

LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL COMO HERRAMIENTA PARA MEJORAR EL DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN NATURAL EN INVERNADERO

ESTEBAN BAEZA
JERÓNIMO PÉREZ-PARRA
JUAN C. LÓPEZ
JUAN C. GÁZQUEZ

Estación Experimental de la Fundación Cajamar
ejbr@cajamar.com

RESUMEN

El invernadero tipo parral desde su diseño original ha sufrido diferentes modificaciones que han permitido reducir parcialmente el problema de su deficiente clima interior para un óptimo desarrollo del cultivo. Su problema más importante es su deficiente ventilación natural y las razones son variadas: desde una superficie de ventanas insuficiente al uso cada vez más generalizado y necesario de mallas antiinsecto de baja porosidad. La mejora de la ventilación natural es crítica en estas estructuras, tanto en épocas más cálidas como en épocas más frías. El presente trabajo muestra cómo las simulaciones numéricas mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) pueden ser empleadas para estudiar y mejorar el diseño de los sistemas de ventilación natural en invernadero, buscando en concreto: a) Maximizar los valores de intercambio de aire (tasa de ventilación); b) Incrementar el movimiento de aire en la parte inferior del invernadero, que ocupa normalmente el cultivo, y c) Disminuir los valores de diferencia de temperatura interior-exterior y mejorar la homogeneidad de las temperaturas. Para ello se han estudiado diversos parámetros de diseño de un invernadero tipo parral multicapilla de 6 capillas, susceptibles de tener efecto sobre los procesos de ventilación cenital como consecuencia del tipo, tamaño y orientación de las ventanas cenitales y el efecto combinado de incrementar la pendiente. La conjunción de algunas de las variaciones de diseño mencionadas en un mismo prototipo de invernadero proporciona incrementos en los valores de tasa de ventilación de hasta 3 veces superiores a los del prototipo estándar. Conviene evaluar la viabilidad constructiva de estas mejoras y abordar su construcción y evaluación experimental, para confirmar las mejoras que apuntan las simulaciones.

Palabras clave: CFD, tasa de ventilación, gradiente térmico, flujo de aire.

INTRODUCCIÓN

El invernadero parral multicapilla simétrico, como estructura de invernadero eminentemente empírica y artesanal, presenta, frente a la ventaja que supone su reducido coste, una serie de inconvenientes que dificultan en muchos casos la consecución de mejores rendimientos y calidad en la cosecha. Quizás el mayor problema del invernadero tipo parral multicapilla sea la falta de una adecuada ventilación natural. Esto provoca la aparición de temperaturas excesivas en el interior del invernadero y de problemas asociados a dichos excesos térmicos: estrés hídrico, problemas de cuajado de frutos, fisiopatías del fruto («blossom end rot», «blotching», rajado de la epidermis, etc.), etc. Pero una ventilación natural deficiente también tiene efectos perniciosos en épocas frías provocados sobre todo por elevados niveles de humedad relativa. Estos niveles, unidos al enfriamiento nocturno de la cubierta, acaban produciendo condensación en la cara interior del plástico que produce un goteo sobre el cultivo que favorece el desarrollo de enfermedades. Además, la lámina de condensación reduce la transmisión de luz al interior del invernadero (hasta un 40% en las horas centrales del día, Jaffrin & Makhoul, 1990) limitando la producción. Por último, y no menos importante, una mala tasa de renovación de aire puede hacer que los niveles de CO₂ en el interior del invernadero bajen drásticamente a medida que éste es fijado por el cultivo como consecuencia de su actividad fotosintética (reducciones del 25% respecto a la concentración exterior con vientos superiores a 1,5 m/s⁻¹, Lorenzo, 1990; de hasta un 44% con vientos inferiores a 1,5 m/s⁻¹, Ito, 1970) limitando la productividad del mismo.

