

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL CLIMA INTERIOR EN UN INVERNADERO DE TRES NAVES CON VENTILACIÓN MECÁNICA

NUMERICAL ANALYSIS OF THE INNER CLIMATE IN A MECHANICALLY-VENTILATED GREENHOUSE WITH THREE SPANS

Jorge Flores-Velázquez^{1*}, Enrique Mejía-Saenz¹, Juan I. Montero-Camacho², Abraham Rojano³

¹Postgrado en Hidrociencias, Campus Montecillo, Colegio de Postgraduados. 56230. Carretera México-Texcoco, Km. 36.5. Montecillo, Estado de México. (jorgelv@colpos.mx). ²Departamento de Producción Vegetal, IRTA. 08348. Km. 2, Carretera de Cabrils. Cabrils, Barcelona, España. ³Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco. 56230. Km 38.5. Chapingo, Estado de México.

RESUMEN

Uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura en invernaderos, sobre todo en regiones de clima cálido, es moderar y controlar los problemas derivados del incremento de temperatura que ocurre en marcados periodos del año, ya que reducen la calidad y cantidad de la cosecha. Un método efectivo para el control del clima es la ventilación (natural o forzada) y aunque la ventilación forzada sea más predecible que la natural, su descripción es compleja y una simplificación obliga un mayor conocimiento del proceso. El objetivo de este trabajo fue validar y aplicar un modelo numérico basado en la dinámica de fluidos computacional (CFD) para el análisis climático de un invernadero cenital de tres naves sin cultivo y con ventilación forzada. Experimentalmente se suministran las variables escalares de temperaturas de aire y de suelo junto con valores de cesión de calor y tasas de ventilación bajo distintas condiciones exteriores. El análisis de los resultados indicó que al funcionar el sistema de ventilación forzada la tasa de ventilación es estable, independientemente de las condiciones exteriores. Para velocidades de viento bajas (menores de 3 m s^{-1}) la ventilación mecánica adquiere mayor importancia que el flujo de aire exterior debido al efecto eólico o térmico. En cuanto a las temperaturas del aire, en invernaderos pequeños (30 m de largo) el sistema de ventilación forzada presenta adecuada uniformidad térmica, cobrando importancia la posición y capacidad (potencia) de los ventiladores, ya que se observó una potencia del ventilador máxima por arriba de la cual no se incrementa la tasa de ventilación.

Palabras clave: efecto eólico, enfriamiento, gas trazador, gradiente térmico.

*Autor responsable ❖ Author for correspondence.

Recibido: octubre, 2010. Aprobado: mayo, 2011.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 45: 545-560. 2011.

ABSTRACT

One of the main problems facing agriculture in greenhouses, especially, in hot climates, is to moderate and control problems arising from increased temperatures that occurs in marked periods of the year, as they reduce the quality and quantity of the harvest. An effective method of climate control is ventilation (natural or forced) and although forced ventilation is more predictable than natural ventilation, its description is more complex and a simplification requires further knowledge of the process. The objective of this study was to validate and apply a numerical model based on computational fluid dynamics (CFD) for the climate analysis of a zenithal greenhouse of three spans without crop and with forced ventilation. Experimentally the scalar variables of air and soil temperatures along with values of heat transfer and ventilation rates under different external conditions are supplied. Analysis of results indicated that when operating the forced ventilation system, the ventilation rate is stable, regardless of external conditions. For low wind speeds (less than 3 m s^{-1}) the mechanical ventilation becomes more important than the outside air flow due to the wind or thermal effect. As to air temperatures, in small greenhouses (30 m long) the forced ventilation system provides adequate thermal uniformity, becoming more important the position and capacity (power) of the fans, since there is a maximum fan power above which the ventilation rate is not increased.

Key words: cooling, wind effect, tracer gas, thermal gradient

INTRODUCTION

Ventilation is essential in a greenhouse. Maintaining a favorable climate inside implies to evacuate the excess of heat produced during times of high insolation (Montero

INTRODUCCIÓN

La ventilación es esencial en un invernadero. Mantener un clima favorable al interior implica evacuar el exceso de calor producido en los momentos de alta insolación (Montero *et al.*, 2001). En consecuencia, un buen diseño de los sistemas de ventilación de un invernadero ha de permitir un mejor control del clima, lo que repercute en un mejor desarrollo del cultivo y su rendimiento. Ventilar de manera natural es el método de enfriamiento más usado, debido principalmente a un menor costo de instalación y mantenimiento. Sin embargo, el área de las ventanas y la necesidad de colocar mallas anti-insectos de baja porosidad causa con frecuencia que la ventilación natural no sea suficiente para extraer el exceso de energía; en estos casos la ventilación forzada puede resolver el problema. Los estudios sobre la ventilación forzada son escasos. La American Society of Agricultural Engineers proporciona las pautas de diseño de los sistemas de ventilación forzada (ASAE, 1999); sin embargo, Willits *et al.* (2006) señalan las limitaciones de la normativa de la ASAE y la dificultad de incorporar con precisión el coeficiente de transpiración en el cálculo del sistema de ventilación.

Diversos estudios (*e.g.* Montero *et al.*, 2001; Kittas *et al.*, 2005) muestran que el uso de los ventiladores permite un control más preciso de la temperatura del invernadero comparado con lo logrado en una ventilación pasiva. También Kittas *et al.* (2001) señalan que la ventilación forzada produce un gradiente en el perfil vertical de temperatura y humedad del aire mucho más homogéneo que la ventilación natural. Según Willits *et al.* (2006), aún con ventilación mecánica puede haber una falta notable de homogeneidad térmica y de humedad, pues se midieron mayores temperaturas en la parte alta del cultivo. Datos experimentales sobre ventilación mecánica en un cultivo de rosa (*cv. First red*) indican que el principal factor que determina la temperatura del aire en invernadero es la radiación solar, pudiéndose aumentar la homogeneidad climática sombreando sólo la mitad del invernadero donde el gradiente térmico sea más marcado (Kittas *et al.*, 2005). La homogeneidad puede también mejorarse manteniendo ventanas cenitales ligeramente abiertas, especialmente en invernaderos de gran tamaño (Baeza *et al.*, 2005). En este último aspecto, la combinación de la ventilación

et al., 2001). Consequently, a good design of ventilation systems in a greenhouse is to allow for a better control of climate, which results in a better crop growth and yield. Ventilate naturally is the most widely used method of cooling, primarily due to lower cost of installation and maintenance. However, the area of windows and the need to place low-porosity insect-proof screens often causes that natural ventilation is not sufficient to remove the excess of energy; in these cases forced ventilation can solve the problem. Studies about forced ventilation are scarce. The American Society of Agricultural Engineers provides the design guidelines for the forced ventilation systems (ASAE, 1999); however Willits *et al.* (2006) point out the limitations of the ASAE standards and the difficulty of incorporating accurately the coefficient of transpiration in the calculation of the ventilation system.

Several studies (*e.g.* Montero *et al.*, 2001; Kittas *et al.*, 2005) show that the use of fans allows more accurate control of the temperature in the greenhouse compared to that achieved in passive ventilation. Also Kittas *et al.* (2001) indicate that forced ventilation produces a gradient in the vertical profile of air temperature and humidity much more homogeneous than natural ventilation. According to Willits *et al.* (2006), even with mechanical ventilation there may be a remarkable lack of thermal homogeneity and humidity, as higher temperatures were measured in the upper part of the crop. Experimental data on mechanical ventilation in a rose (*cv. First red*) crop point out that the main factor that determines air temperature in a greenhouse is solar radiation and the climatic homogeneity can be increased by shading only half of the greenhouse where the thermal gradient is more marked (Kittas *et al.*, 2005). Homogeneity can also be improved having roof windows slightly open, especially in large greenhouses (Baeza *et al.*, 2005). In this latter regard, the combination of mechanical with natural ventilation is still poorly documented, so it is not yet possible to establish strong guidelines for the design and control of combined ventilation.

The studies mentioned have used experimental techniques to study natural ventilation such as the tracer gas techniques, the energy and mass balance, visual methods using scale models, direct measurement of speeds and pressures in the windows and use of scale models (Norton, 2007). Despite the efforts made in

mecánica con la ventilación natural está todavía muy poco documentada, por lo que aún no es posible establecer pautas sólidas para el diseño y control de la ventilación combinada.

