelos de cálculo pronosticaron la existencia de zonas de baja radiación o sombreado en los extremos de las capillas curvas, cosa que no ocurre con la misma intensidad en los invernaderos de techos planos inclinados.
- En cuanto al régimen de temperatura y humedad, el régimen térmico fue muy similar, mientras que la humedad fue más elevada en el techo curvo. En este sentido se observaron diferentes cantidades de condensación en las mañanas proclives a ello: la condensación permaneció más tiempo en el curvo que en el plano debido en parte a la forma del techo y en parte a la mayor estanqueidad del invernadero curvo.
- En cuanto a la respuesta del cultivo se observaron distintas zonas de desarrollo en función de los niveles de radiación solar. Sin embargo la producción final comercial no fue significativamente diferente.

Como conclusión global este estudio señala que para cultivos con manejo pasivo (sin calefacción ni otro tipo de control climático), en la costa mediterránea andaluza el parral de techo simétrico y pendiente de 26 °C es igual de productivo y más económico que el multitúnel, y por tanto es más recomendable.

Muy probablemente un parral evolucionado sobre los que ya existen, es decir, bien orientado, con mucha mayor pendiente del techo y sobre todo, con mucha más ventilación es un invernadero de gran interés para la producción de hortalizas en Almería, siempre y cuando no se usen equipos de climatización como la calefacción, que en los parrales es muy ineficaz. Sin embargo puede ocurrir que con tantas mejoras estructurales el coste final del parral sea parecido al del multitúnel, con lo cual a igualdad de precio las estructuras industriales tienen ventajas sobre las construidas localmente.

4. La ventilación natural

4.1. Introducción

La ventilación es un aspecto crucial en los invernaderos de zonas cálidas, porque de ella depende más que de ningún otro factor el control de la temperatura, humedad y concentración de CO₂. La ventilación mecánica controla el intercambio de aire del invernadero con el aire exterior con independencia de las condiciones meteorológicas. Sin embargo los invernaderos con ventilación mecánica son testimoniales. En cambio la ventilación natural de un modo u otro está presente en todos los invernaderos.

La ventilación es debida a la diferencia de presión del aire a ambos lados de las ventanas. La diferencia de presión tiene dos causas: efectos eólicos y efectos térmicos.

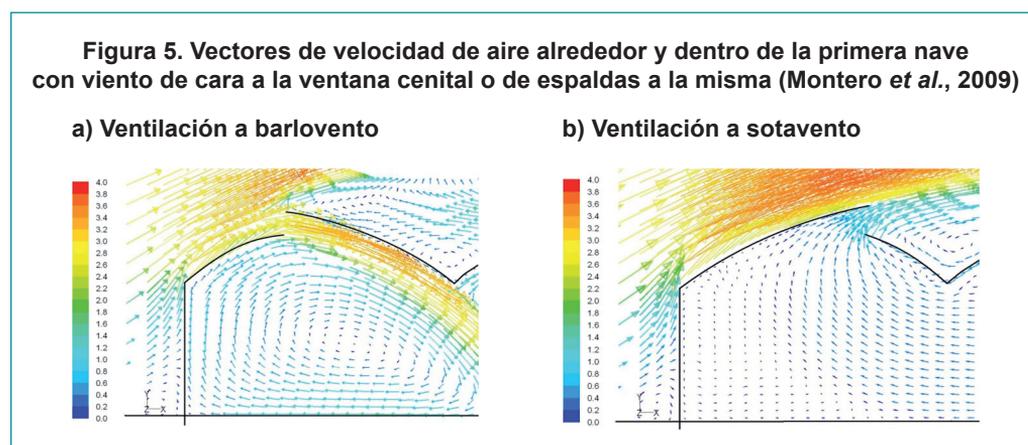
- Efectos eólicos: el viento crea un campo de presiones sobre la estructura, con zonas de presión positiva y negativa. Además, el viento tiene un carácter fluctuante, pues no mantiene una velocidad y una dirección constantes. La mayoría de estudios señalan que el intercambio de aire es directamente proporcional a la velocidad del viento.
- Efectos térmicos. Si el aire del invernadero está a diferente temperatura que el exterior también tiene diferente densidad y diferente presión. Si el viento exterior es muy débil el aire del invernadero tiende a estratificarse, con el aire más cálido y menos denso en la parte superior. En esas condiciones el aire tiende a salir por las ventanas más altas del invernadero y a entrar por las más bajas

El efecto eólico predomina sobre el térmico en la gran mayoría de casos. Hay estudios que demuestran que a partir de vientos de 2 m s^{-1} el efecto térmico puede despreciarse (Bot, 1983). Sin embargo en condiciones de vientos muy débiles es cuando predomina la ventilación térmica y es importante diseñar el sistema de ventilación para que el invernadero pueda responder bien en estas circunstancias (Baeza *et al.*, 2009).

