

SIMULACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL AIRE EN UN INVERNADERO TIPO VENLO

Simulation of Air Movement in a Venlo-Type Greenhouse

Jorge Víctor Prado Hernández^{1‡}, Abraham Rojano Aguilar², Benjamín de León Mojarro³,
Mauricio Carrillo García², Laura Ibáñez Castillo², Vicente Ángeles Montiel² e Irineo López Cruz²

RESUMEN

Se han realizado aproximaciones teóricas para estudiar la ventilación en invernaderos como los modelos mecanicistas, que se basan en el balance de energía, pero sólo proveen información acerca de la tasa de ventilación global sin ofrecer detalles de la distribución espacial de las líneas de corriente de aire. En años recientes se ha observado que los modelos matemáticos basados en las ecuaciones completas de Navier-Stokes representan adecuadamente la ventilación en invernaderos y ofrecen información detallada de la distribución espacial de la masa de aire; sin embargo, resulta muy costosa la adquisición de los permisos de uso de los paquetes de cómputo comerciales por lo que es necesario investigar sobre modelos simplificados con el fin de reducir los costos de los estudios. En este trabajo se simuló la circulación de aire en un invernadero tipo Venlo en diferentes condiciones de ventilación, mediante dos modelos: uno de ellos considera las ecuaciones completas de Navier-Stokes, y el otro resuelve un modelo simplificado de Navier-Stokes en el que no se considera la aceleración convectiva en la ecuación de cantidad de movimiento. Para el estudio del modelo completo se usó el programa comercial FLUENT versión 11.0 (ANSYS Inc, 2013) y el modelo simplificado se resolvió numéricamente en MATLAB. Ambos métodos arrojan tasas de ventilación globales similares, pero la circulación de la masa de aire es diferente en algunos escenarios de ventilación. El método simplificado resultó más económico en dinero y tiempo, debido a que su solución numérica se puede implementar con mayor

facilidad en algún lenguaje de programación de medio y alto nivel, y porque los tiempos de cómputo se reducen sustancialmente. Para tener mayor detalle de las zonas de recirculación de la masa de aire en el interior de los invernaderos se debe considerar el modelo completo de Navier-Stokes.

Palabras clave: ventilación natural, aplicaciones de elemento finito, simulación de la ventilación.

SUMMARY

Theoretical approaches and mechanistic models based on energy balance have been employed to study ventilation in greenhouses. These methodologies, however, provide information only on overall ventilation rate and do not provide details of the spatial distribution of the air stream lines. In recent years, it has been shown that mathematical models based on the complete equations of Navier-Stokes model adequately represent ventilation in greenhouses and offer detailed information about spatial distribution of the air mass. Acquiring the permit to use this commercial software is very expensive; therefore, it is important to do research on simplified models in order to reduce research costs. In this study, movement of air was simulated in a Venlo-type greenhouse under different conditions of ventilation using two models: one of them considers the complete Navier-Stokes equations which is called *full model*, and the other is a Navier-Stokes simplified model in which convective acceleration is not considered in the momentum equation. The *full model* was solved using the FLUENT software version 11.0 (ANSYS Inc., 2013) and the simplified model was solved numerically in MATLAB. Both methods showed similar results on ventilation rates, but air mass circulation is different in some ventilation scenarios. The simplified method saves more money and time than the full method because its numerical solution can be implemented more easily in medium and high level programming language and because computational times are substantially reduced. To get better results on

¹ Área de Manejo y Conservación de Suelo y Agua; ² Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo Estado de México.

[‡] Autor responsable (vpradohdez@gmail.com)

³ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso. 62550 Jiutepec, Morelos, México.

recirculation zones of the air mass inside a greenhouse, the Navier-Stokes complete model should be considered.

Index words: *natural ventilation, finite element applications, simulation of the ventilation.*

INTRODUCCIÓN

La superficie para la producción de cultivos bajo invernadero en México se ha incrementado exponencialmente en años recientes, como consecuencia de las ventajas que ofrece con respecto a la producción en campo abierto y por el aumento de los apoyos gubernamentales a los productores para la implementación de la agricultura protegida. Además de incrementar el beneficio económico, entre otras ventajas, permite utilizar suelos degradados física y químicamente e incrementar la productividad de los cultivos al mejorar la eficiencia en la utilización del agua (Kirda *et al.*, 2004; Castilla, 2005). Sin embargo, en varias ocasiones se han instalado y operado modelos de prototipos de invernaderos de otros países que tienen condiciones climatológicas muy distintas a las nacionales. Esto ha ocasionado que no se aprovechen al máximo sus potenciales, y que en algunos casos se hayan tenido fracasos. De acuerdo a los rendimientos obtenidos en otros países, en México se podría mejorar la productividad en esta modalidad de producción agrícola, revisando si las condiciones ambientales generadas por diferentes geometrías de invernaderos son las adecuadas para el desarrollo óptimo de los cultivos (Baille, 2001; Rico *et al.*, 2006).

La ventilación consiste en agitar la masa de aire artificialmente o de forma natural. La primera forma de ventilación es mucho más costosa que la segunda pero puede producir una mejor circulación de la masa de aire en el interior del invernadero ya que se colocan de manera estratégica los ventiladores. Además, con la ventilación artificial se puede conservar el calor y reducir los gastos para calentar la masa de aire en los meses fríos porque se mantienen cerradas las ventanas durante periodos de tiempo largos (Matallana y Montero, 1995, Fidaros *et al.*, 2011). Sin embargo, con la ventilación natural se pueden obtener tasas de ventilación aceptables (número de veces por hora que el volumen de aire del interior de un invernadero se intercambia con el aire del exterior), orientando adecuadamente los invernaderos y con diseños apropiados de las ventanas (Rico *et al.*, 2006, Romero *et al.*, 2010).

Ambos métodos deben ser complementarios para reducir los costos de ventilación, según las condiciones climatológicas del invernadero y su exterior.

La ventilación en invernaderos es indispensable por que permite la regulación de la temperatura y la humedad del aire (Kittas y Bartzanas, 2007; Mesmoudi *et al.*, 2010), las cuales son dos variables climatológicas fundamentales en el desarrollo óptimo de los cultivos, si sus valores no son los adecuados las plantas serán más vulnerables a los ataques de plagas y enfermedades, y estarán expuestas a trastornos fisiológicos (Tiwari, 2003).

El estudio del clima en los invernaderos se ha abordado mediante diferentes metodologías: i) estudios totalmente experimentales (Boulard *et al.*, 1998; Baptista *et al.*, 1999; Roy *et al.*, 2002); ii) estudios que se basan en aproximaciones teóricas como los modelos mecanicistas que se sustentan en el balance de energía (Boulard *et al.*, 1998), y iii) en años recientes se ha empleado la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) la cual es una técnica de análisis de sistemas mediante simulación computacional basados en los principios de conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía (Wilcox, 1994; Reiss *et al.*, 2007; Majdoubi *et al.*, 2009; Romero *et al.*, 2010; Fidaros *et al.*, 2011).