Los estudios mencionados han usado técnicas experimentales para estudiar la ventilación natural como el método del gas trazador, el balance de energía y masa, los métodos visuales mediante modelos a escalas, la medida directa de velocidades y presiones en las ventanas y el uso de modelos a escala (Norton, 2007). A pesar de los esfuerzos realizados en el análisis de los mecanismos involucrados en el sistema de ventilación natural (Boulard *et al.*, 1996) y mecánica (Fernández y Bailey, 1994), el empleo de los métodos numéricos, y concretamente en el estudio de la ventilación mecánica, es incipiente (Flores-Velázquez *et al.*, 2009). Además, todas estas técnicas no explican detalladamente el proceso de intercambio de aire. El análisis computacional de la dinámica del fluido (CFD; computational fluid dynamics) es una herramienta en el análisis de la ventilación proporciona un panorama detallado del movimiento del aire y sus repercusiones en el clima interior del invernadero. Muchas interrogantes sobre el manejo del sistema de ventilación para mantener suficiente circulación del aire y lograr niveles aceptables de transmisión de calor y masa entre las plantas y el aire pueden resolverse mediante la aplicación de esta herramienta (Kacira *et al.*, 2004; Ould *et al.*, 2006; Romero-Gómez *et al.*, 2010). En este estudio se desarrolla y valida un modelo de CFD mediante el cual se analiza el funcionamiento del sistema de ventilación mecánica y su repercusión en el clima del invernadero.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tipología del invernadero

Se usó un invernadero tipo cenital en la Estación Experimental Las Palmerillas de la Fundación Cajamar, ubicado en el municipio del Ejido (Almería, España), a 2° 43' O, 36° 48' N y una altitud de 151 m. El invernadero tiene una estructura de hierro galvanizado con tres módulos de 7.5 m×28 m, una altura de 3 m en banda y 4.7 en la cumbre (Figura 1A), un área total de 630 m² y un volumen aproximado de 2618 m³.

El invernadero tiene orientación este-oeste (Figura 1A) y está cubierto de material plástico. El sistema de ventilación consiste en una ventana frontal de 2 m (largo)×1.4 m (ancho) en la pared

the analysis of the mechanisms involved in the system of natural (Boulard *et al.*, 1966) and mechanical ventilation (Fernández and Bailey, 1994), the use of numerical methods is still emerging, specifically in the study of mechanical ventilation (Flores-Velázquez *et al.*, 2009). Moreover, all these techniques do not explain in detail the process of air exchange rate. Analysis of computational fluid dynamics (CFD) is a tool in the analysis of ventilation, provides a detailed picture of air movement and its impact on the climate inside the greenhouse. Many questions about the management of the ventilation system to maintain sufficient airflow and achieve acceptable levels of heat and mass transfer between plants and air can be solved by applying this tool (Kacira *et al.*, 2004; Ould *et al.*, 2006; Romero-Gómez *et al.*, 2010). In this study a CFD model is developed and validated by which the operation of the mechanical ventilation system and its impact on the greenhouse climate is analyzed.

MATERIALS AND METHODS

Greenhouse typology

A zenithal type greenhouse was used in Las Palmerillas, an experimental field of the Cajamar Foundation, located in the municipality of El Ejido (Almería, Spain), at 2° 43' W, 36° 48' N and an altitude of 151 m. The greenhouse has a galvanized iron structure with three modules of 7.5 m×28 m and a height of 3 m in-band and 4.7 in the ridge (Figure 1A), with 630 m² total area and 2618 m³ total volume.

The greenhouse with E-W orientation (Figure 1A) is covered with plastic material. The ventilation system consists of a front window of 2 m (long)×1.4 m (wide) in the west wall of each module from which is projected 1.15 m towards the interior of the greenhouse, transforming the window into a three-dimensional cube covered with insect-proof screen (Figure 1B). This projection was to increase the inlet area thereby reducing the friction loss of flow.

Air extraction was carried out with an extractor fan Model EX50^o-1, 5, (Exafan, Spain) with a maximum flow of 42 850 m³ h⁻¹ located in the eastern direction of each one of the spans (Figure 1A). This study was conducted from February to June, 2007.

Ventilation rate measurements using the tracer gas technique

One way to characterize the efficiency of the ventilation system is through the air renovation flow-rate; in this case it is performed to know the air flow that fans are able to

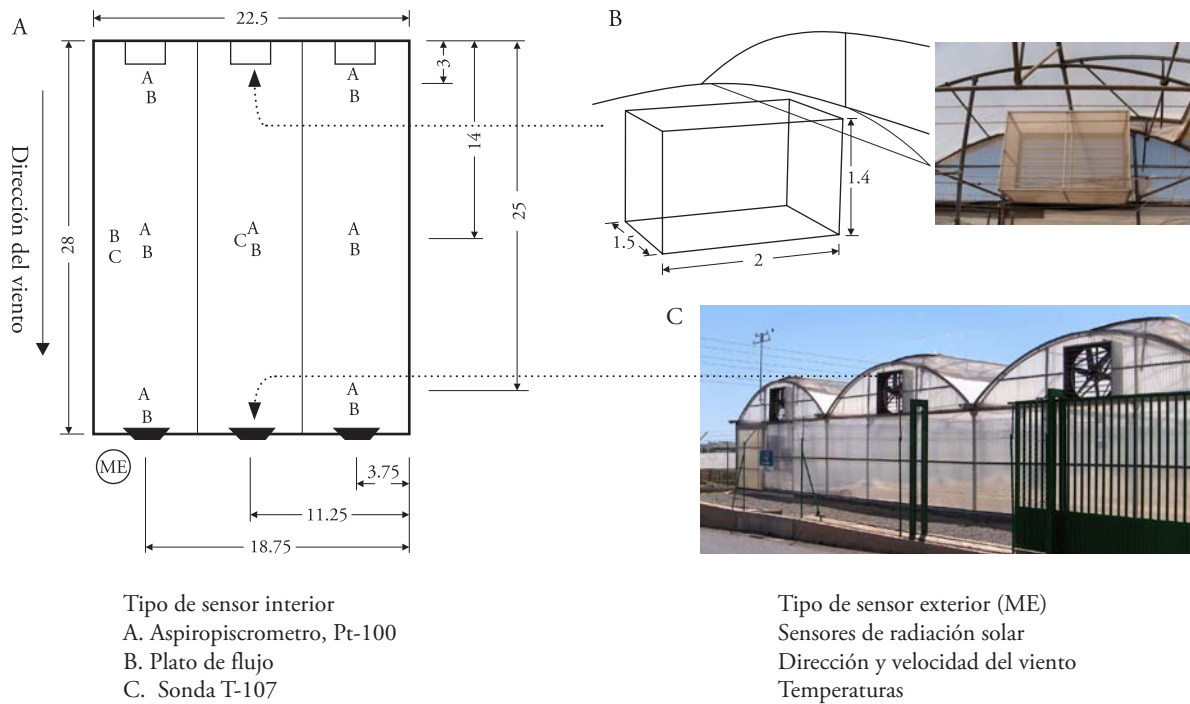


Figura 1. Dimensiones del invernadero en planta y posición de los sensores (A); proyección de la ventana frontal (cajón) de entrada de aire (B). Acotaciones en m.
Figure 1. Dimensions of the greenhouse in plan and location of sensors (A) projection of the front window (box) air inlet (B). Dimensions in m.

poniente de cada módulo a partir de la cual se proyecta 1.15 m hacia el interior del invernadero, transformando la ventana en un cubo tridimensional cubierta con malla anti-insectos (Figura 1B). Esta proyección aumenta el área de entrada reduciendo así la pérdida de flujo por fricción.

La extracción del aire se realizó con un ventilador-extractor modelo EX50[®]-1,5, (Exafan, España) con un caudal máximo de 42 850 m³ h⁻¹ localizado en la dirección este de cada nave (Figura 1A). El presente estudio se desarrolló de febrero a junio de 2007.

Medidas de tasa de ventilación mediante la técnica del gas trazador

Una forma de caracterizar la eficiencia del sistema de ventilación es mediante la tasa de renovación, en este caso se realiza para conocer el caudal de aire que los ventiladores son capaces de remover en función de la potencia a la cual están funcionando. El flujo de aire es afectado por la pérdida de carga que ocurre en las mallas anti-insectos colocada en las ventanas de entrada de aire del invernadero. El método está basado en un balance de masa del gas trazador y se considera robusto para determinar la tasa de ventilación. En este caso se utilizó el método del descenso de la concentración descrito por Boulard and Draoui (1995), usando

remove depending on the power to which they are working. The air flow is affected by the pressure drop that occurs in the insect-proof screen placed in the windows of the air inlet of the greenhouse. The method is based on a mass balance of the tracer gas and is considered robust to determine the ventilation rate. In this case, the method utilized was that of the decrease in the concentration described by Boulard and Draoui (1995), using nitrous oxide (N₂O), as a gas tracer which indicates that the variation in gas concentration with respect to time follows a behavior described by the following function (1):

$$c(t) = c_0 e^{-\phi_t} \tag{1}$$

where *c* is the concentration of gas (ppm) at a time *t* (s), *c*₀ is the initial concentration (ppm), ϕ_t is the ventilation rate measured as hourly air renovation rate (N h⁻¹) and represents the number of volumes of the greenhouse removed per hour (V h⁻¹).

During 3 min N₂O was injected in the greenhouse fully closed and when the tracer gas concentration reached a maximum the front windows were opened and the fan-extractors were turned on at 100 %.

como gas trazador óxido nitroso (N_2O), el cual indica que la variación de la concentración del gas con respecto al tiempo sigue un comportamiento descrito con la siguiente función (1):

$$c(t) = c_0 e^{-\phi_t} \quad (1)$$

donde, c es la concentración del gas (ppm) en un tiempo t (s), c_0 es la concentración inicial (ppm), ϕ_t es la tasa de ventilación medida como tasa de renovación horaria ($N h^{-1}$) y representa el número de volúmenes del invernadero removidos por hora ($V h^{-1}$).

