

Diseño de un sistema de ventilación forzada para un invernadero cenital usando CFD*

Design of a forced ventilation system for a Zenithal greenhouse using CFD

Jorge Flores-Velázquez¹ y Federico Villarreal-Guerrero^{2§}

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Coordinación de Riego y Drenaje. Paseo Cuauhnahuac 8532. Jiutepec, Morelos, México. 62550. Tel: 777 329 3600, Ext. 422. (jorge_flores@tlaloc.imta.mx). ²Facultad de Zootecnia y Ecología. Universidad Autónoma de Chihuahua. Perif. Fco. R. Almada km 1. Chihuahua, Chihuahua, México. C. P. 31453. [§]Autor para correspondencia: fvillarreal@uach.mx.

Resumen

El crecimiento de los cultivos bajo invernadero en México, se ha visto frenado por factores relacionados con el control del clima. El clima producido dentro del invernadero es en gran medida una consecuencia de las condiciones ambientales del lugar donde se localiza el invernadero y del diseño del mismo; así como de la configuración y operación de los sistemas de control como el sistema de ventilación. El análisis del efecto del sistema de ventilación sobre el comportamiento del clima es fundamental para optimizar su manejo. La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una técnica numérica que permite analizar el comportamiento del clima del invernadero bajo diferentes escenarios. Esta técnica fue utilizada para modelar el clima de un invernadero cenital de tres capillas. Cada capilla mide 7.5 m de ancho por 28 m de largo. El invernadero cuenta con un sistema de ventilación mecánico que consiste en una ventana frontal de entrada de aire y el ventilador (extractor) mecánico de aire en el lado opuesto. Se analizaron tres configuraciones para el sistema de ventilación, las cuales combinan la posición de las ventanas, la superficie de entrada de aire, y la altura de instalación de ambos, las ventanas y los extractores. Los resultados indican que la ventana de entrada de aire plana, produce una velocidad media del aire de $0.81 \pm 0.69 \text{ m s}^{-1}$, temperatura media de $297.97 \pm 1.17 \text{ K}$, temperatura máxima

Abstract

The growth of greenhouse crops in Mexico has been hampered by factors related to climate control. The climate produced in the greenhouse is largely a consequence of the environmental conditions where the greenhouse is located and the design thereof; as well as the configuration and operation of control systems like ventilation systems. The analysis of the effect of ventilation systems on the behavior of the climate is critical to optimize its management. The computational fluid dynamics (CFD) is a numerical technique that allows analyzing the behavior of greenhouse climate under different scenarios. This technique was used to model climate of a zenith greenhouse of three spans. Each span is 7.5 m wide by 28 m long. The greenhouse has a mechanical ventilation system consisting of a front window as air intake and an extractor fan on the opposite side. Three configurations were analyzed for the ventilation system, which combine the position of the windows, air intake surface, and the height of installation of both windows and extractor fan. The results indicate that the plane front window of air intake, produces an average air velocity of $0.81 \pm 0.69 \text{ m s}^{-1}$, average temperature of $297.97 \pm 1.17 \text{ K}$, maximum temperature of 303.62 K , a thermal gradient of 8.67 K , and showed limiting the air renewal mainly in the lower part next to the entrance window.

* Recibido: julio de 2014

Aceptado: diciembre de 2014

de 303.62 K, un gradiente térmico de 8.67 K, y mostró limitantes en la renovación del aire principalmente en la parte inferior inmediata a la ventana de entrada.

Palabras clave: fluidos, gradiente térmico, horticultura, velocidad del viento.

Introducción

La producción hortícola en México es uno de los sectores básicos de la economía nacional al estar dedicada principalmente a satisfacer el mercado estadounidense. Con un incremento anual de 20%, la superficie cultivada bajo invernadero México se ha colocado en un sexto lugar a nivel mundial (INEGI, 2010). La mayoría de construcciones de invernaderos se han caracterizado por el empleo de estructuras sencillas, de bajo costo, y de baja altura como los existentes en la región de Andalucía, España (Castilla, 1994), con un limitado control climático para producir condiciones apropiadas de humedad y temperatura (Lorenzo *et al.*, 1998). Dicho control en la mayoría de los casos en México, se reduce a la manipulación de las ventilas del invernadero (Abreu *et al.*, 1994). Estas características pueden no ser las mejores al momento de producir cultivos en regiones con variables medioambientales diferentes.