Las causas por las que la ventilación natural en los invernaderos tipo parral multicapilla es deficiente son las siguientes:

1. Insuficiente área de ventilación: de acuerdo con los últimos datos obtenidos mediante encuesta (Pérez-Parra y Céspedes, 2001), el porcentaje medio de superficie de ventanas (laterales y cenitales) respecto a la superficie cubierta por el invernadero está en torno al 13%. Estos valores se sitúan lejos de los recomendados en bibliografía, próximos a un 25% de porcentaje de área de ventanas respecto a la superficie cubierta, para conseguir unos niveles adecuados de renovación de aire y de confort térmico para los trabajadores (Okushima, 2001).
2. Diseños de ventana ineficientes: aunque los últimos datos de encuesta (Fernández y Pérez-Parra, 2004) indican que el tipo de ventana cenital más empleado es la ventana abatible, aún sigue existiendo un alto porcentaje de invernaderos que cuentan con ventanas cenitales tipo banda deslizante o tipo enrollable. Los estudios realizados por Pérez-Parra y col. (2004) indican que las ventanas abatibles pueden proporcionar, a igualdad de tamaño que las enrollables, tasas de ventilación hasta 4 veces superiores si el viento es de barlovento.
3. Uso cada vez más generalizado de mallas anti-insecto de baja porosidad en las ventanas del invernadero: los insectos transmisores de virosis, fundamentalmente mosca blanca (*B. tabaci*) y trips (*F. occidentalis*), son de muy pequeño tamaño (Bethke, 1994; Bethke y Paine, 1991), por lo que hay que recurrir a mallas antiinsecto cuyo tamaño de hueco sea lo suficientemente pequeño, con porosidades por lo general muy bajas. Dichas mallas presentan una gran resistencia al paso del aire a su través (Sase y Christianson, 1990; Brundrett, 1993; Montero y col., 1997; Teitel y col., 1998; Fatnassi y col., 2002; Bailey y col., 2003), por lo que la ventilación natural se ve reducida de forma importante sin que el agricultor aplique ninguna medida compensatoria por la pérdida de ventilación.

Los programas informáticos CFD son una herramienta de gran utilidad para el estudio de los procesos de intercambio de masa y energía en el invernadero, habiéndose validado la precisión de sus simulaciones con datos obtenidos tanto en medidas de campo como con diferentes técnicas de laboratorio (Baeza, 2007). Pero uno de los verdaderos potenciales de los programas de CFD radica en su uso como herramienta de diseño. La gran versatilidad y facilidad de uso de estos programas permite evaluar múltiples alternativas de diseño del invernadero y sus ventanas y el efecto que dichos cambios ejercen sobre los procesos de ventilación natural, con gran ahorro de tiempo y recursos en relación a otros métodos (trabajo con modelos a escala, o evaluación directa en campo).

Según de Jong (1990), cuando el viento es la fuerza dominante que condiciona la ventilación natural del invernadero, podemos afirmar que la tasa de ventilación (Q) del mismo, además de depender de la intensidad del viento y de su dirección, es una función de la siguiente serie de parámetros:

$$Q = f(n, N, A_i, \alpha, \beta, L/H, \varepsilon, \dots)$$

donde n es el número de capillas del invernadero, N el número de ventanas del invernadero, A_i el área de cada ventana, α es el ángulo de apertura del alerón si las ventanas son abatibles, β es la pendiente de las capillas, L/H es la relación entre el largo y el ancho de cada ventana, ε es la porosidad de la malla, si está presente y toda una serie de parámetros más que tienen que ver con la geometría del invernadero y la distribución de las ventanas y que afectan a la distribución de presiones generada por el viento alrededor del invernadero.

El presente trabajo muestra algunos ejemplos de cómo se puede mejorar la ventilación natural de un invernadero (y por extensión) sus campos de temperatura, modificando el número, tamaño, tipo y distribución de las ventanas y estudiando en simulaciones CFD el efecto de dichos cambios sobre los procesos de ventilación natural.

MATERIAL Y MÉTODOS

El invernadero experimental que ha servido de modelo para las simulaciones es un invernadero tipo parral de 6 capillas simétricas, con su eje longitudinal orientado en dirección Norte-Sur (figura 1). Cada capilla tiene unas dimensiones de 7,6 x 23,2 m. La altura en cumbre es de 4,4 m y de 3,6 m en el amagado. La altura en banda es de 2,8 m.