Durante 3 min se inyectó N_2O en el invernadero totalmente cerrado y cuando la concentración del gas trazador llegó a un máximo se abrieron las ventanas frontales y se encendieron los extractores al 100 %.

La concentración de N_2O se registró con un analizador tipo Ultramat5M, (Siemens, Alemania), con una capacidad de caudal del gas por analizar de 0.5 a 2.0 $L \text{ min}^{-1}$, el cual puede ser modificado con el ordenador. Las gráficas del descenso de la concentración (ppm) y el tiempo (s) se comportaron de manera lineal, con lo que es posible calcular la tasa de renovación, adecuando el descenso de la concentración a una función exponencial (2):

$$-\phi_t = \ln \frac{c(t)}{c_0} \quad (2)$$

Las mediciones se hicieron a intervalos discontinuos en función de las características del viento exterior entre el 5 de febrero y el 7 de mayo del 2007. Después de un tratamiento estadístico previo y buscando características exteriores similares, se muestran los mejores ajustes (R^2).

Medida experimental de las condiciones climáticas

Para caracterizar el clima se colocó una serie de sensores en el interior y exterior del invernadero como se expone a continuación:

Exterior

Se instaló una estación meteorológica a 3 m del techo para obtener lecturas promedio cada 30 s y reportando un dato promedio cada 5 min. Las variables fueron: 1) temperatura: mediante dos sondas Pt100 (Thies, Clima, Alemania) para medir temperatura del bulbo seco y húmedo, 2) radiación solar: sensor de radiación solar global modelo CM11 (Thies, Clima, Alemania), 3) intensidad y dirección del viento: sensor de viento combinado anemómetro-veleta, clase estándar, tipo P6240 (Thies, Clima, Alemania).

The N_2O concentration was recorded with a gas analyzer type Ultramat5M, (Siemens, Germany), with a flow capacity of gas to be analyzed from 0.5 to 2.0 $L \text{ min}^{-1}$, which can be modified with the computer. The graphs of the decrease of concentration (ppm) and time (s) behaved in a linear way, with which it is possible to calculate the renovation rate by adapting the decrease of concentration to an exponential function (2):

$$-\phi_t = \ln \frac{c(t)}{c_0} \quad (2)$$

Measurements were made at discontinuous intervals in function of the exterior wind characteristics between February 5 and May 7, 2007. After a preliminary statistical treatment and looking for similar external characteristics, the best fits (R^2) are shown.

Experimental measure of climatic conditions

To characterize the climate a series of sensors was placed inside and outside the greenhouse as described below:

External sensors

A weather station was installed at 3 m of the roof to obtain average readings every 30 s and reporting an average datum every 5 min. The variables were: 1) temperature: using two PT100 probes (Thies Clima, Germany) to measure wet- and dry- bulb temperatures, 2) solar radiation: global solar radiation sensor model CM11 (Thies Clima, Germany) and 3) wind stress and direction: combined wind sensor, anemometer-vane P6240 (Thies, Clima, Germany).

Internal sensors

Two heat flux sensors and eight probes of temperature in the soil were installed. To measure the air temperature seven ventilated psychrometers distributed in a transversal (3.75, 11.3 and 18.8) and longitudinal (3, 14 and 25 m) form starting from the entrance located in the south-west corner of the greenhouse from which a record of each minute was obtained with an average of 10 s. Sensor were to measure: 1) temperature using seven ventilated psychrometers, with two thermal resistive devices Pt100 (dry and wet) connected to four threads installed in a casing of PRIVA (PRIVA maximizer, Netherlands), which prevents direct incidence of sunlight but with free ventilation and a 12 V suction fan; 2) soil heat flux using two plates of soil heat flux HFT3 (Campbell Sci., USA) with an operating temperature of -40 to 55 $^{\circ}C$, one in the

Interior

Se instalaron dos sensores de flujo de calor y ocho sondas de temperatura en el suelo. Para medir temperatura del aire siete psicrómetros ventilados se distribuyeron de manera transversal (3.75, 11.3 y 18.8 m) y longitudinal (3, 14 y 25 m) a partir de la entrada ubicada en la esquina sur-oeste del invernadero de los cuales se obtuvo registro cada minuto, del promedio de 10 s. Los sensores fueron para medir: 1) temperatura usando siete psicrómetros ventilados, con dos dispositivos termo resistivos Pt100 (seca y húmeda) conectados a cuatro hilos instalados en una carcasa de PRIVA (PRIVA maximizer, Holanda), que impide la incidencia directa de los rayos solares pero con libre ventilación y una succión con un ventilador de 12 V; 2) para medir flujo de calor del suelo usando dos platos de flujo de calor del suelo HFT3 (Campbell Sci., EE.UU.) con una temperatura de operación de -40 a 55 °C, uno en el pasillo en el cual había grava de granulometría media y el otro al centro del invernadero cuyo material era arena, ambos para medir la conducción de calor desde la superficie del suelo hacia capas más profundas, y su colocación fue superficial simulando el mismo nivel del suelo; 3) radiación global: se colocó en el centro del invernadero un solarímetro (Delta-T, Inglaterra), de tipo barra de 970 mm de longitud con una exactitud de ± 10 % y un tiempo de respuesta de 5 s, pero para medir transmisividad del plástico se promedió la radiación de 12 puntos distribuidos en el invernadero con un sensor cuántico lineal (LI-COR modelo LI-1000); y 4) la temperatura del suelo usando ocho sondas de temperatura de tipo termistor T-107 (Campbell Sci., EE.UU.) con un intervalo de -50 °C a 100 °C (± 2 °C) y un margen de error < 0.03 °C, colocadas en las mismas posiciones de los psicrómetros y los platos de flujo. Para todos los sensores el periodo de registro fue de abril a junio de 2007.

Las variaciones de temperatura del aire y del suelo en el interior del invernadero se registraron diariamente de 11:00 a 12:00 h con los psicrómetros a 1 m de altura, y de 12:00 a 13:00 h con los sensores a 2 m, para registrar los gradientes térmicos a la altura de influencia del cultivo. La distribución transversal y longitudinal de los sensores, tanto en el suelo como en el invernadero, quedaron fijas y sólo la vertical fue modificada; los sensores de flujo de calor también permanecieron fijos. De todos los datos, se seleccionaron para su análisis un intervalo diario de 30 min cerca al medio día solar, cuando se esperan las condiciones climáticas más adversas. Los datos de temperatura ambiental y su análisis fueron promedios de 30 min entre las 11:20 a 11:50 h solar de altura a 1 m y de 12:00 a 12:30 h a altura de 2 m.

Los sensores de temperatura del suelo (T-107) y del aire (psicrómetros) fueron calibrados para comparar los datos y generar

hall in which there was gravel of average particle size and the other to the center of the greenhouse whose material was sand, both to measure the conduction of heat from the soil surface to deeper layers, and their placement was superficial simulating the same ground level; 3) global radiation: in the center of the greenhouse a bar-type solarimeter (Delta-T, England) was placed, of 970 mm in length with ± 10 % accuracy and a response time of 5 s, but to measure transmissibility of the plastic it was averaged the radiation of 12 points distributed in the greenhouse with a linear quantum sensor (LI-COR model LI-1000); and 4) soil temperature using eight probes of thermistor-type temperature of T-107 (Campbell Sci., USA) were used with an range of -50 °C to 100 °C (± 2 °C) and an error margin < 0.03 °C, placed in the same positions of the psychrometers and the flux plates. For all the sensors the record period was from April to June, 2007.

Variations of air and soil temperature inside the greenhouse were daily recorded from 11:00 to 12:00 h with the psychrometers at 1 m high, and from 12:00 to 13:00 h with sensors at 2 m, to record the thermal gradients at the height of influence of the crop. The transversal and longitudinal distribution of the sensors, both in the soil and the greenhouse, were fixed and only the vertical was modified; also, the heat flux sensors were fixed. From all data, it was selected for analysis a daily interval of 30 min near solar noon, when the most adverse weather conditions are expected. Data of environmental temperature and their analysis were averages of 30 min between 11:20 to 11:50 h solar height at 1 m from 12:00 to 12:30 at height of 2 m.

The soil (T-107) and air (psychrometers) temperature sensors were calibrated to compare data and generate a correction factor by which the data presented here were recalculated. It should be noted that for the case of psychrometers the differences were 0.4 °C and for the T-107 probes in the soil was up to 0.9 °C.

Construction of the computational model (CFD)

The process of construction and simulation of a model by computational fluid dynamics comprises three stages that can be performed in series: 1) preprocessing, 2) solution and 3) post-processing. Preprocessing is dedicated to building geometry and division in a finite number of elements through a mesh. Figure 2 outlines the process of building the computational model.