En el establecimiento de un invernadero, son diversos los factores a considerar para su diseño y construcción; en regiones de clima cálido o semiárido una buena ventilación debe ser considerada básica para su funcionamiento (Conellan, 2002). El sistema de ventilación es el factor clave a considerar porque impacta directamente sobre las condiciones climáticas producidas dentro de la estructura y consecuentemente, en el desarrollo del cultivo. La ventilación de los invernaderos depende de la estructura del propio invernadero; un mal diseño del mismo puede crear problemas de “estratificación” debido a fenómenos de transferencia de energía, como el flujo de energía por convección, circulando a través del cultivo. En invernaderos pasivos (ventilación natural), un sistema de ventilación eficaz aunado con la propia evapotranspiración del cultivo, pueden ser suficiente para mantener niveles de temperatura y humedad del aire aceptables durante buena parte del año (Arbel *et al.*, 2003).

Keywords: fluids, horticulture, thermal gradient, wind speed.

Introduction

Horticultural production in Mexico is one of the core sectors of national economy for being devoted primarily to satisfy US markets. With an annual increase of 20%, the cultivated area under greenhouse has placed Mexico sixth worldwide (INEGI, 2010). Most constructions of greenhouses have been characterized by the use of simple structures, low cost, and low altitude as those in the region of Andalucía, Spain (Castilla, 1994), with limited climate control to produce appropriate conditions of humidity and temperature (Lorenzo *et al.*, 1998). Such control in most cases in Mexico is reduced to the manipulation of the vent gases (Abreu *et al.*, 1994). These characteristics may not be the best when producing crops in regions with different environmental variables.

In establishing a greenhouse, there are various factors to consider in their design and construction; in warm or semiarid climates good ventilation should be considered for basic operation (Conellan, 2002). The ventilation system is the key factor to consider because it impacts directly on weather conditions produced within the structure and consequently, in the development of the crop. Ventilation of greenhouses depends on the structure of the greenhouse itself; poor design can create the same problems of "layering" due to energy transfer phenomena, such as convection flow of energy circulating through the crop. In passive greenhouses (natural ventilation), an effective ventilation system coupled with the very crop evapotranspiration, may be enough to maintain acceptable levels of temperature and air humidity for a good part of the year (Arbel *et al.*, 2003).

Natural ventilation is widely used as cooling method to reduce the temperature of the air during the days of high insolation in traditional greenhouses (Boulard and Baille, 1995; Montero *et al.*, 1996; Papadakis *et al.*, 1996; Kittas *et al.*, 1997; Kittas, 2000). However, low wind speeds, presence of anti-insect nets among other factors reduce the efficiency of the natural ventilation system and then it is necessary to resort to forced or mechanical ventilation.

La ventilación natural es el método de refrigeración más utilizado para reducir la temperatura del aire durante los días de alta insolación en los invernaderos tradicionales (Boulard y Baille, 1995; Montero *et al.*, 1996; Papadakis *et al.*, 1996; Kittas *et al.*, 1997; Kittas, 2000). Sin embargo, bajas velocidades del viento, la presencia de mallas anti-insectos entre otros factores, reducen la eficiencia del sistema de ventilación natural y entonces es necesario recurrir a la ventilación forzada o mecánica.

La ventilación mecánica incluye un ventilador que incrementa el flujo de salida del aire. Mantallana y Montero (1989) consideran que el uso de los ventiladores permite un control más preciso de la temperatura del invernadero que el que puede lograrse con la ventilación natural. Kittas *et al.* (2001) mostraron que la ventilación forzada produce un campo vertical de temperatura y humedad del aire mucho más homogéneo que la ventilación natural. El uso de las ventanas cenitales ligeramente abiertas permite un mejor manejo y evita gradientes longitudinales de temperatura y humedad, especialmente en invernaderos de gran tamaño (Baeza *et al.*, 2004).

En el presente trabajo se utiliza dinámica de fluidos computacional por sus siglas en inglés (CFD) como herramienta para el análisis de un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. El modelo computacional de este invernadero fue validado previamente por Flores-Velázquez *et al.* (2011). El invernadero fue construido en 3 Dimensiones, y para su validación se usó la técnica de los gases trazadores y para las temperaturas se distribuyeron espacialmente una serie de sensores (Flores-Velázquez *et al.*, 2011) en el invernadero y una estación meteorológica en el exterior.