Los modelos basados en la técnica del CFD han mostrado que representan adecuadamente la circulación de la masa de aire en el interior de los invernaderos (Norton *et al.*, 2007; Rico *et al.*, 2008; Romero *et al.*, 2010). Existen varios programas de cómputo comerciales basados en esta técnica, pero la relación costo/beneficio de adquirir la licencia es muy alta y la cantidad de operaciones matemáticas efectuadas son altas por lo que se plantea el reto de desarrollar métodos matemáticos simplificados que demanden menos cantidad de operaciones numéricas (Bermúdez y Nicolás, 2008), basados en métodos conservativos que se puedan implementar fácilmente en lenguajes de programación accesibles para reducir los costos de las evaluaciones de los invernaderos (Molina *et al.*, 2010).

En la práctica los estudios experimentales y los métodos teóricos son complementarios, donde los resultados de los experimentales sirven para calibrar y validar los teóricos. Los estudios experimentales son costosos y requieren de mucho tiempo para efectuarse. Los métodos teóricos son más baratos ya que pueden predecir rápidamente las variables de interés (velocidad del viento y temperatura) tanto en el espacio extensión

como en el tiempo para diferentes características geométricas y de manejo de los invernaderos (Versteeg and Malalasekera, 1995; Rico *et al.*, 2006).

Conociendo la importancia de las técnicas experimentales, este escrito intenta describir los aspectos fundamentales de los modelos matemáticos involucrados en el problema de ventilación, analizando en este trabajo un invernadero tipo Venlo, donde flujo de aire y temperatura son las variables de mayor respuesta. Los modelos matemáticos usados son dos sistemas de ecuaciones diferenciales parciales definidas en espacio y tiempo. Dichos sistemas requieren condiciones iniciales y de frontera tipo Dirichlet, Neumann, o Fourier, para ser consistentes en la formulación matemática y de solución viable (Versteeg and Malalasekera, 1995; Zienkiewicz and Taylor, 2000).

El invernadero tipo Venlo es un modelo holandés con cubierta de vidrio, fabricado con anchos de túneles de 3.2 m y anchos totales en múltiplos de 0.8 m. Se utiliza principalmente en el norte de Europa donde el clima es muy frío la mayor parte del año, por lo que sólo cuenta con ventanas en el techo para evitar las pérdidas de calor (Van de Braak *et al.*, 1995). Este tipo de invernadero se usa en algunas partes del centro de México; sin embargo, aunque en algunos lugares el clima es templado, éste es muy diferente al clima frío del norte de Europa. Por tanto, se plantea la necesidad de analizar el proceso de la ventilación en este tipo de invernaderos para implementar adecuaciones en ellos que mejoren la circulación de la masa de aire. Para tal efecto, en este trabajo se estudió el proceso de la ventilación natural y artificial en un invernadero tipo Venlo, mediante dos modelos matemáticos basados en los principios de la conservación de la cantidad de masa y de la cantidad de movimiento: uno de ellos considera las ecuaciones completas de la conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, y el otro no considera la aceleración convectiva de la ecuación de la cantidad de movimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron varios escenarios de ventilación en un invernadero tipo Venlo mediante un modelo de Navier-Stokes completo (Versteeg y Malalasekera, 1995) y un modelo de Navier-Stokes simplificado, propuesto por los autores de este artículo. Los resultados obtenidos con el modelo completo de Navier-Stokes fueron considerados como los valores experimentales,

y para tal efecto, dicho modelo fue calibrado previamente con datos de tasas de ventilación de un invernadero tipo capilla con ventilación lateral y cenital, obtenidos mediante la técnica del gas trazador.

Características del Invernadero Usado para la Calibración del Modelo Matemático

En ambos costados de las paredes laterales del invernadero, empleado para la calibración del modelo completo de Navier-Stokes, hay varios invernaderos instalados paralelamente. El invernadero tiene una superficie de 225 m² con cubierta de plástico y mallas anti insectos en las ventanas. Está ubicado en el campo experimental San Ignacio de la Universidad Autónoma Chapingo, en el municipio de Texcoco, Estado de México. El invernadero tiene dos ventanas laterales con una superficie de ventilación de 93 m² y una ventana cenital con una superficie de ventilación de 17 m² (Figura 1). Tiene una orientación NE-SO con la ventana cenital orientada hacia el Este.

Características del Invernadero Tipo Venlo

La geometría y dimensiones de la sección transversal del invernadero donde se realizó la simulación de la ventilación se muestran en la Figura 2. Cuenta con dos ventanas laterales de 1.31 m de altura (VLI y VLD) y con seis ventanas en la parte superior de 0.582 m de ancho (VT1, VT2, VT3, VT4, VT5 y VT6). Los invernaderos tipo Venlo no tienen ventanas laterales, pero se han supuesto para generar diferentes escenarios de ventilación.

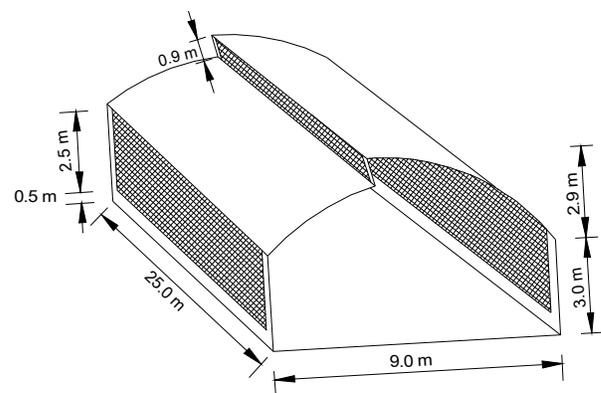


Figura 1. Invernadero utilizado para la calibración del modelo de Navier-Stokes completo.

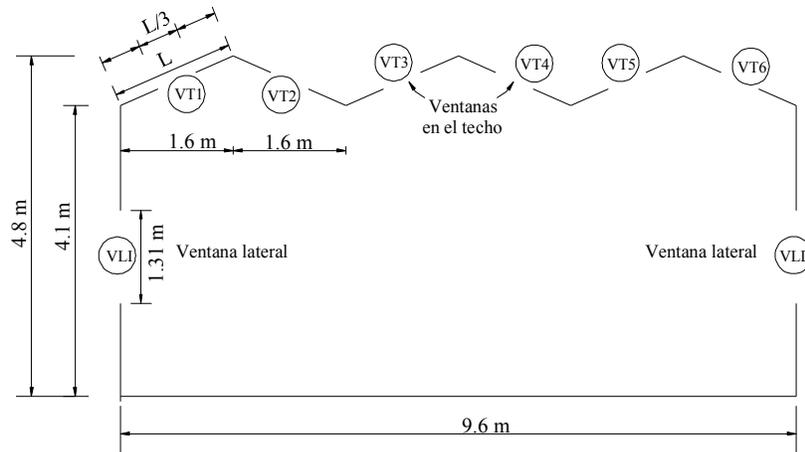


Figura 2. Sección transversal del invernadero de estudio tipo Venlo.