This analysis is carried out in three dimensions (Figure 2). From a real greenhouse (Figure 2A) the geometry shown in Figure 2B [$28 \times 22.5 \times 5.1$ m] is constructed, in which the fluid areas are divided and identified (Figure 2C), then it is inserted in a fluid space ($68 \times 82.5 \times 30$ m) which is also meshed

un factor de corrección, mediante el cual se recalcularon los datos que aquí se presentan. Cabe señalar que para el caso de los psicrómetros las diferencias fueron de 0.4 °C y para las sondas T-107 en el suelo fue de hasta 0.9 °C.

Construcción del modelo computacional (CFD)

El proceso de construcción y simulación de un modelo mediante dinámica computacional de fluidos (CFD) comprende tres etapas que se pueden ejecutar en serie, 1) el preproceso, 2) la solución y 3) el post-proceso. El preproceso está dedicado a la construcción de la geometría y división en un número finito de elementos mediante una malla. En la Figura 2 se esquematiza el proceso de construcción del modelo computacional.

Este análisis se realiza en tres dimensiones (Figura 2). A partir de un invernadero real (Figura 2A) se construye la geometría mostrada en la Figura 2B [28×22.5×5.1m], en la cual se divide e identifican las aéreas fluidas (Figura 2C), luego se inserta en un espacio fluido (68×82.5×30 m) el cual también es mallado (634 325 celdas) (Figura 2D) y así se obtiene el modelo computacional.

El movimiento del fluido está basado en procesos físicos que se formulan como una serie de ecuaciones en derivadas parciales

(634 325 cells) (Figure 2D) and thus the computational model is obtained.

The fluid motion is based on physical processes formulated as a series of partial derivative equations to represent the laws describing the flow. Particularly considering the flow of a fluid (air) within the domain $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ during a time interval $[0, t]$, the flow dynamics at each point x , and in a specific time t is determined by state variables, mass density $\rho(x, t)$, the velocity field $u(x, t)$ and its energy $e(x, t)$, characteristics included in the Navier-Stokes (N-S) equations. This set of nonlinear equations describing the motion of a fluid motion, which for their resolution are discretized into a system of algebraic equation. Mainly three physical foundations support them: mass balance, time and energy conservation. Their deduction is typically explained by a mass and energy balance on a control volume (Anderson, 1995); the general equation of transport in differential form can be written as in 3 (Patankar, 1980).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\partial\bar{u}\phi) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S\phi \quad (3)$$

Four terms comprise the equation: transience, convection, diffusion and source term, ∇ is the operator nabla denoting the

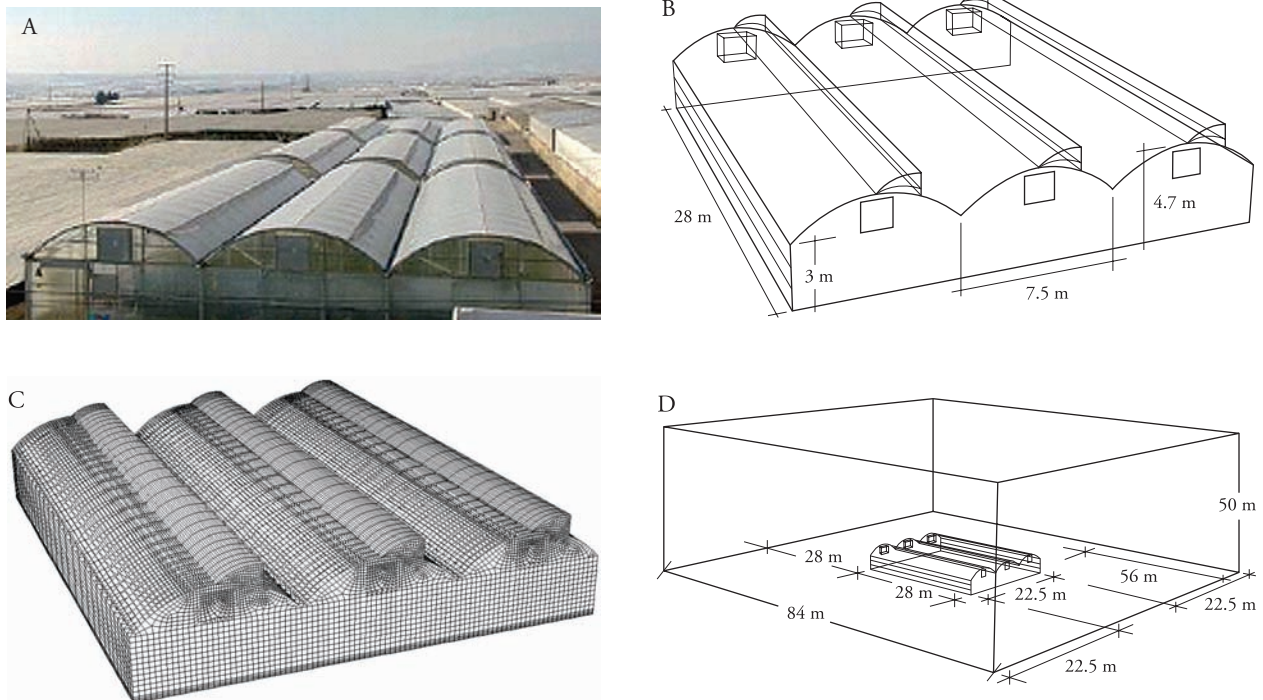


Figura 2. Proceso de construcción del modelo computacional que inicia con A) la selección del invernadero a modelar, del cual B) se genera la geometría y C) en ella se realiza el mallado con lo que se construye D) el modelo por simular.

Figure 2. Process of construction of the computational model that starts with A) the selection of the greenhouse to be modeled, from which B) geometry is generated and C) with it the mesh is done so that D) model is constructed to simulate.

para representar las leyes que describen el flujo. Particularmente si se considera el flujo de un fluido (aire) dentro del dominio $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ durante un intervalo de tiempo $[0, t]$, la dinámica del flujo en cada punto x , y en un instante específico t está determinada por las variables de estado, densidad de masa $\rho(x, t)$, el campo de velocidad $u(x, t)$ y su energía $e(x, t)$, características incluidas en las ecuaciones de Navier-Stokes (N-S). Este conjunto de ecuaciones no lineales describen el movimiento de un fluido, las cuales para su resolución se discretizan en un sistema de ecuaciones algebraicas. Principalmente, tres fundamentos físicos las soportan: balance de masa, momento y conservación de energía. Su deducción es típicamente explicada a través de un balance de masa y energía sobre un volumen de control (Anderson, 1995); la ecuación general de transporte en forma diferencial puede escribirse como en 3 (Patankar, 1980).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(\bar{u}\phi) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S\phi \tag{3}$$

Cuatro términos componen esta ecuación: transitoriedad, convección, difusión y término fuente: ∇ es el operador nabla que denota el gradiente de velocidad, Γ representa el coeficiente de difusión y la variable ϕ es una forma de variable dependiente, pudiendo ser masa, velocidad, factor químico o temperatura, y describe las características del flujo en una localización puntual en un tiempo específico; en un espacio tridimensional sería $\phi = \phi(x, y, z, t)$. Este sistema de ecuaciones se resuelve mediante CFD y para este caso se utilizó el programa comercial de ANSYS Workbench® para el desarrollo de las simulaciones.

La validación del modelo se efectuó inicializando el proceso de simulación con los datos experimentales y asumiendo las siguientes hipótesis: algoritmo de resolución PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators); la formulación implícita con una condición de tiempo estacionario y usando el modelo de turbulencia K- ϵ de dos ecuaciones, los escenarios de simulación se muestran en el Cuadro 1. El tratamiento de la malla fue descrito por Flores-Velázquez y Montero (2008) y el cálculo del aporte de calor se detalla en Flores-Velázquez *et al.* (2009.)

Cuadro 1. Escenarios de simulación.
Table 1. Simulation scenarios.

Variable	Validación tasa (N)	Validación temperaturas
Temperatura exterior (K)	Constante 286.6	297.0
Velocidad del viento (m s^{-1})	Constante 3.8	2.5
Tratamiento de mallas	16.1 × 10.2 hilos cm^{-2}	
Fuente de calor (W m^2)	Constante desde el suelo 315	
Potencia del ventilador	Constante 10 MPa (curva carga <i>vs.</i> caudal)	

velocity gradient, Γ is the diffusion coefficient and the variable ϕ is a dependent variable and can be mass, velocity, chemical or temperature factor, and describes the flow characteristics in a marked location at a specific time; in a tridimensional space it would be $\phi = \phi(x, y, z, t)$. This system of equations is resolved by CFD and for this case the commercial ANSYS Workbench® program was used to the development of simulations.

Model validation was performed by initializing the process simulation with experimental data and assuming the following hypotheses: resolution algorithm PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators); the implicit formulation with a condition of stationary time and using the K- ϵ turbulence model of two equations, the simulation scenarios are shown in Table 1. Treatment of the mesh was described by Flores-Velázquez and Montero (2008) and the calculation of heat input is detailed in Flores-Velázquez *et al.* (2009).