El objetivo fue estudiar el clima producido en el invernadero como resultado en la modificación de factores implicados en el diseño de un sistema de ventilación mecánica. Dicho sistema incluyó una ventana de entrada de aire y su correspondiente extractor para la salida del mismo. Tres configuraciones de forma y posición de la ventana y posición del extractor fueron estudiadas. Se analizó el efecto de dichas configuraciones en la velocidad del viento y los gradientes térmicos producidos dentro del invernadero. Lo anterior con el objetivo de aportar información sobre el desempeño del sistema y plantear cual es la mejor configuración de ventana y extractor con fines de producción de cultivos en invernaderos.

Mechanical ventilation includes a fan which increases air outflow. Mantallana and Montero (1989) consider that the use of the fan allows a more precise control of the temperature in the greenhouse than the one that can be achieved with natural ventilation. Kittas *et al.* (2001) showed that forced ventilation produces a vertical field of temperature and air humidity more homogeneous than natural ventilation. Using zenithal windows slightly open allows a better management and prevents longitudinal gradients of temperature and humidity, particularly in large greenhouses (Baeza *et al.*, 2004).

The present study uses computational fluid dynamics (CFD) as a tool for the analysis of a greenhouse with three spans and mechanical ventilation. The computational model of this greenhouse was previously validated by Flores-Velázquez *et al.* (2011). The greenhouse was built in 3 dimensions, and for its validation the tracer gas technique was used and for temperatures a number of sensors were spatially distributed (Flores-Velázquez *et al.*, 2011) in the greenhouse and a weather station in the outside.

The aim was to study the climate produced in the greenhouse as a result in the modification of factors involved in the design of a mechanical ventilation system. This system included a window for air intake and its corresponding extractor fan for exit of the same. Three configurations of shape and position of the window and position of the extractor were studied. The effect of such configurations in wind speed and temperature gradients produced within the greenhouse were analyzed: this in order to obtain information on system performance and propose which is the best window configuration and extractor for crop production in greenhouses.

Materials and methods

Description of the experimental site

Greenhouse characteristics simulated in this study are shown in Figure 1 (Flores-Velázquez *et al.*, 2011). The structure consists of three spans with chapel roof and plastic cover. The dimensions are 7.5 m wide per span (22.5 * 28 m) (Figure 1A). The greenhouse has three front windows of 2 * 1.4 m, one per span (Figure 1B). As a complementary part of the analysis, this window was designed to increase its

Materiales y métodos

Descripción del sitio experimental

Las características del invernadero simulado en este estudio se muestran en la Figura 1 (Flores-Velázquez *et al.*, 2011). La estructura consta de tres naves con techo en capilla y cubierta plástica. Las dimensiones son 7.5 m de ancho por nave (22.5 * 28 m) (Figura 1A). El invernadero tiene tres ventanas frontales de 2 * 1.4 m, una por nave (Figura 1B). Como parte complementaria del análisis, esta ventana fue proyectada para incrementar su área de paso y con ello el volumen de aire; en las paredes de la ventana fue colocada una malla anti-insecto de 16 * 20 hilos cm⁻¹ (Figura 1C).

Por cada ventana de entrada de aire, el invernadero tenía un ventilador-extractor modelo EX50"-1, 5 (Exafan, España) instalado en la pared opuesta a la ventana como se muestra en la Figura 1D. La evaluación y simulación del invernadero se consideró bajo condiciones críticas, que es al medio día en verano y cuando el cultivo está recién trasplantado, por lo que en este caso se simula sin plantas.

Construcción del modelo computacional

Para este estudio el análisis del clima del invernadero se realizó con la técnica de dinámica de fluidos computacional. Esta herramienta afirma que la dinámica de un flujo en un conducto puede ser descrita mediante la aplicación de las ecuaciones de Navier Stokes (N-S) a través de un balance de masa, momento y energía sobre un volumen de control (Anderson, 1997). Para resolver estas ecuaciones se utilizó el programa comercial Ansys workbench V14.5, el cual contiene las interfaces para la generación de la geometría (Design Model), el mallado (Design Meshing) y el procesamiento (solución numérica). La simulación y solución del sistema se llevó a cabo usando el método de volúmenes finitos, para lo cual se utilizó el programa comercial de Ansys-fluent.