Modelo de Navier-Stokes

La simulación se realizó a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo bidimensional incompresible en estado estacionario. El modelo fue resuelto numéricamente por el método del elemento finito debido a que se adapta adecuadamente a formas irregulares como pueden ser los techos o ventanas de los invernaderos (Zienkiewicz and Taylor, 2000).

El modelo de Navier-Stokes en estado estacionario para flujo incompresible en su forma vectorial y diferencial conservativa se expresa de la siguiente forma (Versteeg and Malalasekera, 1995):

$$-\nu \Delta V + V \cdot \nabla V + \nabla p = 0 \quad \text{sobre un dominio } \Omega \subset \mathbb{R}^2 \quad (1a)$$

$$\nabla \cdot V = 0 \quad \text{sobre un dominio } \Omega \subset \mathbb{R}^2 \quad (1b)$$

sujetas a las siguientes condiciones de frontera:

$$V = V_D \quad \text{y} \quad p = p_D \quad \text{sobre } \Gamma_D \quad (2a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial n} = 0 \quad \text{sobre } \Gamma_N \quad (2b)$$

donde: V es la velocidad [$L T^{-1}$]; p es la presión [$M L^{-2}$] y ν es la viscosidad cinemática del aire [$L^2 T^{-1}$], en la que L , M y T representan, respectivamente, las dimensiones físicas longitud, masa y tiempo. Las ecuaciones de campo (1a) y (1b) corresponden a la conservación de la cantidad de movimiento y a la conservación de la masa, respectivamente.

Las Ecuaciones 2a y 2b representan las condiciones de frontera de Dirichlet (Γ_D) y Neumann (Γ_N), respectivamente, y n es el vector normal a la frontera Γ_N .

Modelo Completo

El modelo completo de Navier-Stokes considera todos los términos del sistema de Ecuaciones 1 y fue resuelto con el programa estadístico comercial FLUENT versión 11.0 (ANSYS Inc, 2013). Los efectos turbulentos fueron simulados mediante un modelo k-epsilon estándar ya que ha dado buenos resultados en la modelación del clima de invernaderos (Rico *et al.*, 2006; Rico *et al.*, 2008; Romero *et al.*, 2010).

Modelo Simplificado

Este modelo no considera la aceleración convectiva ($V \cdot \nabla V$) de la ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento por lo que la Ecuación 1a, en forma adimensional, queda como (Wilcox, 1994):

$$-\Delta V + Re(\nabla p) = 0 \quad (3)$$

donde: Re representa el número adimensional de Reynolds, definido como:

$$Re = \frac{V\ell}{\nu} \quad (4)$$

donde: ℓ representa una longitud característica [L]; V y ν representan lo mismo que en las Ecuaciones 1 y 2.

La eliminación de la aceleración convectiva asume que los gradientes de velocidades (∇V) y los números de Reynolds en el interior del invernadero son pequeños. Esta situación se presenta cuando las velocidades del aire exterior al invernadero son pequeñas (Seif Al-Shamiry y Ahmad, 2010) y sólo se usa la ventilación natural como en los invernaderos tipo Venlo (Van de Braak *et al.*, 1995). En efecto, información de velocidades del viento obtenidas, con anemómetros, en el interior de un invernadero tipo Venlo sometido a ventilación natural, muestra velocidades correspondientes a números de Reynolds característicos de flujo laminar y transicional (Figura 3) por lo que los efectos turbulentos son insignificantes. Este comportamiento de velocidades del aire en los invernaderos tipo Venlo típicos apoyan la hipótesis de considerar nula la aceleración convectiva en este tipo de invernaderos.

Matemáticamente, la aceleración convectiva representa la no linealidad de la Ecuación 1a por lo que su eliminación simplifica sustancialmente la solución numérica del modelo de Navier-Stokes. El modelo simplificado se resolvió mediante el método de Galerkin de los residuos ponderados (Zienkiewicz and Taylor, 2000). Para ello el dominio Ω se discretizó mediante elementos triangulares. Para la presión se utilizó una función base de tipo lineal que considera los tres vértices del elemento triangular, mientras que para la velocidad se utilizó una función base cuadrática que considera los tres vértices y tres nodos intermedios, ubicados en la parte media de los lados del elemento triangular.

El modelo simplificado se implementó en el lenguaje de programación del programa matemático Matlab, en un formato modular, cuya estructura permite declarar de forma sencilla paredes impermeables o ventilaciones al interior del dominio de manera que se puede estudiar

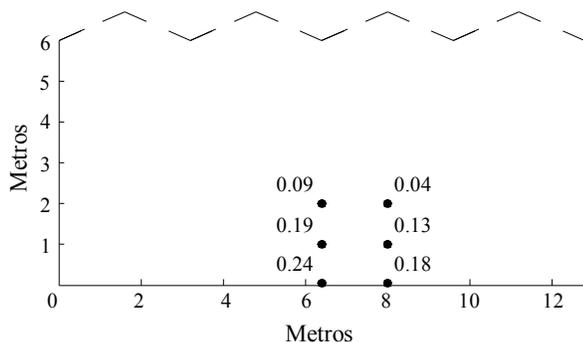


Figura 3. Velocidades medidas (m s^{-1}) en un invernadero tipo Venlo.

mediante simulación el flujo del aire bajo diversos esquemas de ventilación.

División del Dominio y Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera externas e internas para las velocidades y la presión están sujetas a condiciones tipo Dirichlet. En las fronteras sólo se consideran la velocidad horizontal (V_x), ya que la velocidad vertical (V_y) es despreciable (Rico *et al.*, 2006). El valor de la presión impuesto en la condición de frontera es el de la presión atmosférica del lugar cuyo valor es de 76 484 Pa (considerada para una altura sobre el nivel medio del mar de 2200 m). En el Cuadro 1 se describen los escenarios de ventilación propuestos, para análisis mediante simulación matemática, en el que se indica para cada caso el número de elementos triangulares en los que se dividieron los dominios, y el número de puntos (nodos) en los que se resolvieron las ecuaciones de la conservación de la cantidad de movimiento y de la masa. Las velocidades del viento de la columna seis del Cuadro 1 se supusieron, tomando como referencia los valores registrados en la estación meteorológica del Colegio de Postgraduados, ubicada en Montecillo, Estado de México (EMCP, 2011).