RESULTS AND DISCUSSION

Ventilation rate

Figure 3 shows the behavior of the ventilation rate with respect to outside wind speed (m s^{-1}), the global outside radiation (W m^{-2}) and the difference of temperatures between the outside and inside air of the greenhouse ($^{\circ}\text{C}$). The ventilation rate was relatively stable; in any case the regression coefficients show low dependence between the ventilation rate with the external wind, the solar radiation and the thermal jump, indicating that the mechanical ventilation system can operate independent of external environmental conditions. Under conditions of no wind, the thermal effect should be responsible for the differences in the renewal rate between greenhouses. Still, the ventilation process seems dominated by the mechanical extractors, which supply most of the ventilation rate reflected in Figure 3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tasa de ventilación

La Figura 3 muestra el comportamiento de la tasa de ventilación con respecto a la rapidez del viento exterior (m s^{-1}), la radiación global exterior (W m^{-2}) y a la diferencia de temperaturas entre el aire exterior y del interior del invernadero ($^{\circ}\text{C}$). La tasa de ventilación fue relativamente estable, en cualquier caso los coeficientes de regresión muestran la baja dependencia entre la tasa de ventilación con el viento externo, la radiación solar y el salto térmico, lo que indica que el sistema de ventilación mecánica puede funcionar de manera independiente a las condiciones ambientales exteriores. En condiciones de viento nulo, el efecto térmico debe ser el responsable de las diferencias en la tasa de renovación entre invernaderos. Aún así, el proceso de ventilación parece dominado por los extractores mecánicos, que suministran la mayoría de la tasa de ventilación reflejada en la Figura 3.

La mayoría de ensayos se han hecho con viento de poniente que crearía la succión cerca del cajón de entrada de aire. Es posible que el efecto eólico se oponga al movimiento de aire creado por los extractores. En general los valores de renovación del aire son bajos y críticos (comparados con las recomendaciones de la ASAE (1999) de 45 a 60 renovaciones por hora) si se considera que el experimento se llevó a cabo sin cultivo, lo que denota un sistema de ventilación por mejorar, mediante sombreado o la apertura de ventanas cenitales.

Most trials have been done with wind from the west which would create the suction near the opening of air inlet. It is possible that the air effect is opposed to the air movement created by the extractors. In general, the values of air renovation are low and critical (compared to the recommendations of the ASAE (1999) of 45 to 60 renovations per hour) considering that the experiment was carried out without cultivation, which denotes a ventilation system to improve, by shade or the opening of roof windows.

Scale profiles of air and soil temperature

Figure 4A shows the average data from 3 d with similar climatic conditions. The coefficient of variation (CV) for the average temperatures at 1 m height was 0.08. The evolution of thermal gradient is shown in the longitudinal direction; air enters with environmental temperature, usually lower than that of the inside, which will be increasing its value as it approaches to the extractor.

Although there is a growing trend in the thermal gradient in the direction of airflow that indicates the effectiveness of the system at center of the greenhouse, there are variations that suggest a localized cooling capacity due mainly to the movement of air generated inside, giving rise to the formation of heat spots in some areas, which is critical under these conditions where there is no crop influence.

Figure 4B presents mean data (3 d under similar climatic conditions) of thermal gradient of soil in different positions within the greenhouse. There is a

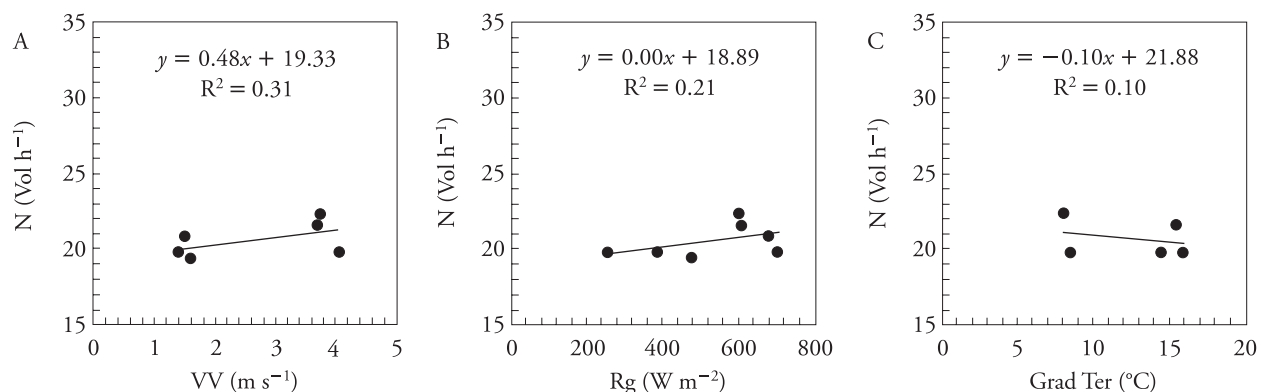


Figura 3. Comparativo de tasa de renovación (N [Vol. h^{-1}]) frente a rapidez del viento exterior (A) [m s^{-1}], radiación exterior (B) [W m^{-2}] y salto térmico (C).

Figure 3. Comparison of the renovation rate (N [Vol. h^{-1}]) versus external wind speed (A) [m s^{-1}], external radiation (B) [W m^{-2}] and thermal jump (C).

Perfiles escalares de temperatura del aire y del suelo

La Figura 4A presenta los datos promedio de 3 d con condiciones climáticas similares. El coeficiente de variación (CV) para los promedios de temperatura a 1 m de altura fue 0.08. Se muestra la evolución del gradiente térmico en el sentido longitudinal, el aire entra con la temperatura ambiental, generalmente más baja que la del interior, la cual va aumentando su valor en la medida que se acerca al extractor.

A pesar de que existe una tendencia creciente del gradiente térmico en el sentido del flujo del aire que indica la eficacia del sistema en el centro del invernadero, existen variaciones que sugieren una capacidad de enfriamiento localizada debido principalmente al movimiento de aire que se genera en el interior, dando origen a la formación de bolsas de calor en algunas zonas, lo cual es crítico bajo estas condiciones donde no existe la influencia del cultivo.

En la Figura 4B se presentan datos medios (3 d con condiciones climáticas similares) del gradiente térmico del suelo en distintas posiciones dentro de invernadero. Existe una área de influencia crítica por la entrada de aire exterior localizada en la parte inferior de las ventanas frontales, identificada con los mayores gradientes de temperatura (Figura 4B), que disminuye a medida que se avanza hacia el centro y

critical influence area by the entrance of exterior air located at the bottom of the front windows, identified with the largest gradients of temperature (Figure 4B), that decreases as moving toward the center and outlet of the greenhouse. The idea of ventilate is based on performing a mixture of air to maintain the volume of air in the greenhouse at a uniform temperature, situation applicable to soil temperature particularly in early stages of crops; however, the temperature difference in soil is remarkable emphasizing a great spatial and temporal variability.

Heat flow in the soil

The values of heat transfer from the surface of soil to deeper soil layers of sand are of the order of 90 W m^{-2} for a sanding soil, and 160 W m^{-2} for a soil with a thicker granulometry. The soil is the thermal storehouse of the greenhouse: the heat captured during the day raises temperature of deeper layers. At night the heat transmission has an upward direction and soil gives heat to the air (Montero *et al.*, 2005). The most important of these measures of heat flow and temperature of the soil surface will be the possibility of using it as boundary condition in numerical modeling works. Similarly, with the temperature data from the soil surface formulas of convection heat transfer can be applied from soil to

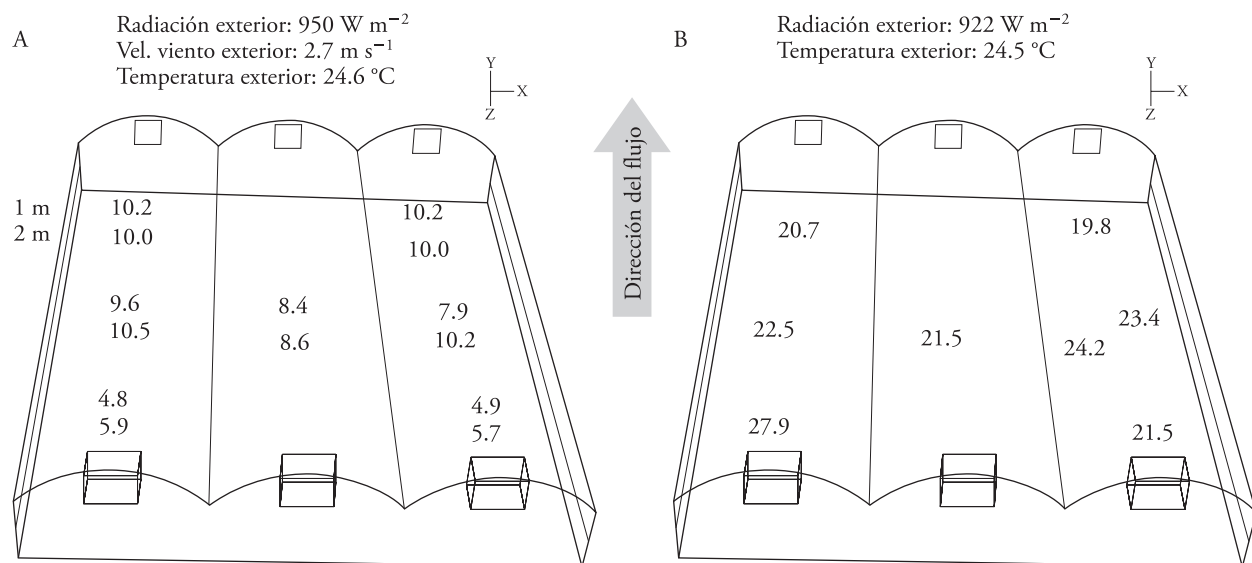


Figura 4. Posición de los sensores y sus valores promedio de gradiente térmico del aire A) a 1 y 2 m de altura del suelo y B) en el suelo.
Figure 4. Position of sensors and their average values of air thermal gradient A) at 1 and 2 m height from the ground and B) in the soil.

salida del invernadero. La idea de ventilar está basada en realizar una mezcla de aire con el fin de mantener el volumen de aire del invernadero a una temperatura homogénea, situación aplicable a la temperatura del suelo sobre todo en etapas tempranas de los cultivos; sin embargo, la diferencia de temperatura en el suelo es notable resaltando una gran variabilidad espacial y temporal.