En lo que sigue se discuten distintos aspectos de la ventilación natural de los invernaderos en base a dos tesis doctorales llevadas a cabo en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar, la primera sobre el análisis del invernadero parral (Pérez Parra, 2002) y la segunda, continuación de la primera, sobre la optimización de la ventilación de dichos invernaderos (Baeza, 2007).

4.2. Ventanas cenitales a barlovento o a sotavento

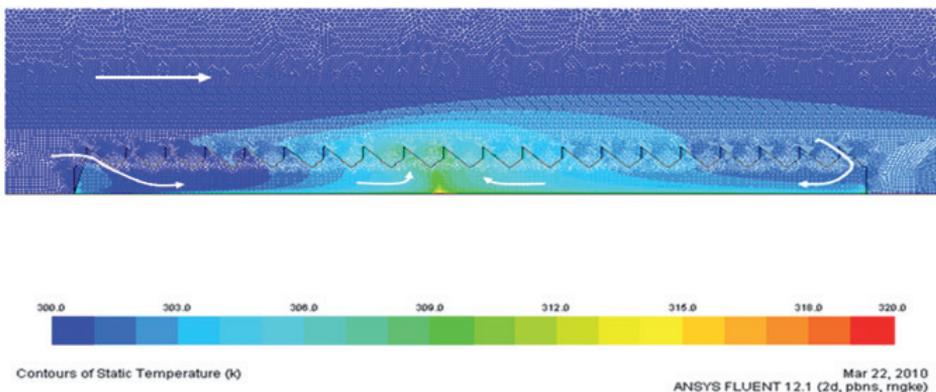
Si los laterales están cerrados, el flujo de aire en el invernadero es muy distinto cuando las ventanas del techo están abiertas de cara a los vientos dominantes (barlovento) o de espaldas a los mismos (sotavento). La Figura 5 ilustra este hecho. Se muestran los campos de velocidad obtenidos con la técnica CFD del aire fuera y dentro de la primera nave. Las zonas de color naranja o rojo son las de más velocidad, y las verdes y azules las de menos.



Con la ventilación a barlovento (Figura 5a) la ventana cenital “captura” el aire exterior: se forma una zona de recirculación en la primera nave, pero la mayoría del aire entrante se desplaza hacia las otras naves en el mismo sentido que el aire exterior. La ventana cenital de la primera nave es la más importante en cuanto a la entrada de aire de todo el invernadero. Con ventilación a sotavento el aire exterior se acelera cerca de la ventana cenital: a mayor velocidad del aire menor es su presión (principio de la conservación de la cantidad de movimiento), por tanto hay una zona de presión negativa en la primera ventana que hace que el aire salga del invernadero. El aire interior se desplaza en sentido contrario al aire exterior.

Cuando los laterales están abiertos no es tan importante la orientación de las ventanas del techo, porque la ventana lateral tiene mayor efecto en la ventilación que las cenitales, sobre todo si el invernadero es relativamente estrecho los laterales son mucho más importantes en invernaderos estrechos que en anchos, Baeza *et al.*, 2009). Una limitante de la ventilación a barlovento es la anchura del invernadero; la Figura 6 ilustra la distribución de temperatura en un invernadero de 100 m de ancho con ventanas a barlovento. El aire exterior más frío va recorriendo el invernadero y se va calentando. Por este motivo se pueden formar bolsas de calor en las zonas centrales de invernaderos anchos que se pueden limitar si se acorta la distancia entre laterales.