Escenario 1

Se simula que se introduce y extrae aire artificialmente en las ventanas laterales VLI y VLD, respectivamente (Figura 4). La entrada y salida del aire en estos sitios tienen una distribución de velocidades horizontal de tipo parabólica con valor máximo en el centro de la ventana (1.3 m s^{-1} , Cuadro 1) y velocidad cero en los extremos. La velocidad vertical en estos puntos es nula. Las paredes del invernadero se consideran como muros impermeables por lo que la velocidad en este sitio se considera sujeta

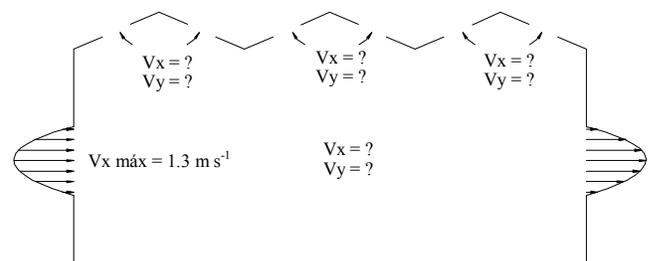


Figura 4. Escenario 1.

Cuadro 1. Características de los escenarios de ventilación, propuestos en el invernadero de estudio.

Escenario	Modelo de Navier-Stokes	Elementos triangulares	Nodos	Ventilación	Velocidad máxima en la condición de frontera
					$m s^{-1}$
1 y 2	Completo	51 540	26 632	Artificial parabólica	1.3
	Simplificado	876	1851		
3	Completo	11 415	6388	Natural Parabólica	1.3
	Simplificado	3 024	6205		
4	Completo	112 960	57 498	Natural exponencial	5.0
	Simplificado	4 032	8245		
5	Completo	154 004	78 158	Natural exponencial	5.0
	Simplificado	4 032	8245		

a condiciones de Dirichlet, nulas. Las velocidades en los nodos de las ventanas son incógnitas al igual que en el interior del dominio.

Escenario 2

Está sujeta a condiciones idénticas que el escenario 1, pero en este caso se introduce aire artificialmente en las dos ventanas laterales (VLI y VLD).

Escenario 3

Este caso corresponde a una ventilación natural en la que la masa de aire se mueve de izquierda a derecha. Las paredes del invernadero están sujetas a condiciones de Dirichlet con velocidades nulas, y las incógnitas se encuentran en el interior del invernadero y ventanas del techo (Figura 5).

El escenario 3, corresponde a situaciones en las que el invernadero es obstaculizado lateralmente por algún

tipo de barrera impermeable física, de manera que el viento solo circula en su parte superior.

Escenario 4

La ventilación es de carácter natural y se simula que la dirección del flujo va de izquierda a derecha del dominio de integración. Las fronteras internas que corresponden a las paredes del invernadero se consideran impermeables por lo que las incógnitas se ubican en el interior y en las ventanas del techo del invernadero (Figura 6).

En este caso se generó un dominio virtual conteniendo en el centro al invernadero para garantizar un flujo completamente desarrollado como sucede en condiciones reales. Este escenario representa a un invernadero libre de obstáculos impermeables por lo que el viento circula libremente en su vecindad.

Escenario 5

Este caso retoma el escenario 4 e incluye las ventanas laterales (VLI y VLD) en la ventilación del invernadero. Las incógnitas se ubican en el interior del invernadero y en las ventanas laterales y del techo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo completo de Navier- Stokes se empleó como referencia en la comparación de los resultados del modelo simplificado, ya que sus resultados (Figura 7 y 8) se aproximan de forma aceptable a las tasas de ventilación (denotadas por la letra G) obtenidas experimentalmente puesto que las diferencias máximas entre la tendencias de los datos medidos y simulados

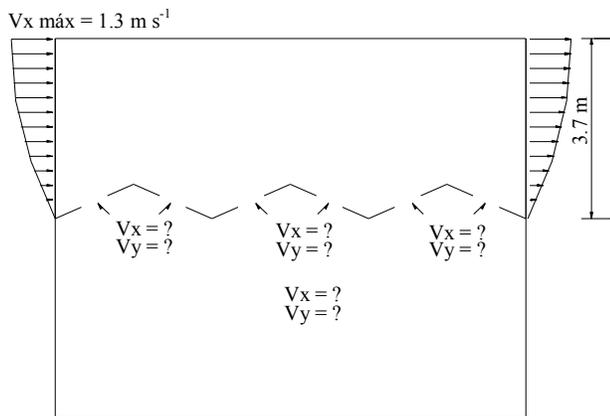


Figura 5. Escenario 3.

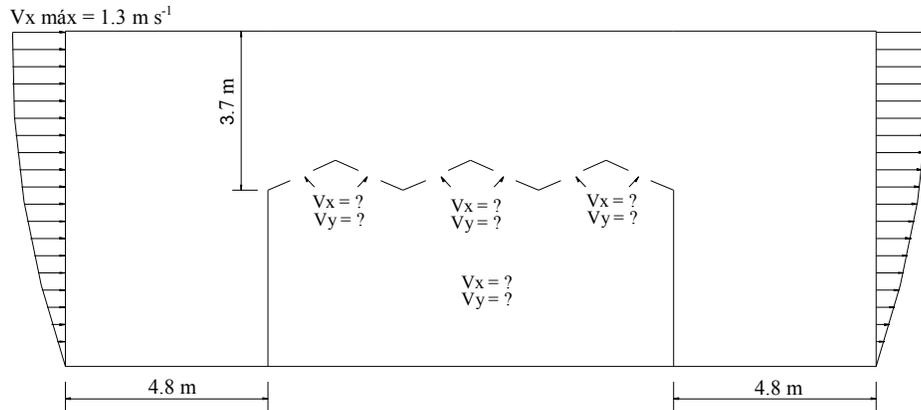


Figura 6. Escenario 4.

son 9.7 y 7.6%, para ventilación lateral y ventilación lateral y cenital, respectivamente, para un rango de velocidades del viento en el exterior del invernadero de 1 a 5 m s^{-1} . Se consideró adecuada la calibración del modelo matemático completo ya que los errores porcentuales indicados anteriormente, representan una renovación por hora del aire del interior del invernadero, cantidad que no repercute significativamente en el desarrollo de los cultivos (Luo *et al.*, 2005). Además, el modelo de Navier-Stokes ha mostrado, en varias investigaciones, que representa adecuadamente la circulación de la masa de aire (Molina *et al.*, 2004; Khaoua *et al.*, 2006; Norton *et al.*, 2007; Rico *et al.*, 2008; Majdoubi *et al.*, 2009; Fidaros *et al.*, 2011).