Se ha utilizado el código Fluent v. 6.0 (Ansys Fluent Inc.) para llevar a cabo las simulaciones. Para ello se ha creado un modelo en dos dimensiones que representa una sección longitudinal del invernadero experimental en el preprocesador, incluida en un dominio computacional de gran tamaño (longitud: 638,4 m; altura: 44 m). Se generaron 6 modelos diferentes del invernadero de 6 capillas, modificando tipo, tamaño y distribución de las ventanas cenitales así como la pendiente de las capillas de la forma siguiente: el modelo 1 incluía una ventana abatible por cada capilla (anchura 0,73 m), en la vertiente oeste de la misma y pendiente estándar en las capillas (11,9°). El modelo 2 presentaba ventanas del mismo tamaño y capillas de la misma pendiente, pero las ventanas cenitales abatibles estaban distribuidas en las capillas con orientación alterna (Oeste-Este). El modelo 3 presentaba ventanas abatibles orientadas a barlovento en las dos capillas extremas, y ventanas cenitales enrollables en el resto de las capillas, todas las ventanas, independientemente del tipo, de ancho estándar, y pendiente estándar en las capillas. El modelo 4 incluía una ventana abatible por cada capilla de ancho mayor (1,5 m) y capillas con 27°

de pendiente. El modelo 5 presentaba ventanas de ancho mayor (1,5 m) distribuidas en las capillas con orientación alterna (Oeste-Este) y capillas con 27° de pendiente. Por último, el modelo 6 presentaba ventanas abatibles de ancho mayor (1,5 m) orientadas a barlovento en las dos capillas extremas, y ventanas cenitales enrollables en el resto de capillas, también con ancho mayor (1,5 m) y capillas con 27° de pendiente.

Se realizaron simulaciones para cada modelo para una velocidad de viento exterior a una altura de referencia de 10 m de 2 m/s⁻¹. En los distintos modelos las ventanas abatibles estaban abiertas al máximo (un ángulo de 67° respecto a la cubierta). Para la generación de la malla se empleó un esquema tipo «adoquinado» con un tamaño de celda de 0,3 m en el interior de la sección del invernadero y de 0,6 m para resto del dominio computacional, incrementando la densidad de celdas (ancho de 0,1 m) en las zonas donde se esperan mayores gradientes de los valores acoplados presión-velocidad (cerca del suelo del invernadero y en las ventanas cenitales). El límite izquierdo del dominio computacional se fijó como entrada de aire al dominio, empleando un perfil uniforme de velocidad de viento (Baeza, 2007), fijando el límite derecho del dominio como la salida de aire, empleando una condición de salida de presión. El límite superior del dominio fue fijado con una condición de simetría para no ejercer ningún efecto sobre el flujo de aire. Se ha evaluado exclusivamente la ventilación a barlovento. Para simular la naturaleza turbulenta del flujo de aire, se ha empleado el modelo de turbulencia de doble ecuación estándar k-ε empleando un tratamiento estándar en las paredes del invernadero, y activando la opción de «full buoyancy effects» para tener en cuenta los efectos de variación de densidad del aire con la temperatura. Se calcularon las tasas de ventilación asumiendo un comportamiento uniforme del vector velocidad en cada una de las ventanas a lo largo de toda su longitud (8,35 m).

En todas las simulaciones se activó la ecuación de energía en el programa para estudiar el efecto de cada configuración de ventilación sobre el campo escalar de temperaturas en el interior del invernadero. Las propiedades del fluido aire se fijaron de la forma siguiente: aproximación del fluido con la ley Boussinesq y una temperatura exterior de 303 K (densidad del aire exterior 1,165 kg/m⁻³; coeficiente de expansión volumétrica 0,003). La temperatura en el suelo del invernadero se fijó en 330 K y en las paredes del invernadero en 305 K, a partir de medidas realizadas con termómetro de infrarrojos en un invernadero sin cultivo de la Estación Experimental «Las Palmerillas» de Cajamar. A partir de la temperatura del suelo, el programa calcula el flujo de calor a partir de la fórmula

$$q = h_f (T_s - T_a) + q_{\text{rad}} \quad (4.1)$$

donde h_f es el coeficiente de convección local del fluido, que el programa calcula a partir de las condiciones del campo de flujo local mediante la ley de Fourier (nivel de turbulencia, temperatura y perfiles de velocidad), T_s la temperatura de pared (del suelo o la cubierta plástica en este caso), T_f la temperatura local del fluido (del aire en este caso) y q_{rad} es el calor emitido por suelo o cubierta en forma de radiación en virtud de su temperatura.