Figura 6. Mapa de temperatura en un invernadero de 100 m de anchura con ventilación a barlovento. Se observan zonas más cálidas en el centro del invernadero. (Montero, 2010)



Respecto a la orientación de las ventanas se puede concluir lo siguiente:

- La ventilación es mayor con las ventanas cenitales a barlovento (casi el doble según los trabajos citados). Por ello es recomendable en países cálidos
- La ventilación a sotavento produce un movimiento interior del aire más uniforme, además de ser más segura en cuanto a los posibles daños del viento en las ventanas. Por eso suele preferirse en países más fríos.
- Con ventilación a barlovento, o con ventanas laterales abiertas, debe limitarse la anchura de los invernaderos (orientativamente a 50 m) para evitar zonas de calor en el centro de los invernaderos.

4.3. Ventanas cenitales enrollables o abatibles

En los invernaderos, sobre todo en los parrales, la mayoría de ventanas son enrollables o abatibles. Las primeras se abren o cierran por la rotación de un eje que enrolla o desenrolla el plástico mientras que las segundas tienen un mecanismo basculante de apertura y cierre generalmente accionado por un motor eléctrico (Figura 7).

Figura 5. Vectores de velocidad de aire alrededor y dentro de la primera nave con viento de cara a la ventana cenital o de espaldas a la misma (Montero y col, 2009)

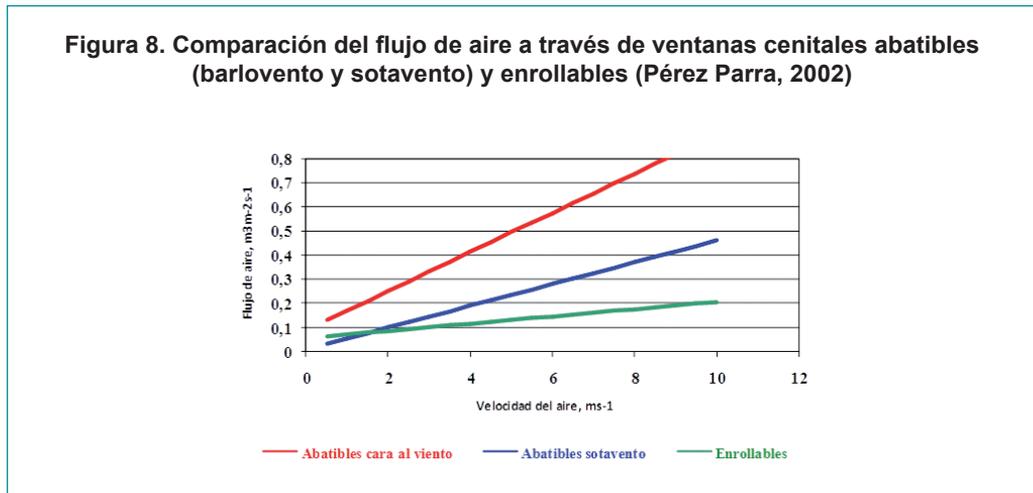
a) Ventanas abatibles en techo y enrollables en laterales



b) Enrollables en techo



En el techo, a igualdad de superficie de ventilación las ventanas abatibles son más eficaces que las enrollables (Figura 8, Pérez parra, 2002). La Figura 8 muestra el flujo de aire por unidad de superficie de ventana en función de la velocidad del viento.



Los resultados de la comparación se pueden resumir así:

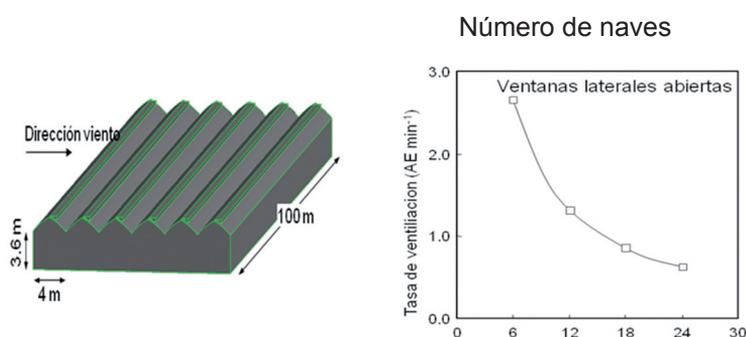
- En todas las ventanas la ventilación aumenta proporcionalmente con el viento exterior.
- En el techo, las ventanas abatibles a barlovento prácticamente doblan la ventilación de las ventanas a sotavento.
- La orientación de las del tipo enrollables a barlovento o sotavento no tuvo ningún efecto práctico.
- Independientemente de su orientación las abatibles en el techo ventilan mejor que las enrollables y por tanto son recomendables.
- Para las ventanas laterales (datos no mostrados en la Figura) las enrollables frenan menos la entrada y salida del aire (mayor coeficiente de descarga)