Es importante aclarar que las tasas de ventilación mostradas en el presente trabajo (Figura 7 y 8) son pequeñas con respecto a los valores encontrados por otros autores (Rico *et al.*, 2006; Romero *et al.*, 2010) debido a que el invernadero experimental se encuentra obstruido lateralmente por otros invernaderos.

Los métodos completo y simplificado de Navier-Stokes aplicados al invernadero tipo Venlo son consistentes numéricamente ya que satisfacen el principio de conservación de la masa (Cuadro 2). Esto significa que la cantidad de volumen que entra y sale del invernadero es similar.

El modelo simplificado subestima la tasa de ventilación del invernadero, con respecto al modelo

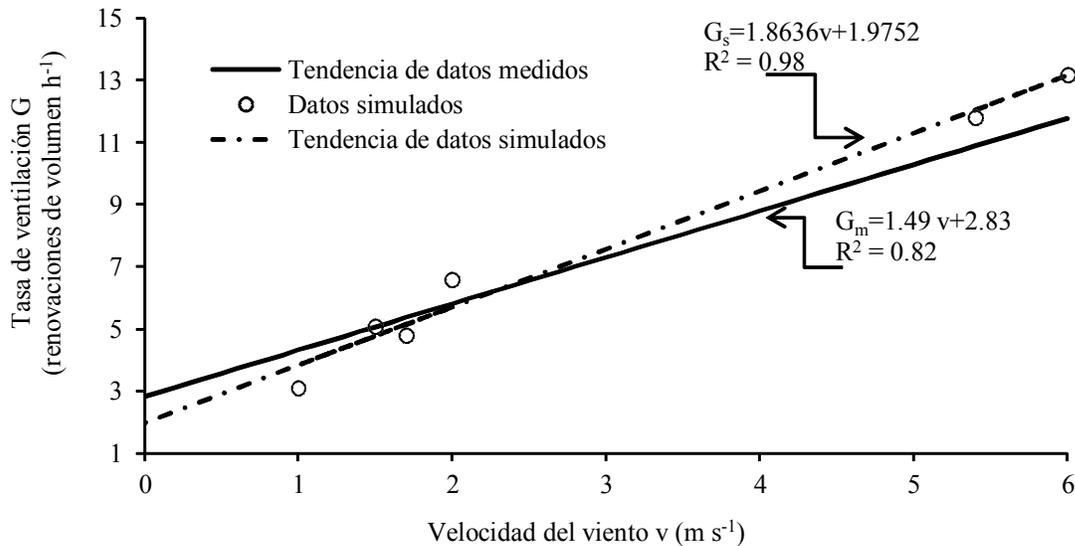


Figura 7. Datos medidos y simulados de tasas de ventilación, bajo ventilación lateral del invernadero experimental.

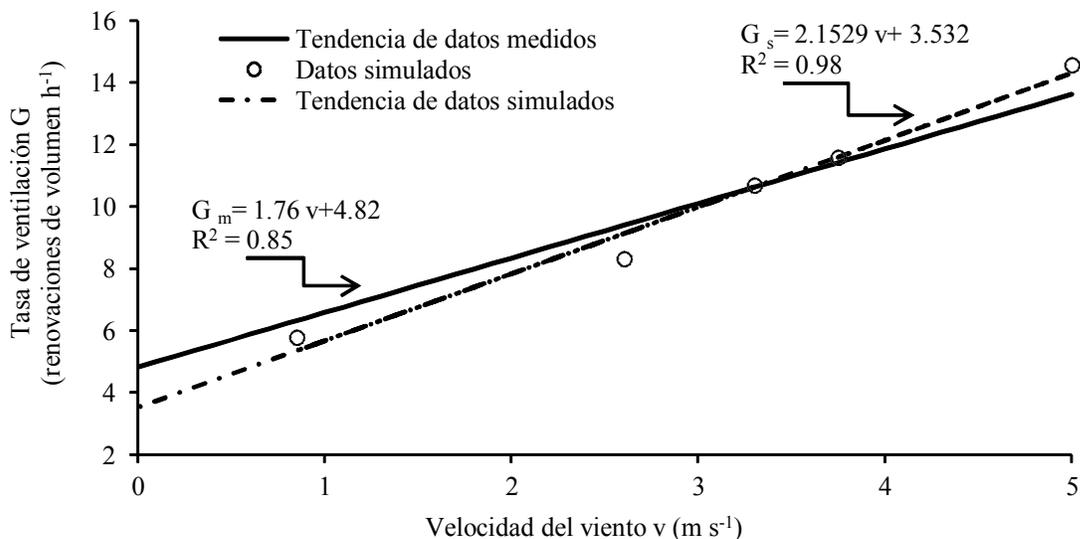


Figura 8. Datos medidos y simulados de tasas de ventilación, bajo ventilación lateral y cenital del invernadero experimental.

completo, para los casos 1, 2, 4 y 5, en 0.7, 2.6, 14.5 y 70.5 %, respectivamente; y en el caso 3, la sobreestima en 15% (Figura 9). La diferencia de resultados en el caso 5, se debe a que las velocidades de las partículas de aire y sus gradientes son elevados, según se observa en la Figura 14 y 15, de modo que el término de la aceleración convectiva del modelo de Navier-Stokes tiene un efecto considerable en el comportamiento de la trayectoria de las partículas. También se aprecia que los escenarios de ventilación natural 3 y 4, donde se manejan velocidades del aire exterior elevadas (5 m s^{-1}), no satisfacen las 60 renovaciones por hora del volumen de aire interno del invernadero, requeridas para obtener los rendimientos óptimos de algunos cultivos (Luo *et al.*, 2005). Otro aspecto a destacar en esta figura es que la ventilación resulta más eficiente cuando se utilizan simultáneamente las ventanas laterales y del techo (escenario 5), en lugar de emplear únicamente

las ventanas del techo (escenario 4) lo cual coincide con los resultados de otras investigaciones (Castilla, 2005; Kittas *et al.*, 2005).

En lo que respecta a las características de circulación de la masa de aire en el invernadero, se observó que ambos modelos matemáticos arrojaron resultados similares en los escenarios de simulación 1 y 2, por lo que en éste escrito sólo se presentan los resultados de los escenarios 3 a 5. En los escenarios donde hubo diferencias, se encontró que en algunas ventanas la dirección del aire arrojada por los modelos es opuesto; por lo que, si en un modelo indicó que el aire sale del invernadero, en el otro resulta que entra. También se observó que aunque en algunas de las ventanas se mantuvo la misma tendencia de la dirección de

Cuadro 2. Balance de masa de aire del invernadero de estudio tipo Venlo.