Se implementaron en el programa las propiedades físicas (densidad, calor específico y coeficiente de conducción de calor) del polietileno y de la arena húmeda para la cubierta del invernadero y el suelo del mismo, respectivamente. Se activó la opción «body force weighted» para la discretización de la presión, la más apropiada para velocidades de viento bajas, en las que los efectos térmicos son importantes. Las simulaciones se llevaron a cabo para una velocidad de viento exterior de 3 m/s⁻¹.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La figura 2 muestra los campos escalares de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), el gradiente térmico interior-exterior promedio ($^{\circ}\text{C}$) y la tasa de ventilación (m^3/s^{-1}), valores obtenidos en las simulaciones de los modelos 1, 2 y 3, es decir, los modelos con ventanas cenitales y pendiente en las capillas tipo estándar. Podemos observar que el modelo 1 es el que presenta peor distribución de temperaturas, con zonas en las que el gradiente de temperatura interior-exterior se aproxima a 10°C . También es la configuración que presenta una menor tasa de ventilación y peor circulación de aire en todo el perfil del invernadero, todo lo cual se traduce en el valor promedio más alto de gradiente de temperatura interior-exterior. Podría considerarse como la peor recomendación el orientar todas las ventanas en la misma dirección. El simple hecho de alternar la orientación de las ventanas en capillas sucesivas produce un cambio en el campo de distribución de presiones que se establece sobre el invernadero (Baeza, 2007). Este cambio favorece que cada par de ventanas sucesivas actúen como pares de entrada-salida de aire, haciendo que la tasa de ventilación sea más alta que en el modelo anterior, y generándose un campo escalar de temperaturas más homogéneo, en el que prácticamente desaparecen las zonas con mayor gradiente térmico, cuyo valor promedio desciende casi 1°C respecto al caso anterior. En el modelo 3 se han sustituido las ventanas abatibles de las capillas centrales por ventanas enrollables, que resultan mucho más baratas que las enrollables. De acuerdo con las simulaciones, y como se observa en la figura 2, este cambio hace disminuir la tasa de ventilación, pero prácticamente no afecta al valor promedio del gradiente de temperatura interior-exterior, lo que indica que a pesar de que el intercambio de aire total disminuye, la circulación de aire sigue siendo eficiente a la hora de refrigerar el invernadero, especialmente en las 4 primeras capillas, como se observa en la figura 2, siendo peor la refrigeración en las dos últimas capillas (las de sotavento).

La figura 3 establece la misma comparación que la figura 2, pero esta vez el modelo 1 (o estándar) se compara con las mismas configuraciones de ventanas estudiadas previamente, denominadas modelo 4, 5 y 6, pero aumentando el tamaño de las ventanas (ancho de 1,5 m) y dotando a las capillas de una pendiente mayor (27°). En la figura 3 observamos en el modelo 4, cómo estos dos simples cambios de diseño hacen multiplicarse casi en un factor de 3 la tasa de ventilación, y hacen descender 2°C el valor promedio del gradiente térmico. Desaparecen prácticamente las zonas con gradiente térmico elevado, mejorando mucho el clima bajo la primera capilla, siendo las zonas más pobremente ventiladas, nuevamente, las dos últimas capillas (las de sotavento). El modelo 5, con ventanas alternas en capillas sucesivas, mejora aún más el campo escalar de temperaturas, quedando la última capilla (sotavento) como la única en la que aparecen zonas con un gradiente térmico superior a 2°C . El gradiente térmico promedio disminuye ligeramente respecto al modelo 4. Lo mismo puede decirse del modelo 6. En los tres nuevos modelos (4, 5 y 6) los valores de tasa de ventilación son muy similares. Para evitar la aparición de zonas con gradiente térmico elevado en la última capilla de sotavento, habría que recurrir a las ventanas laterales, tal y como se demuestra en Baeza (2007).