4.4. Importancia de la ventilación lateral

En comparación con la ventilación cenital, las ventanas laterales aumentan enormemente la ventilación del invernadero y son esenciales tanto en condiciones de vientos nulos o débiles (Baeza *et al.*, 2009) como en condiciones de vientos moderados (Kacira *et al.*, 2004). Se recomienda vivamente el uso combinado de ambas ventanas, laterales y cenitales.

La Figura 9 muestra la tasa de ventilación (en intercambios de aire por minuto) en función del número de naves del invernadero. En este estudio la anchura de las naves fue de 4 m, parecida a las naves del invernadero Venlo. Puede verse que la tasa de ventilación disminuye con la anchura del invernadero, porque conforme aumenta el número de naves aumenta el volumen del invernadero pero la superficie de ventanas laterales es la misma en todos los casos. Aún así, incluso en invernaderos de 24 naves (96 m de ancho en este caso) la ventilación lateral tuvo más importancia que la ventilación cenital sola. Además es más económico construir una ventana lateral que una cenital.

Figura 9. Tasa de ventilación en función del número de naves. Kacira (2004)

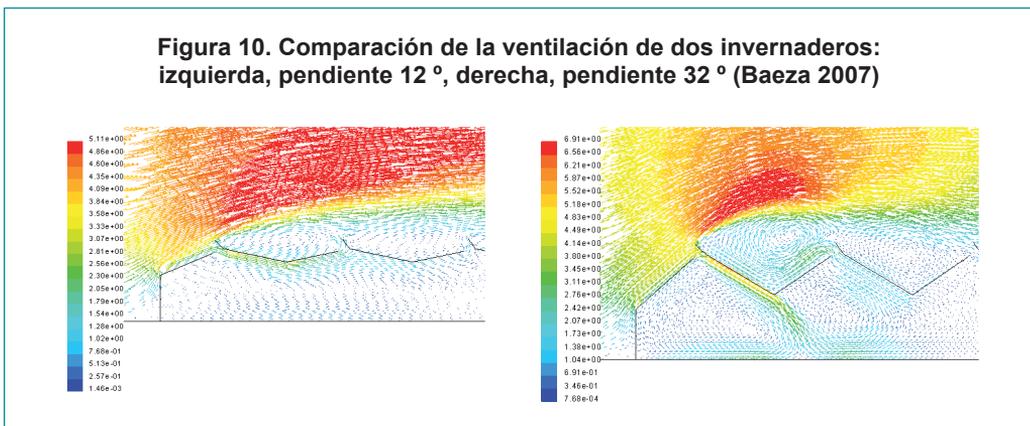


Sin embargo algunos agricultores son reacios a abrir las ventanas laterales para evitar daños del viento en los cultivos o para disminuir la incidencia de plagas. Por este motivo algunos diseños de invernaderos incorporan deflectores que redirigen el aire y protegen al cultivo. Más adelante se discutirá el uso de deflectores.

4.5. Pendiente del techo

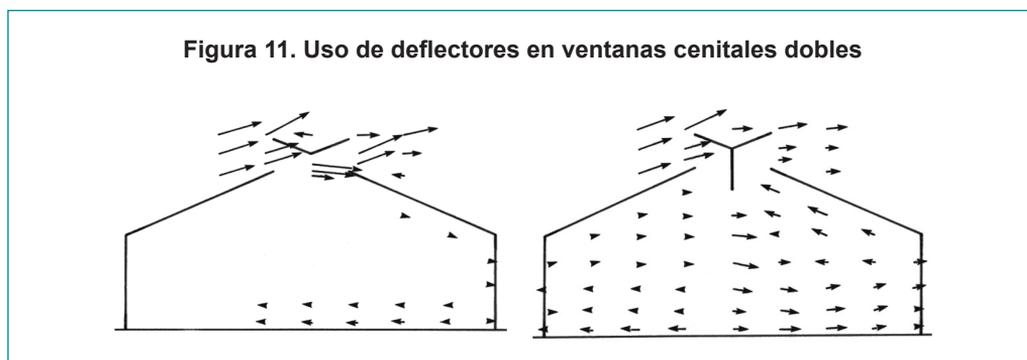
La pendiente del techo tiene importancia en la ventilación. Baeza (2007) comparó la ventilación de parrales con pendientes desde 12° hasta 32° y observó que la ventilación aumenta al aumentar la pendiente, bien es verdad que a partir de 25° de pendiente el aumento de la ventilación fue escaso. La Figura 10 compara invernaderos de 12° y de 32° ; en el primer caso gran parte del aire entrante por la primera ventana sale por la segunda sin mezclarse apenas con el aire interior. En cambio, en el invernadero de mayor pendiente el techo actúa a modo de deflector, dirigiendo el aire entrante hacia la zona de cultivo.