Tipo de modelo	Diferencia del volumen de aire que sale, respecto al que entra en el invernadero				
	Escenario				
	1	2	3	4	5
	----- % -----				
Completo	1.3	8.3	7.8	6.1	2.7
Simplificado	2.4	3.5	8.7	6.9	0.2

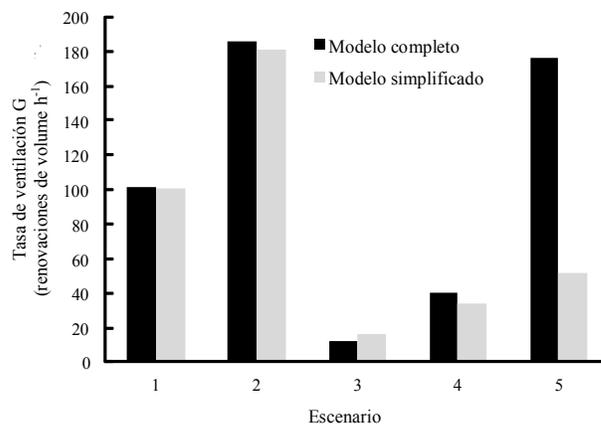


Figura 9. Tasas de ventilación de los diferentes escenarios.

las partículas, variaron ligeramente las cantidades de los flujos de aire obtenidos con los dos modelos. Por ejemplo, en el escenario 3 se observó que hay una recirculación del aire entre las ventanas VT1, VT2, VT3 y VT4 (Figura 10 y 11) en los dos modelos; sin embargo, el modelo simplificado no describe la recirculación de aire en el lado izquierdo del invernadero.

En los escenarios 4 y 5, ambos modelos matemáticos arrojaron una dirección similar de las partículas en la parte superior del invernadero; sin embargo, el modelo simplificado (Figura 13 y 15) no describe la recirculación del aire existente en el interior del invernadero (Figura 12 y 14). En todos los escenarios se observó que las velocidades del aire en el interior de los invernaderos son menores a 1 m s^{-1} , límite máximo para que no se inhiba el crecimiento de las plantas (ASAE, 1984); sin embargo, únicamente en los escenarios 2, 4 y 5, y con el modelo completo de Navier-Stokes se aproximan

al rango de velocidades requerido para el desarrollo óptimo de la mayor parte de los cultivos el cual es de 0.5 a 0.7 m s^{-1} , (Aldrich *et al.*, 1983).

Es conveniente mencionar que aunque se obtuvieron tasas de ventilación similares en la mayor parte de los escenarios con los dos modelos matemáticos, la distribución de la masa del aire en el interior del invernadero en algunos escenarios fue muy diferente y no se logró detectar con claridad las zonas donde no hay intercambio de aire con el exterior o con la fuente de suministro. Estas zonas de recirculación de aire en el interior del invernadero no son claras debido a la eliminación de la aceleración convectiva de la ecuación de la cantidad de movimiento. Este término de la ecuación, representa en gran medida la vorticidad del aire ya que puede ser expresado mediante la Ecuación 5, en la que $(\nabla \times v)$ es el rotacional de la velocidad (Marsden y Tromba, 2004).

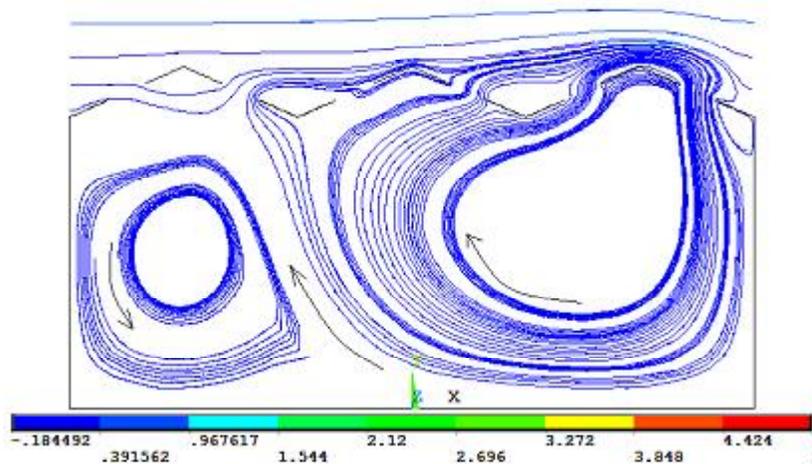


Figura 10. Líneas de trayectoria del escenario 3 (modelo completo).

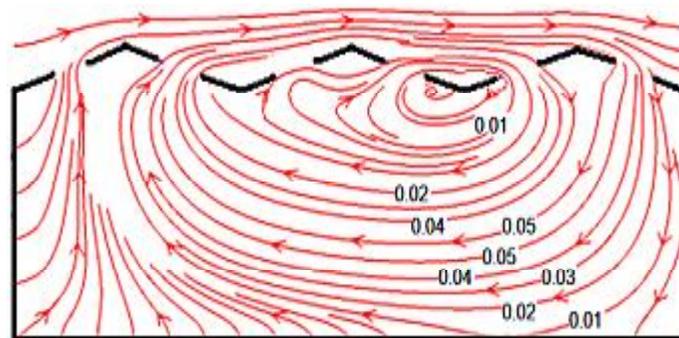


Figura 11. Líneas de trayectoria y velocidades (m s^{-1}) del aire del escenario 3 (modelo simplificado).

$$v \bullet \nabla v = \nabla \left(\frac{|v|^2}{2} \right) + (\nabla \times v) \times v \tag{5}$$

De acuerdo a los resultados observados con el modelo completo, se debe considerar la aceleración convectiva en la modelación de la ventilación en escenarios del tipo 4 y 5. Aunque en todos los escenarios son pequeñas las velocidades del aire en el interior del invernadero (de la Figura 10 a la 15), se presentaron zonas de recirculación del fluido debido a que el valor de su viscosidad es muy pequeño.