CONCLUSIONES

El trabajo demuestra cómo las simulaciones de dinámica de fluidos computacional pueden ser una herramienta de diseño muy potente y que permite ahorrar mucho tiempo,

para introducir pequeñas mejoras constructivas en los invernaderos con problemas de ventilación natural. El estudio de algunas de dichas mejoras (pendiente de las capillas, aumento del tamaño de las ventanas cenitales), combinado con el estudio de diferentes configuraciones de tipología y distribución de las ventanas cenitales (orientación alterna, combinación de ventanas abatibles y enrollables) ha permitido predecir incrementos importantes en los valores de tasa de ventilación (multiplicados por 3) y en la homogeneidad de los flujos de aire interiores respecto a los diseños más comúnmente empleados hoy en día en esta tipología de invernadero. Las simulaciones permiten observar, como consecuencia de lo anterior, campos escalares de temperatura interior más homogéneos y con valores absolutos de temperatura más bajos. En definitiva, las simulaciones predicen que los cambios de diseño representan sistemas de ventilación natural más eficientes y que conviene construir y validar en ensayos de campo.

Figura 1. Fotografía del prototipo de invernadero parral multicapilla tomado como estándar para llevar a cabo las simulaciones CFD



Figura 2. Comparación de los campos escalares de temperatura (K), gradiente térmico interior-externo promedio (°C) y tasa de ventilación (m³/s⁻¹) del modelo 1 (estándar) con los modelos 2 y 3 obtenidos mediante simulaciones CFD

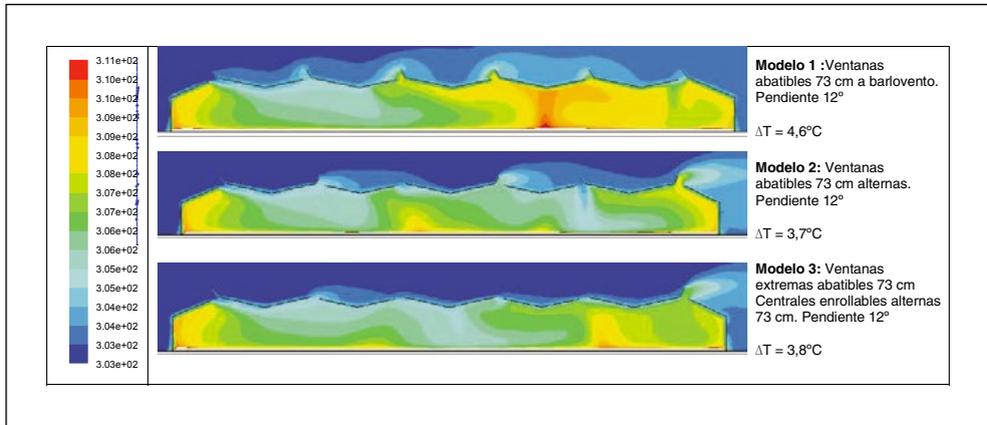
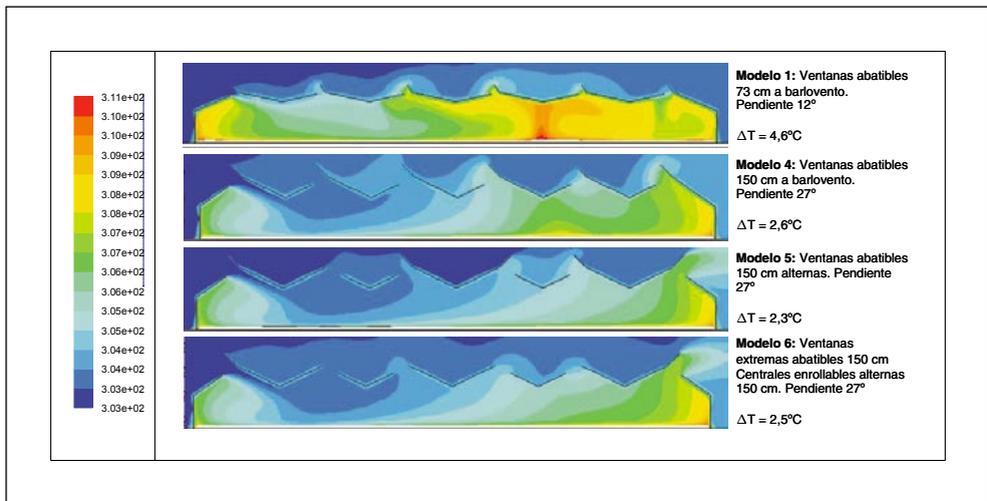