La recomendación es clara: deben desecharse los invernaderos planos o de escasa pendiente. Curiosamente este consejo también atañe a la transmisión de luz, y por tanto es doblemente recomendable construir invernaderos de al menos 25° de pendiente.



4.6. Uso de deflectores

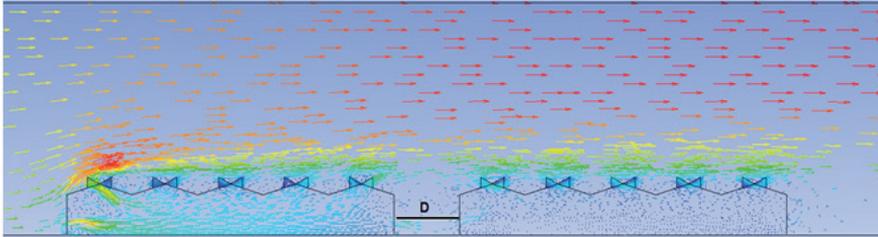
Las ventanas dobles o de mariposa actúan muy bien en condiciones de vientos débiles. Sin embargo en condiciones de viento el aire externo puede pasar de un lado al otro de la ventana sin entrar en el invernadero. Por este motivo algunos autores como Nielsen (2002) recomiendan el uso de deflectores en las ventanas dobles (Figura 11). Es buena solución técnica aunque no es siempre práctica, ya que se trata de construir una pantalla vertical transparente en la cumbre de cada nave. Otra opción posible es gestionar la apertura y cierre de ventanas de otra manera: en lugar de abrir y cerrar los dos lados al mismo tiempo se puede abrir uno u otro lado en función de la dirección del viento, y en caso de viento muy débil se pueden abrir los dos lados para dejar escapar el aire por efecto térmico.



4.7. Distancia entre invernaderos y su efecto en la ventilación

Si hay dos o más invernaderos próximos el primer invernadero que recibe el viento actúa de “pantalla sobre los demás. La Figura 12 muestra el campo de velocidad del aire en el exterior e interior de dos invernaderos. Las zonas de color rojo son las de mayor velocidad y las azules las de menos. El viento exterior va de izquierda a derecha, incide sobre el primer invernadero y deja al segundo en una especie de “sombra”. En consecuencia la ventilación del segundo invernadero es más débil.

**Figura 12. Velocidad del aire en dos invernaderos.
El invernadero de la izquierda obstruye el movimiento del aire sobre el de la derecha**

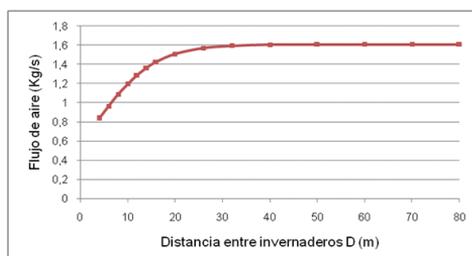


¿Qué distancia sería recomendable guardar entre invernaderos? ¿Qué anchura deben tener estos? ¿Cómo afecta el tamaño del obstáculo a la ventilación? Estas preguntas no se pueden responder a ciencia cierta todavía. Los estudios más recientes (Euphoros, deliverable 14, 2011) aportan algo de luz a este problema.