Finalmente, es importante indicar que hay ventajas computacionales de las simulaciones con el modelo simplificado ya que disminuyó la dificultad de su solución

numérica así como la cantidad de operaciones matemáticas y tiempo de cálculo requeridos, debido a la eliminación del término no lineal, representado por la aceleración convectiva, y a que se utilizó un número menor de elementos en la división del dominio de estudio. La eliminación de la aceleración convectiva impactó de forma importante en tres aspectos: simplificación de la solución numérica, reducción de los cálculos y tiempos de simulación; mientras que la división menos fina de los dominios de estudio contribuyó, principalmente, en la disminución del número de operaciones matemáticas y de los tiempos para efectuarlas. En el modelo completo se resolvieron las ecuaciones (1a) y (1b), y en el modelo simplificado las Ecuaciones 1b y 3, por lo que de acuerdo a la forma en que se dividieron los dominios de los escenarios de estudio, indicada en el Cuadro 1,

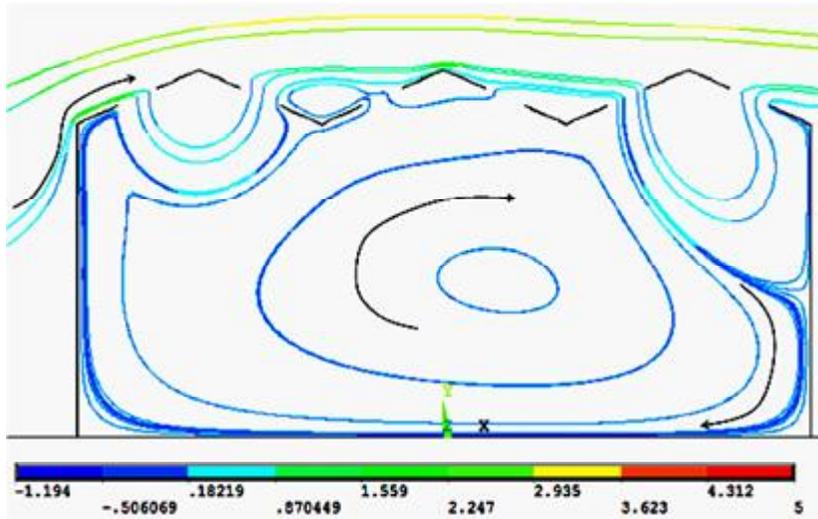


Figura 12. Líneas de trayectoria del aire del escenario 4 (modelo completo).

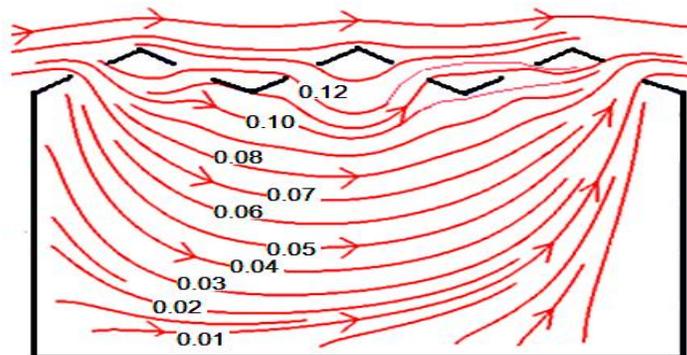


Figura 13. Líneas de trayectoria y velocidades (m s⁻¹) del aire del escenario 4 (modelo simplificado).

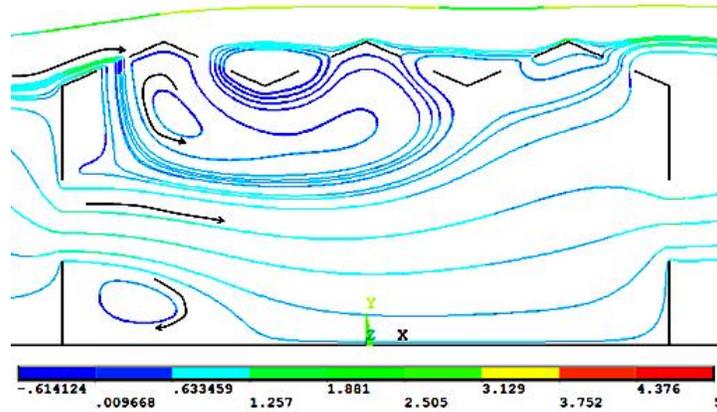


Figura 14. Líneas de trayectoria del escenario 5 (modelo completo).

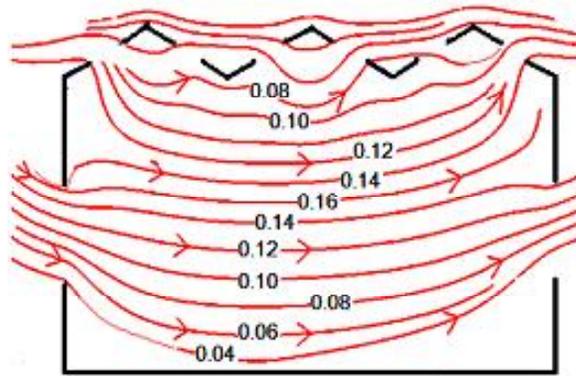


Figura 15. Líneas de trayectoria y velocidades ($m s^{-1}$) del escenario 5 (modelo simplificado).

se resolvieron más ecuaciones en el modelo completo que en el simplificado en relaciones que van desde 1.6 a 1 en el escenario tres, hasta de 22.8 a 1 en el escenario uno (Cuadro 3). Evidentemente, las simulaciones con el modelo completo demandaron mayor memoria de cálculo

del equipo de cómputo y los tiempos para efectuarlas, en un equipo con procesador Intel Core 2 Duo a 2 GHz y 8 GB de memoria RAM, resultaron desde 3 hasta 54 veces más que en el modelo simplificado, en los escenarios tres y dos, respectivamente. Si bien, resulta

Cuadro 3. Ecuaciones a resolver y tiempos de cálculo de los modelos matemáticos empleados.

Escenario	Modelo de Navier-Stokes	Tiempo de cálculo	Número de ecuaciones a resolver	Número de variables
		s		
1	Completo	1800	53 264	159 792
	Simplificado	47	2339	4190
2	Completo	2 415	53 264	159 792
	Simplificado	45	2780	4190
3	Completo	563	12 776	38 328
	Simplificado	184	7796	14 001
4	Completo	5220	114 996	344 988
	Simplificado	332	10 352	18 597
5	Completo	7380	156 316	468 948
	Simplificado	363	10 352	18 597

más sencillo indicar las instrucciones de solución numérica del modelo simplificado en los lenguajes de programación comerciales, y la memoria del equipo para realizar operaciones matemáticas y los tiempos de cálculo se reducen sustancialmente, se debe considerar un equilibrio entre la precisión de los resultados y los costos computacionales.

CONCLUSIONES

- El modelo matemático simplificado de Navier-Stokes simuló adecuadamente las tasas de ventilación global en la mayor parte de los escenarios estudiados, y sólo en algunos casos de ventilación representó la tendencia general de la circulación de la masa de aire. Por tanto, puede ser usado, en situaciones similares a las de los escenarios tratados en este estudio, como herramienta de apoyo para evaluar la funcionalidad de la geometría de los invernaderos en función del número de renovaciones del volumen de aire que pueden permitir.