Flujo de calor en el suelo

Los valores de transmisión de calor desde la superficie del suelo hacia capas más profundas del suelo de arena son del orden de 90 W m^{-2} para un suelo enarenado, y 160 W m^{-2} para un suelo con granulometría más gruesa. El suelo es el almacén térmico del invernadero: el calor captado durante el día hace subir la temperatura de las capas más profundas. Por la noche la transmisión de calor tiene un sentido ascendente y el suelo cede calor al aire (Montero *et al.*, 2005). La importancia mayor de estas medidas de flujo de calor y de temperatura de la superficie del suelo será la posibilidad de usarlo como condición de frontera en trabajos de modelación numérica. De la misma forma, con los datos de temperatura de la superficie del suelo se pueden aplicar fórmulas de cesión de calor por convección del suelo al aire del invernadero (Kindelán, 1980), factor que tiene una función muy importante en el clima del invernadero.

Validación del modelo

Las condiciones de frontera para inicializar el modelo se fijaron utilizando los resultados experimentales de temperatura del aire, rapidez del viento y flujo de calor (Cuadro 1). El Cuadro 2 compara los datos de caudal de aire medidos con la técnica del gas trazador y los simulados con CFD usando los datos puntuales de una condición.

La técnica del gas trazador se usa ampliamente para este tipo de análisis, aun cuando se encuentran variaciones del 20 %. Los resultados del Cuadro 2 muestran la concordancia entre lo medido y lo simulado, e indican que el método es confiable para el análisis. Análogamente, mediante CFD se hicieron las simulaciones alimentando el modelo con los datos puntuales que se determinaron experimentalmente (Cuadro 1).

the greenhouse air (Kindelan, 1980), a factor that plays a very important function in the greenhouse climate.

Validation of the model

The boundary conditions to initialize the model were fixed using the experimental results of air temperature, wind speed and heat flow (Table 1). Table 2 compares the data of the flow of air measured with the tracer gas technique and the simulated ones with CFD using the precise data of a condition.

The tracer gas technique is a methodology widely used for this type of analysis, although there are variations of 20 %. The results of Table 2 indicate a very appropriate match between what is measured and what is simulated, which indicates a good approximation of the method and gives confidence for the analysis. Similarly, by means of CFD simulations were made by feeding the model with precise data that were determined experimentally (Table 1).

In Figure 5A the longitudinal variation of the thermal gradient, the average experimental data and the simulated ones by the numerical model are compared. It also shows the correlation between both values. The goodness of the method highlights by allowing continuous monitoring of the longitudinal profile of temperature gradient and also due to the capacity of the forced ventilation system to maintain the thermal gradient in two thirds of the greenhouse.

The difference of thermal gradients in function of height (Figure 5C) indicates the problem of temperature stratification. This suggests that with increased heat load to remove the mixing of air,

Cuadro 2. Tasa de ventilación calculada mediante el método del gas trazador y su correspondiente con CFD.

Table 2. Calculated ventilation rate by tracer gas method and its corresponding with CFD.

Método gas trazador	Caudal ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Tasa de renovación (N h^{-1})
Total invernadero	55 149.8	21.1
Promedio por nave	18 383.3	7.0
Simulada en CFD		
Total invernadero	58 643.2	22.4
Promedio nave	19 547.7	7.5

En la Figura 5A se compara la variación longitudinal de gradiente térmico, datos experimentales promedio y los simulados mediante el modelo numérico. Asimismo, muestra la concordancia entre ambos valores. La bondad del método resalta al permitir un seguimiento continuo del perfil longitudinal de gradiente de temperatura y además por la capacidad que tiene el sistema de ventilación forzada para mantener el gradiente térmico en dos tercios del invernadero.

La diferencia de gradientes térmicos en función de la altura (Figura 5C) indica el problema de estratificación de temperaturas. Esto sugiere que con una mayor carga térmica para remover el mezclado del aire, debe haber un parámetro considerando la distancia entre entrada y salida de aire en función del recorrido que el viento debe hacer para su intercambio, debido a la influencia del movimiento vertical del aire producido por la posición de los extractores (Figura 5B), como lo describen Fernández y Bailey (1994).

Aplicación del modelo en el análisis del clima

Una vez verificado el modelo, con el fin de analizar el funcionamiento del sistema de ventilación mecánica bajo diferentes condiciones ambientales y con las variables del Cuadro 1, se hacen las simulaciones y analizan las temperaturas que se producirían en el

there must be a parameter considering the distance between air inlet and outlet depending on the path that wind should do for its exchange, due to the influence of vertical air movement produced by the position of the extractors (Figure 5B) as described by Fernández and Bailey (1994).

Application of the model in the analysis of climate

Once verified the model, in order to analyze the operation of the mechanical ventilation system under different environmental conditions and with the variables in Table 1, the simulations are carried out and the temperatures are analyzed which would occur in the greenhouse if the outside temperature were of 295 K (± 23 °C) and a wind speed of 2 m s⁻¹.

As a result, Figure 6A shows the longitudinal profile of the normalized wind speed measured at 2 m from soil and its subsequent longitudinal profile of thermal gradient (Figure 6B) resulting from that airflow. The wind speed entering the greenhouse undergoes a reduction in velocity of 90 % with respect to the outside speed (2 m s⁻¹). Although there is a thermal gradient of 5 K which can be considered high, it remains constant along the length of the greenhouse, which falls into a thermal uniformity and can be expected a similar behavior of relative humidity in accordance with findings in other studies (Teitel *et al.*, 2010).

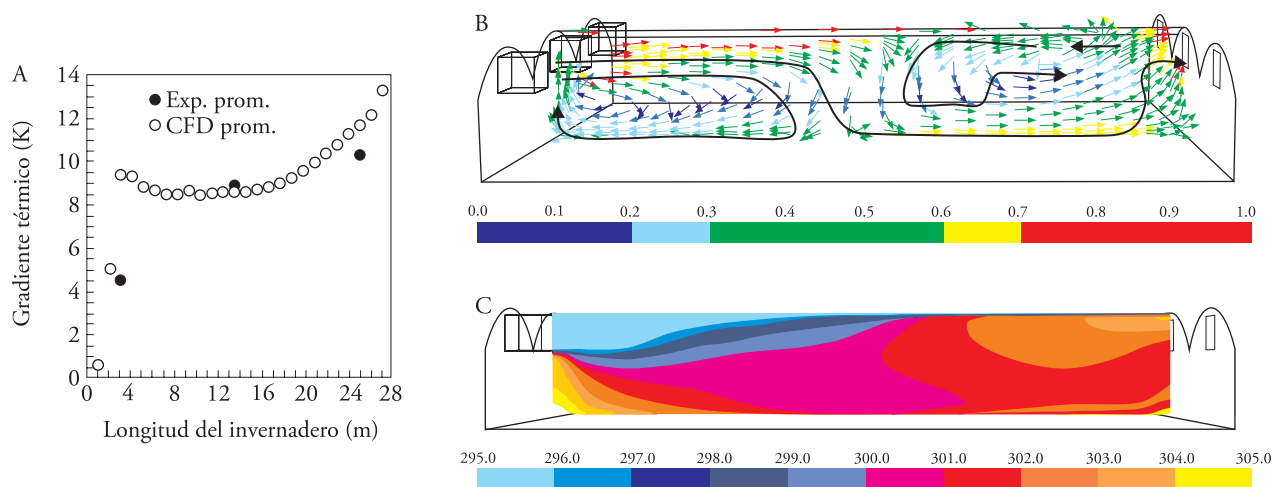


Figura 5. A) Comparativo del gradiente térmico promedio entre lo medido (●) y lo simulado (○), B) líneas de flujo y C) perfil vertical de temperaturas, observados en la nave central.
 Figure 5. A) Comparison of the average thermal gradient between the measured (●) and simulated (○), B) flow lines and C) vertical temperature profile observed in the central span.

invernadero si la temperatura exterior fuera de 295 K (± 23 °C) y una rapidez del viento de 2 m s^{-1} .