La Figura 13 muestra la ventilación del segundo invernadero (el obstaculizado) en función a la distancia D entre ellos. La Figura se refiere sólo al invernadero multitúnel con ventanas a barlovento y velocidad del viento exterior de 3 m/s, aunque otros tipos de invernaderos presentan un comportamiento parecido. Puede verse que cuando la separación D es pequeña (por ejemplo 4 m) el flujo del aire del segundo invernadero es de 0,8 Kg/s. Conforme aumenta la distancia aumenta la ventilación, hasta llegar a una distancia de 30 m para la que la ventilación es de 1,6 Kg/s, es decir, el doble que cuando la separación era de 4 m. A partir de 30 m de separación no se observan diferencias apreciables.

Por tanto la situación ideal sería dejar unos 30 m de distancia entre invernaderos. En zonas como la costa mediterránea no es posible mantener estas distancias. Por tanto conviene compensar la reducción de la ventilación con mejoras en el diseño de los sistemas de ventilación.

Figura 13. Ventilación de un invernadero multitúnel en función de la distancia de separación con un obstáculo al viento



Lo dicho hasta ahora respecto a la ventilación natural se puede resumir así:

- La mejora de la ventilación es un aspecto crítico para lograr que la horticultura mediterránea bajo invernadero siga avanzando.
- Las ventanas a barlovento producen mayor intercambio de aire que las ventanas a sotavento, y por ello son preferibles. Deben protegerse con automatismos para evitar roturas por rachas de viento.
- La combinación de ventanas laterales y cenitales es muy recomendable, incluso en invernaderos de grandes dimensiones (más de 100 m de ancho).
- Se aconseja limitar la anchura de los invernaderos a no mucho más de 50 m.
- Se recomienda aumentar la pendiente del techo del invernadero (no menos de 25° de pendiente).
- Se recomienda aumentar el tamaño y número de las ventanas, muy por encima de la superficie de ventanas de los invernaderos de raspa y amagado.
- El uso de deflectores o la gestión independiente de las ventanas dobles del techo es también recomendable.
- En lo posible, guardar distancias de separación entre invernaderos.

5. Nuevos tipos de invernaderos

5.1. Invernaderos semi-cerrados

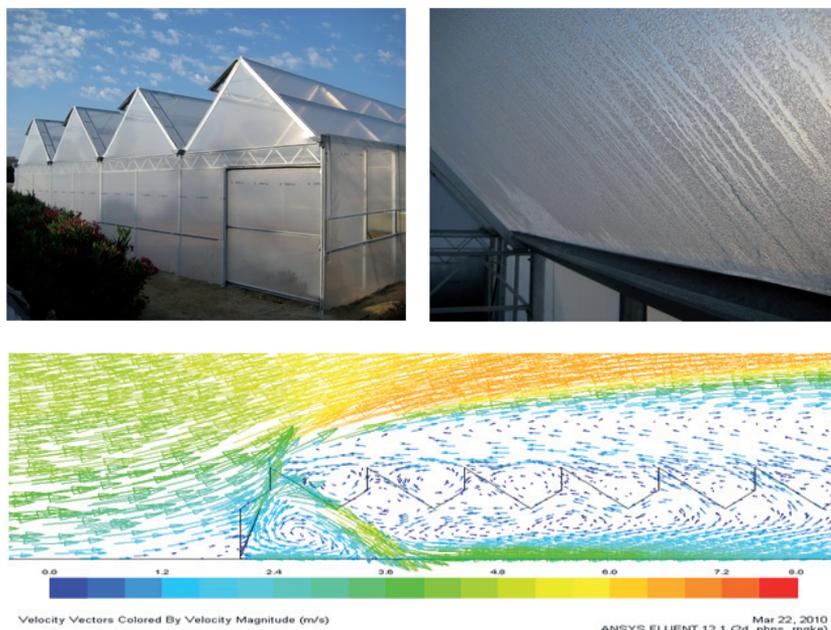
Mantener el invernadero más tiempo cerrado presenta una serie de ventajas:

- Es posible mitigar la oscilación térmica del día a la noche si parte del calor sobrante durante el día se almacena para ser usado durante la noche.
- El consumo de agua se reduce considerablemente. En algunos casos el vapor de agua puede condensarse y usarse de nuevo para el riego. Además al ser el ambiente más húmedo la demanda hídrica es menor.
- Al estar el invernadero más tiempo cerrado se puede aplicar durante mayor número de horas el enriquecimiento carbónico (Stanghellini *et al.*, 2008)
- El invernadero cerrado evita la entrada de plagas, con la consiguiente reducción de tratamientos químicos.