- La solución numérica del modelo matemático simplificado es más sencilla y económica que la del modelo completo puesto que se puede implementar fácilmente en algún lenguaje de programación de medio y alto nivel, y requiere de menos tiempo de cómputo. Sin embargo, los resultados numéricos demandan la inclusión de la aceleración convectiva en la ecuación de la cantidad de movimiento para conocer de forma detallada la circulación interna del aire. Por ello, se debe continuar investigando en métodos simplificados que sean accesibles a los actores involucrados en el sistema de producción bajo invernaderos, como diseñadores y encargados de aprobar apoyos para su implementación, los cuales deben ser calibrados con observaciones experimentales para incrementar su potencial.

LITERATURA CITADA

- Aldrich, R. A., R. J. Downs, D. T. Krizek, and L. E. Campbell. 1983. Effect of environment on plant growth. pp. 217-254. *In*: M. A. Hellickson and J. N. Walker (eds.). *Ventilation of agricultural structures*. American Society of Agricultural Engineers. Michigan, IL, USA.
- ANSYS (Swanson Analysis Systems). 2013. Tutorial manual. CFD Version 2011. <http://www.ansys.com/Support/Documentation> (Consulta: agosto 15, 2011).
- ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 1984. Heating, ventilating and cooling greenhouses. ASAE Standards. ASAE EP406:397-400. Michigan, IL, USA.
- Baille, A. 2001. Trends in greenhouse technology for improved climate control in mild winter climates. *Acta Hort.* 559: 161-168.
- Baptista, F. J., B. J. Bailey, J. M. Randall, and J. F. Meneses. 1999. Greenhouse ventilation rate: theory and measurement with tracer gas techniques. *J. Agric. Eng. Res.* 72: 363-374.
- Bermúdez, B. y A. Nicolás. 2008. Convección natural de fluidos incompresibles y viscosos en cavidades rectangulares. *Rev. Mex. Fis.* 54: 236-246.
- Boulard, T., M. A. Lamrani, J. C. Roy, A. Jaffrin, and L. Bourden. 1998. Natural ventilation by thermal effect in a one-half scale model mono-span greenhouse. *Trans. ASABE* 41: 773-781.
- Castilla, N. 2005. *Invernaderos de plástico: Tecnología y manejo*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- EMCP (Estación Meteorológica del Colegio de Postgraduados). 2011. Estación Meteorológica del Colegio de Postgraduados. <http://www.cm.colpos.mx/meteoro/index.html>. (Consulta: febrero 5, de 2011).
- Fidaro, D., C. Baxevanou, T. Bartzanas, and C. Kittas. 2009. Investigation of flow patterns in a greenhouse with mechanically assisted ventilation. *Acta Hort.* 893: 645-652.
- Khaoua, S. A. O., P. E. Bournet, C. Migeon, T. Boulard, and G. Chassériaux. 2006. Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. *Biosyst. Engin.* 95: 83-98.
- Kirda, C., M. Cetin, Y. Dasgan, S. Topcu, H. Kaman, B. Ekici, M. R. Derici, and A. I. Ozguven. 2004. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. *Agric. Water Manage.* 69: 191-201.
- Kittas, C., T. Boulard, N. Katsoulas, T. Bartzanas, and M. Mermier. 2005. Effect of vent openings and insect screens on greenhouse ventilation. pp. 59-64. *In*: International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment". Santorini, Greece.
- Kittas, C. and T. Bartzanas. 2007. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Build. Environ.* 42: 3774-3784.
- Luo, W., C. Stanghellini, J. Dai, X. Wang, H. Feije de Zwart, and C. Bu. 2005. Simulation of greenhouse management in the subtropics, Part II: Scenario study for the summer season. *Biosyst. Eng.* 90: 433-441.
- Majdoubi, H., T. Boulard, H. Fatnassi, and L. Bourden. 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. *Agric. For. Meteorol.* 149: 1050-1062.
- Marsden, J. E. y A. J. Tromba. 2004. *Cálculo vectorial*. Pearson-Educación. Madrid, España.
- Matallana G, A. y J. I. Montero C. 1995. *Invernaderos. Diseño, construcción y ambientación*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Mesmoudi, K., A. Soudani, and P. E. Bournet. 2010. The determination of the inside air temperature of a greenhouse with tomato crop, under hot and arid climates. *J. Appl. Sci. Environ. San.* 5: 117-129.
- Molina A., F. D., D. L. Valera, and A. J. Álvarez. 2004. Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using computational fluid dynamics. *Agric. For. Meteorol.* 125: 33-51.

- Molina A., F. D., H. Fatnassi, T. Boulard, J. C. Roy, and D. L. Valera. 2010. Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses. *Comput. Electron. Agric.* 72: 69-86.
- Norton, T., D. W. Sun, J. Grant, R. Fallon, and V. Dodd. 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresour. Technol.* 98: 2386-2414.
- Reiss, E., D. R. Mears, T. O. Manning, G. J. Wulster, and A. J. Both. 2007. Numerical modeling of greenhouse floor heating. *Trans. ASABE* 50: 275-284.
- Rico G., E., J. L. Reyes A., and G. Herrera R. 2006. Simulations of the climate in two different greenhouses. *Acta Hortic.* 719: 325-332.
- Rico G., E., I. L. López C., G. Herrera R., G. M. Soto Z., and R. Castañeda M. 2008. Effect of temperature on greenhouse natural ventilation under hot conditions: Computational fluid dynamics simulations. *J. Appl. Sci.* 8:4543-4551.
- Romero G., P., C. Y. Choi, and I. L. López. C. 2010. Enhancement of the greenhouse air ventilation rate under climate conditions of central Mexico. *Agrociencia* 44: 1-15.
- Roy, J. C., T. Boulard, C. Kittas, and S. Wang. 2002. Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: The greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosyst. Eng.* 83: 1-20.
- Seif Al-Shamiry, F. M. and D. Ahmad. 2010. Development and validation of a mathematical model for ventilation rate in crop protection structures. *Pertanika J. Sci. Technol.* 18: 111-120.
- Tiwari, G. N. 2003. *Greenhouse technology for controlled environment.* Alpha Science International. Pangbourne, UK.
- Van de Braak, N. J., D. Waaijenberg, J. J. G. Breuer, and P. Knies. 1995. Greenhouse construction and equipment. pp. 161-208. *In: J. C. Bakker, P. A. Bot, H. Challa, and N. J. Van de Braak (eds.). Greenhouse climate control an integrated approach.* Wageningen Academic Publishers. Wageningen, The Netherlands.
- Versteeg, H. K. and W. Malalasekera. 1995. *An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method.* Longman Scientific and Technical. England.
- Wilcox, D. C. 1994. *Turbulence modelling for CFD.* DCW Industries, Inc. La Cañada, CA, USA.
- Zienkiewicz, O. C. and R. L. Taylor. 2000. *The finite element method. Vol. 3: Fluid dynamics.* Elsevier Butterworth-Heinemann. Oxford, UK.