Como resultado, la Figura 6A muestra el perfil longitudinal de la velocidad del viento normalizada medida a 2 m del suelo y su consecuente perfil longitudinal de gradiente térmico (Figura 6B) que resulta de ese flujo de aire. La rapidez del viento al penetrar el invernadero sufre una reducción de velocidad de 90 % (0.2 m s^{-1}) respecto a la rapidez exterior (2 m s^{-1}). Aunque hay un gradiente térmico de 5 K que puede considerarse alto, permanece constante en la longitud del invernadero, lo cual incide en una uniformidad térmica y puede esperarse un comportamiento similar de humedad relativa de acuerdo con lo encontrado en otros estudios (Teitel *et al.*, 2010).

En la Figura 7A se muestra una vista en planta de la distribución espacial del viento a 2 m de altura (zona de cultivo). Al inducir la entrada del aire por un conducto reducido, las velocidades se aceleran y esto origina un desplazamiento hacia las orillas de la ventana de entrada, por lo cual se observa una tendencia de los flujos hacia las paredes del invernadero. Consecuentemente (Figura 7B) las temperaturas son más frescas en las naves exteriores. Es posible que a nivel de la superficie de suelo se produzca un movimiento de aire inverso al que ocurre a 1 o 2 m de altura, fenómeno observado en estudios sobre ventilación natural de invernaderos tipo raspa y amagado (Baeza, 2005).

La conveniencia de la proyección de la ventana de entrada fue otro factor por analizar mediante el modelo. En la Figura 8 se comparan los vectores de velocidad y los perfiles de temperatura que se originan en los dos escenarios: A) invernadero con la proyección de la ventana de entrada y B) invernadero con la ventana plana. Hay una zona

A view in plant of the spatial distribution of wind at 2 m height (area of crop) is shown in Figure 7A. By inducing the entrance of air through a reduced duct, speeds accelerate, this causes a shift towards the edge of the inlet window, so there is a tendency of flows to the walls of the greenhouse. Consequently (Figure 7B), the temperatures are cooler in exterior spans. It is possible that at ground surface level there is a reverse air movement that occurs at 1 to 2 m high, phenomenon observed in studies on natural ventilation of sloping-roof type greenhouses (Baeza, 2005).

The convenience of the path of the inlet window was another factor to be analyzed by the model. In Figure 8 the vectors of velocity and temperature profiles that originate in two scenarios are compared: A) greenhouse with the path of the inlet window, and B) greenhouse with the flat window. There is a critical low-speed area at the bottom of the inlet window as shown in Figure 8B; according with simulations carried out, this area may be better ventilated through the path of the window (Figure 8A). In general there is a cooler area especially in the first half of the greenhouse where the thermal gradient with path of window is reduced to 1 K and the wind speed is about twice respect to the greenhouse without projection.

Finally, an evaluation was performed about the effect of the power of the fan, changing the flow that would be provided by the fans which for this case were 10.9, 30.5 and 35.8 N h^{-1} , corresponding to 1, 25, and 35 Pa. Figure 9 shows the profile of the gradient of temperatures that is generated with these flows put on the fans.

When the flow is very low, temperatures are increased to a significant extent, however, when a maximum value is reached, the inlet windows and extractors have no impact on climate conditions.

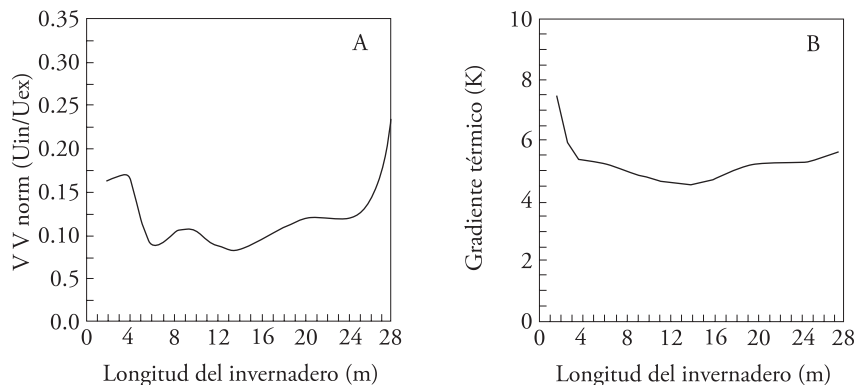


Figura 6. Perfil longitudinal de la magnitud del viento interior normalizado (A) y gradiente térmico longitudinal (B) medidos a 2 m de altura.

Figure 6. Longitudinal profile of the magnitude of inner wind standardized (A) and longitudinal thermal gradient (B) measured at 2 m height.

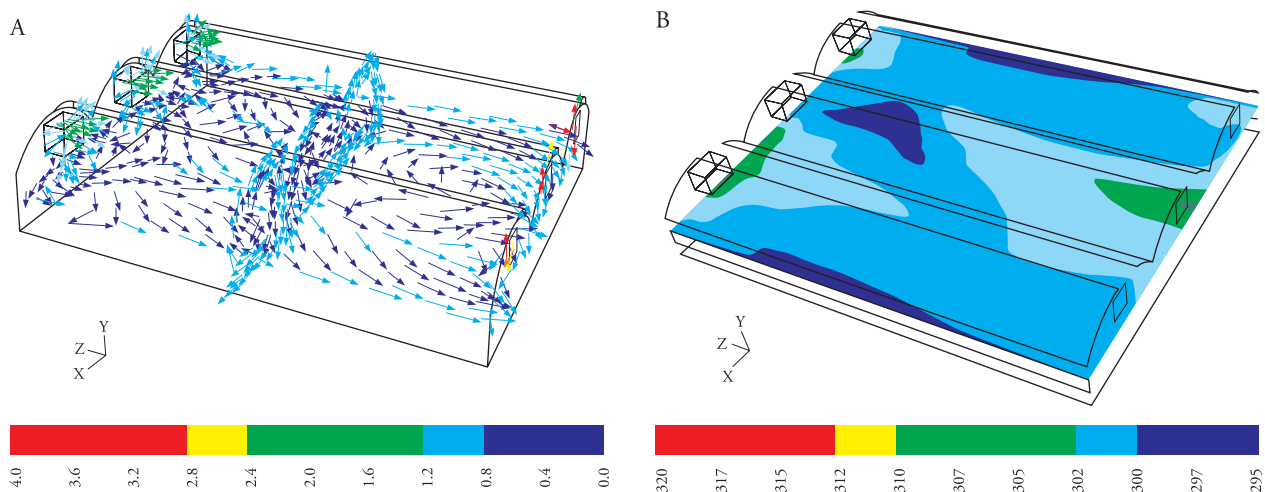


Figura 7. Vista en planta de la distribución espacial de la velocidad del viento ($m s^{-1}$) (A) y de la temperatura del aire (K) (B) medidos a 2 m del suelo.

Figure 7. View in plant of the spatial distribution of the velocity of wind ($m s^{-1}$) (A) and the wind temperature (K) (B) measured at 2 m height from ground.

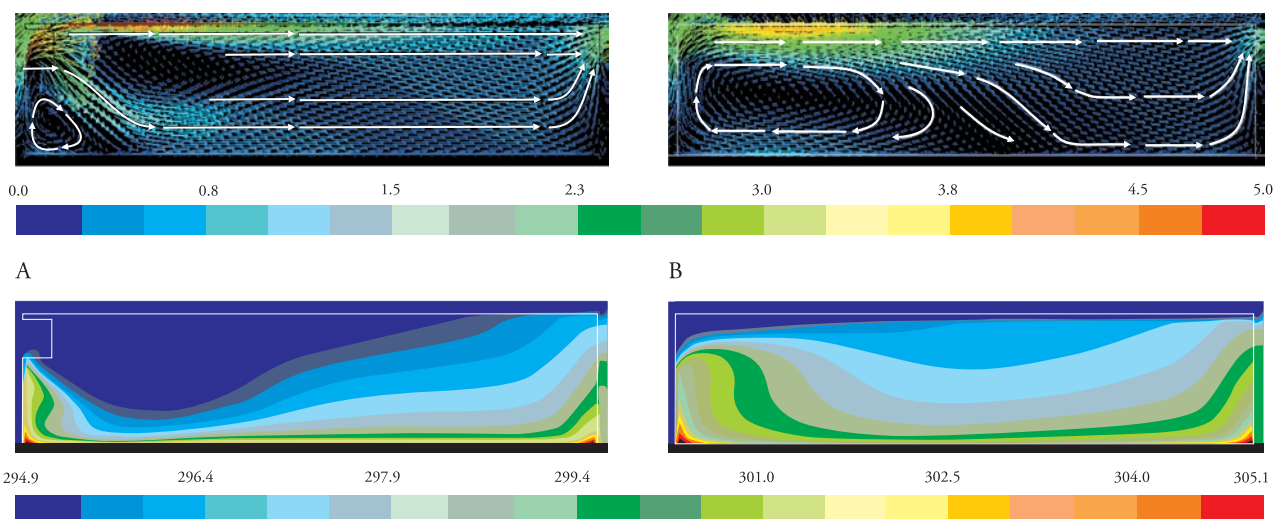


Figura 8. Comparativo de velocidad del viento ($m s^{-1}$) con proyección de ventana (A) y perfiles de temperatura del aire ($^{\circ}K$) en el invernadero sin la proyección (B). Velocidad del viento exterior $4 m s^{-1}$, flujo de calor del suelo $315 W m^{-2}$.