El inconveniente principal es la mayor humedad ambiental, causante de pérdidas en la calidad y la cantidad de los productos hortícolas (Baptista, 2007). Sería deseable que el invernadero fuera capaz de recoger la condensación del techo para evitar el goteo sobre el cultivo.

En el IRTA (Cabrils, Barcelona) se ha desarrollado un invernadero que pretende estar más horas cerrado en los meses fríos. Se ha diseñado con gran pendiente en el techo (45°) y naves más estrechas (4,8 metros). Del canalón al suelo este invernadero es muy parecido al Venlo holandés, aunque el techo es diferente. Debido a la pendiente la condensación escurre hacia los canales de recogida.

La ventilación también tiene algunos rasgos de interés: por una parte aumenta el número de ventanas, porque las naves son más estrechas y cada nave cuenta con una ventana cenital. Por otra parte, como puede verse en la Figura 14, el techo de la primera nave actúa como deflector y redirige el aire entrante hacia la zona de cultivo.

Figura 14. Invernadero de pendiente de 45° para escurrir la condensación. Irta. Cabrils

Las nuevas estructuras anti condensación con gran superficie de ventanas aumentan la temperatura en periodos fríos y controlan el exceso térmico en periodos cálidos. Son por tanto de gran interés en la mejora de los invernaderos pasivos mediterráneos.

5.2. Inversos (Fundación Cajamar)

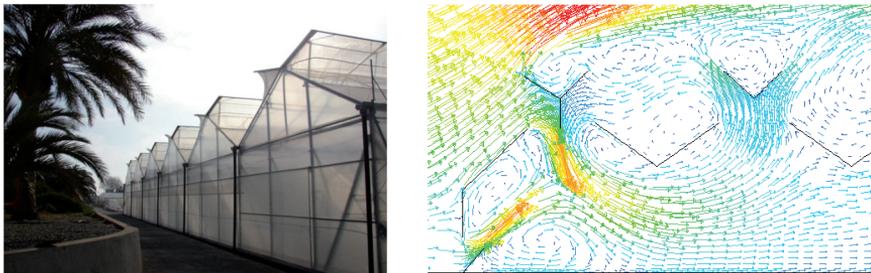
El invernadero Inversos (Figura 15) recoge muchas de las mejoras estructurales recomendadas anteriormente. Desde el canalón hasta el suelo el Inversos se parece mucho al multitúnel. El techo es de caras planas, pero lo que diferencia a esta estructura frente a las demás es sobre todo su superficie de ventilación cenital, con ventanas dobles de 1,9 m cada una. Hay dos Inversos construidos en la finca de la Estación Experimental de la Fundación Cajamar. El segundo tiene ventanas cenitales ligeramente más pequeñas para evitar posibles aleteos del plástico en la zona de mayor exposición al viento.

Debido esencialmente a la mejora de la ventilación, en comparación con las estructuras tradicionales el Inversos alarga el ciclo de producción, evita o disminuye enormemente la necesidad de sombrear, y sin la ayuda de la calefacción ni de ninguna otra técnica de climatización logra producciones anuales superiores a los 30 Kg/m² en tomate (aún superiores si se usa el “intercropping” es decir, plantando el siguiente cultivo antes de que termine el primero).

El Inversos es una demostración de que la investigación no es sólo útil sino imprescindible. Las innovaciones no salen de la nada, sino del trabajo de muchos años y de muchas personas con formación científica y técnica muy especializada. Las innovaciones no surgen de la improvisación sino del trabajo inteligente, independiente y sereno: después de muchos años de estudio se llega a diseñar, construir y evaluar una estructura que funciona muy bien y que tiene un coste asequible. Este esfuerzo necesita ser financiado en su mayoría con dinero público, pues es la única manera de hacer investigación independiente de intereses particulares, así como distanciada del “cortoplacismo” con miras a lo inmediato.

El invernadero Inversos, así como otros desarrollos asociados a la producción en invernadero, es una demostración de que la horticultura sur mediterránea española tiene a la mano el poder dar un salto cualitativo mediante la aplicación de tecnología desarrollada en la propia zona.