Figura 3. Comparación de los campos escalares de temperatura (K), gradiente térmico interior-externo promedio (°C) y tasa de ventilación (m³/s⁻¹) del modelo 1 (estándar) con los modelos 4, 5 y 6 obtenidos mediante simulaciones CFD



BIBLIOGRAFÍA

- BAEZA, E.J. 2007 «Optimización del diseño de los sistemas de ventilación en invernadero tipo parral» Ph.D. Dissertation. Universidad de Almería, Spain, pp. 204.
- BAILEY, B.J.; MONTERO, J.I.; PÉREZ PARRA, J.J.; ROBERTSON, A.P.; BAEZA, E. y KAMARUDDIN, R. 2003. «Air flow resistance of greenhouse ventilators with and without insect screens». *Biosystems Engineering*. 86 (2):217-229.
- BETHKE, J.A. y PAINE T.D. 1991. «Screen hole size and barriers for exclusion of insect pests of glasshouse crops». *J. Entomol. Sci.* 26: 169-177.
- BETHKE, J.A. 1994. «Considering installing screening? This is what you need to know». *Greenhouse Manager*. Abril. 13 (1):34-37.
- BRUNDRETT, E. 1993. «Prediction of pressure drop for incompressible flow through».
- DE JONG, T. 1990. «Natural ventilation of large multispan greenhouses». Ph. D. Dissertation Agricultural University of Wageningen, The Netherlands, pp. 116.
- FATNASSI, H.; BOULARD, T.; DEMRATI, H.; BOUIRDEN, L. y SAPPE, G. 2002. «Ventilation performance of a large canarian-type greenhouse equipped with insect-proof nets». *Biosystem Engineering*, 82 (1):97-105.
- FERNÁNDEZ, C. y PÉREZ-PARRA, J.J. 2004. «Caracterización de los invernaderos de la provincia de Almería» Cajamar.
- ITO, T. 1970. «Carbon dioxide depletion within the plant canopy in growing vegetable crops». *Journal Japanese Society Horticultural Science*. 39 (2):185-192.
- JAFFRIN, A. y MAKHLOUF, S. 1990. «Mechanisms of light transmission through wet polymer films». *Acta Hortic.* 281: 11-24.
- LORENZO, P.; MAROTO, C. y CASTILLA, N. 1990. «CO₂ in plastic greenhouse in Almería (Spain)». *Acta Horticulturae*, 268: 165-169.
- MONTERO, J.I.; MUÑOZ, P. y ANTON, A. 1997. «Discharge coefficients of greenhouse windows with insect-proof openings on greenhouse ventilation». *Acta Horticulturae*, 443, 71-77.
- OKUSHIMA, L.; SASE, S.; LEE, I.B. y BAILEY, B.J. 2001. «Thermal environment and stress of workers in naturally ventilated greenhouses under mild winter climate». *Acta Horticulturae* 559. Vol. II: 763-768.
- PÉREZ-PARRA, J.J.; BAEZA, E.; MONTERO, J.I. y BAILEY, B.J. 2004. «Natural ventilation of parral greenhouses» *Biosystems Engineering* 87 (3): 89-100.
- PÉREZ-PARRA, J.J. y CÉSPEDES, A. 2001. «Estudio de la demanda de inputs auxiliares: producción y manipulación en el sistema productivo agrícola almeriense». *Fiapa*, Almería: 1-201.
- SASE, S. y CHRISTIANSON, L.L. 1990. «Screening greenhouses- some engineering considerations». *ASAE Paper No. NABEC* 190-201.
- TEITEL, M. y SHKLYAR, A. 1998. «Pressure drop across insect-proof screens». *Transactions of the ASAE*, 41 (6):1829-1834.