Figure 8. Comparison of the wind speed ($m s^{-1}$) with window projection (A) and air temperature profiles ($^{\circ}K$) in the greenhouse without the projection (B). External wind speed $4 m s^{-1}$, soil heat flow $315 W m^{-2}$.

critica de baja velocidad en la parte inferior de la ventana de entrada como se observa en la Figura 8B; de acuerdo con las simulaciones realizadas, esta zona puede ventilarse mejor mediante la proyección de la ventana (Figura 8A). En general se observa una zona más fresca sobre todo en la primera mitad del invernadero donde el gradiente térmico con proyección de ventana se reduce hasta 1 K y la velocidad de viento es el doble respecto al invernadero sin la proyección.

Thus, the renovation rates of 30 and 35 times per hour practically provide the same increase in temperature, similar to that observed by Sapounas *et al.* (2008).

CONCLUSIONS

The dependence of the natural ventilation system with the outside of a greenhouse can be minimized with a forced ventilation system, since this presents an

Finalmente, se evaluó el efecto de la potencia del ventilador, modificando el caudal que aportarían los ventiladores que para este caso fueron 10.9, 30.5 y 35.8 N h^{-1} , correspondientes a 1, 25 y 35 Pa. En la Figura 9 se muestra el perfil del gradiente de temperaturas que se genera con estos caudales impuestos en los ventiladores.

Cuando el caudal es muy bajo, las temperaturas se incrementan notablemente; no obstante, cuando se llega a un valor máximo, las ventanas de entrada y extractores ya no repercuten en el acondicionamiento del clima. Así, tasas de renovación de 30 y 35 veces por hora proporcionan prácticamente el mismo aumento en la temperatura, similar a lo observado por Sapounas *et al.* (2008).

CONCLUSIONES

La dependencia del sistema de ventilación natural con el exterior de un invernadero puede ser minimizada con un sistema de ventilación forzada, ya que ésta presenta una adecuada tasa de ventilación de manera independiente. Para rapideces de viento moderadas (menores de 3 m s^{-1}) la ventilación forzada tiene más importancia relativa que el efecto eólico.

En este estudio se observó que la tasa de renovación de aire es insuficiente como parámetro para definir la eficiencia del sistema de ventilación, pues aun cuando ésta aumente, puede existir una distribución heterogénea de temperaturas producto del movimiento del aire. Los factores principales que determinan esta variabilidad son la magnitud y

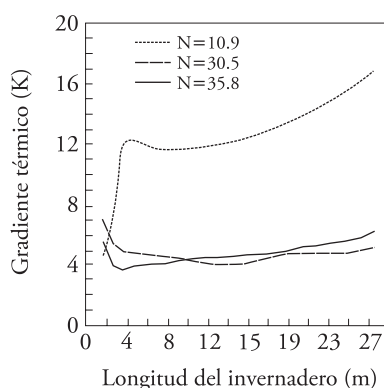


Figura 9. Gradiente térmico para tres tasas de renovación (N h^{-1}) aportada por los ventiladores.

Figure 9. Thermal gradient for three renovation rates (N h^{-1}) provided by fans with (A) and without (B).

adequate independent ventilation rate. For moderate wind velocities (less than 3 m s^{-1}) forced ventilation has more relative importance than the air effect.

In this study it is observed that it is not sufficient the air renovation rate as parameter to define the efficiency of the ventilation system, because even if it increases, there may be a heterogeneous distribution of temperatures result of the air movement. The main factors determining this variability are the magnitude and direction of wind, the greenhouse structure, position and type of windows. Additionally, the air inlet surface is as important as the air outlet, noting that when the maximum allowable air flow is met through windows and extractors, an increase in fan power does not impact on an improvement in the longitudinal profile of the thermal gradient.

The projection of the front window allows better airflow in the lower area next to the air inlet achieving better conditions in the thermal gradient during the first half of the greenhouse.

—End of the English version—



dirección del viento, la estructura de invernadero, posición y tipo de ventanas. Además la superficie de entrada de aire es tan importante como la de salida, pues cuando se satisface el máximo flujo de aire permisible por las ventanas y extractores, un aumento en la potencia del ventilador no repercute en una mejora en el perfil longitudinal de gradiente térmico.

La proyección de la ventana frontal permite mejor flujo de aire en la zona baja inmediata a la entrada de aire logrando mejores condiciones en el gradiente térmico durante la primera mitad del invernadero.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la estación experimental de Cajamar, “Las palmerillas” por las facilidades otorgadas para la realización de este experimento.

LITERATURA CITADA

Anderson Jr. J. D. 1995. Computational Fluid Dynamics. The Basics with Applications. Mc. Graw-Hill. USA. 547 p.

- ASAE Standards. 1999. Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses, ANSI/ASAE Standard EP406.3, ASAE Standards. pp: 677-690.
- Baeza, E. J., J. J. Pérez-Parra, and J. I. Montero. 2005. Effect of ventilator size in natural ventilation in parral greenhouse by means of CFD simulations. *Acta Hort.* 691: 465-472.
- Boulard, T., and B. Draoui. 1995. Natural ventilation of a greenhouse with continuous roof vents: measurements and data analysis. *J. Agric. Engine. Res.* 61: 27-36.
- Boulard, T., J. F. Meneses, M. Mermier, and G. Papadakis. 1996. The mechanisms involved in the natural ventilation of greenhouses. *Agric. For. Meteorol.* 79: 61-77.
- Fernandez, J. E. and B. J. Bailey. 1994. The influence of fans on environmental conditions in greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.* 58: 201-210.
- Flores-Velazquez, J., and J. I. Montero. 2008. Computational Fluid Dynamics CFD study of large scale screenhouse. *Acta Hort.* 797: 117-122.
- Flores-Velázquez, J., J. I. Montero, and E. Baeza. 2009. Analysis of mechanical ventilation in a three span greenhouse using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Acta Hort.* 893: 653-660.
- Kacira, M., S. Sase, and L. Okushima. 2004. Effects of side vents and span numbers on wind-induced natural ventilation of a gothic multi-span greenhouse. *JARQ* 38(4): 227-233.
- Kindelán, M. 1980. Dynamic modelling of greenhouse environment. *Trans. ASAE* 1980: 1232-1239.
- Kittas, C., N. Katsoulas, and A. Baille. 2001. Influence of greenhouse ventilation regime on microclimate and energy partitioning of a rose canopy during summer conditions. *J. Agric. Engine. Res.* 79(3): 349-360.
- Kittas C., M. Karamanci, and N. Katsoulas. 2005. Air temperature in a forced ventilation greenhouse with rose crop. *Energy Build.* 37: 807-812.
- Montero, J. I., G. R. Hunt, R. Kamarudddin, A. Anton, and B. J. Bailey. 2001. Effect of ventilator configuration on wind driven ventilation in a crop protection structure for the tropics. *J. Agric. Eng. Res.* 80: 99-107.
- Montero, J. I., P. Muñoz, A. Antón, and N. Iglesias. 2005. Computational fluid dynamic modelling of night-time energy fluxes in unheated greenhouses. *Acta Hort.* 691: 403-409.
- Norton T., D. W. Sun, J. Grant, R. Fallon, and V. Dodd. 2007. Application of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Biores. Tech.* 98: 2386-2414.
- Ould Khaoua S. A., P. E. Bournet, C. Migeon, T. Boulard, and G. Chasseriaux. 2006. Analysis of greenhouse ventilation efficiency based on computational fluid dynamics. *Biosystem Eng.* 95: 83-98.
- Patankar S. V. 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.* Hemisphere, Washington. 210 p.
- Pérez-Parra, J. J., E. Baeza, J. I. Montero, and B. J. Bailey. 2004. Natural ventilation of parral greenhouses. *Biosystems Eng.* 87(3): 89-100.
- Romero-Gomez, P., Choi Y. Christoper, and I. L. Lopez C. 2010. Enhancement of the greenhouse air ventilation rate under climate conditions of central Mexico. *Agrociencia* 44(1): 1-15.
- Sapounas, A. A., T. Bartzanas, C. Nikita, and C. Kittas. 2008. Aspects of CFD modeling of fan and pad evaporative cooling system in greenhouses. *Int. J. Vent.* 614: 739-388.
- Teitel, M., M. Atias, and M. Barak. 2010. Gradients of temperature, humidity and CO₂, along a fan-ventilated greenhouse. *Biosystem Eng.* 106: 166-174.
- Willits, D. H., S. Li, and C. A. Yunker. 2006. The cooling performance of natural ventilated greenhouse in the southeastern US. *Proc. Int. Symp. on Greenhouse Cooling.* *Acta Hort.* 719: 73-80.