Figura 15. Invernadero Inversos: esquema de la ventilación



Referencias bibliográficas

- 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.
- Baeza, E. J.; Perez-Parra, J.; Montero, J. I.; Bailey, B.; Lopez, J. C. y Gazquez, J. C. (2009): "Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation in parral-type greenhouses with and without insect screens using computational fluid dynamics"; *Biosystems Engineering*, 104 (1); pp. 86-96.
- Baptista, F. (2007): "Modelling the climate in unheated tomato greenhouses and predicting"; *Botrytis Cinerea* infection. PhD Thesis. Universidade de Évora.
- Bot, G. P. A. (1983): "Greenhouse climate: from physical process to a dynamic model". *PhD dissertation*, Agricultural University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands.
- Bunschoten, B. y Pierik, C. (2003): Kassenbouw neemt weer iets toe. CBS Webmagazine (Centraal Bureau voor de Statistiek) Available from: <http://www.cbs.nl/nl-NL/default.htm>
- Castilla, N. y Lopez Galvez, J. (1994): Vegetable response in improved low cost plastic greenhouses. *Acta Horticulturae*, (361); pp. 44-56
- Castilla, N. (2005): Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- EFSA (2009): EFSA-PPR project on "Data-collection of existing data on protected crop systems (greenhouses and crops grown under cover) in Southern European EU Member States". Ed. N. Sigrimis. Agricultural University of Athens
- EUPHOROS consortium (2011): Deliverable 5. Report on environmental and economic profile of present greenhouse production systems. Coordinator, J. I. Montero. <http://www.euphoros.wur.nl/UK/Deliverables>

- EUPHOROS consortium (2011): Deliverable 14. Baeza, E.; Montero, J. I. y Bailey, B. Available. <http://www.euphoros.wur.nl/UK/Deliverables>.
- Hernández Barros (2009): "Valoración radiativa, microclimática y productiva de dos invernaderos con diferente geometría de cubierta (hemicircular y lineal simétrica a dos aguas)"; Tesis doctoral, Universidad de Almería. p. 258.
- Kacira, M.; Sase, S. y Okushima, L. (2004): "Effects of Side Vents and Span Numbers on Wind-Induced Natural Ventilation of a Gothic Multi-Span Greenhouse" *JARQ*, 38(4); pp. 227-233.
- 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.; Stanghellini, C. y Castilla, N. (2009): "Greenhouse Technology for Sustainable Production in Mild Winter Climate Areas: Trends and Needs"; *Acta Horticulturae*, (807); pp. 33-46.
- Montero, J. I. (2010): "Tendencias tecnológicas en las invernaderos mediterráneos"; *Capítulo V. En Manejo del Clima en el Invernadero Mediterráneo*. Edita IFAPA- AI-881-2010.
- Nielsen, O. F. (2002): "Natural ventilation of a greenhouse with top screens". *Biosys. Eng.* (81); pp. 443-452.
- Pérez-Parra, J. (1998): "Invernadero Parral Almería y su evolución. Tecnología de Invernaderos II"; FIAPA, Caja Rural de Almería. ISBN: 84-88246-10-2.
- Perez-Parra, J. (2002): "Ventilación natural de invernaderos tipo parral"; Tesis doctoral. Escuela Técnica superior de Ingenieros Agrónomos y Montes. Universidad de Córdoba.
- 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.

- Soriano, T.; Montero, J. I.; Sánchez-Guerrero, M. C.; Medrano, E.; Antón, A.; Hernández, J.; Morales, M. I. y Castilla, N. (2004): "Characterisation of Direct Radiation transmission in Asymmetrical Multi-span Greenhouses using Scale Models and simulation Models"; *Journal of Biosystems Engineering*, 88(2); pp. 243-253.
- Stanghellini, C.; Incrocci, L.; Gázquez, J. C. y Dimauro, B. (2008): "Carbon dioxide fertilization in Mediterranean greenhouses: how much lost production?" *Acta Horticulturae*, (801); pp. 1.541-1.550.
- Stanghellini, C.; Montero, J. I. (2010): "Resource use efficiency in protected cultivation: towards the greenhouse with zero emissions"; ISHS Lisbon. *Acta Horticulturae* in press.
- Vanthoor, B. (2011): "A model-based greenhouse design method"; PhD Thesis; p. 307. Universidad de Wageningen.