Escenarios de simulación

En la Figura 2 se muestran las configuraciones que se analizaron en este estudio, las cuales se exponen a continuación:

Configuración 1: ventana frontal plana en la pared del invernadero, colocada en la parte más alta de la capilla (Figura 2A), al igual que el ventilador (extractor).

passing area and thus the volume of air; on the walls of the window was placed an anti-insect nets of 16 * 20 threads cm⁻¹ (Figure 1C).

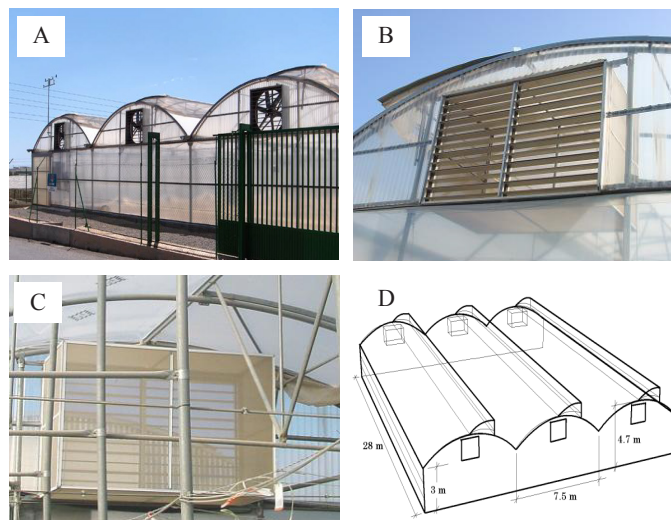


Figura 1. Características del invernadero simulado, A) los ventiladores; B) la ventana de entrada plana; C) la ventana de entrada proyectada; y D) el modelo del invernadero construido.

Figure 1. Characteristics of simulated greenhouse, A) fans; B) plane entrance window; C) the projected intake window; and D) model of the greenhouse built.

For each air intake window, the greenhouse had a extractor fan EX50"-1, 5 (Exafan, Spain) installed on the wall opposite to the window as shown in Figure 1D. The greenhouse evaluation and simulation was considered under critical conditions, which is at noon in summer and when the crop is recently transplanted, which in this case is simulated without plants.

Construction of the computational model

For this study the greenhouse climate analysis was performed using the technique computational fluid dynamics. This tool states that the dynamics of a flow in a pipe can be described by applying the Navier Stokes (N-S) equations through a mass balance, momentum and energy on a control volume (Anderson, 1997). To solve these equations the Ansys Workbench V14.5 commercial program was used, which contains interfaces for generating geometry (Design Model), meshing (Design Meshing) and processing (numerical solution). The simulation and system solution was performed using the finite volume method, for which the Ansys-fluent commercial program was used.

Configuración 2: ventana frontal proyectada 1 m hacia adentro del invernadero (Figura 2B), colocada en la parte alta del invernadero y de frente al ventilador.

Configuración 3: ventana frontal proyectada 1 m hacia adentro del invernadero, colocada a nivel del suelo, al igual que el ventilador.

El modelo fue validado bajo condiciones de clima mediterráneo, con el sistema de ventilación mecánica funcionando, con las ventilas cenitales cerradas, encontrándose correlaciones superiores a 90% (Flores-Velázquez *et al.*, 2011). Para el presente trabajo se utilizaron las características medio ambientales del centro de México, específicamente las de San Luis Potosí, tomadas de la estación meteorológica localizada en el Invernadero de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), en San Luis Potosí, México. Dicha estación fue colocada en una zona adyacente al invernadero, a 8 m de altura la cual monitoreaba las variables de temperatura y humedad relativa del aire (Vaisala HMP60, Woburn, MA, USA; $\pm 0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 3\%$), radiación solar (LI-200SA, LiCor, Inc., Lincoln, NE, USA), y velocidad y dirección del viento (03101 Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA; 0 to 50 m s^{-1} , $\pm 0.5\text{ m s}^{-1}$; 0 to 360°, $\pm 5^{\circ}$).

Geográficamente, el invernadero se localiza en 22° 14' 04" latitud norte y 100° 52' 18" longitud oeste, con 1 836 msnm, tiene una temperatura media anual de 22 °C y 565.4 mm de precipitación media anual. La dirección de los vientos dominantes es N-S, paralelo a la ventana cenital, con velocidades promedio de 2 m s^{-1} durante el día y ráfagas de 4 m s^{-1} . Estas fueron los valores de las variables simuladas. Las condiciones de frontera se especifican en la Cuadro 1. La densidad del aire se asumió de 1.221 kg cm^{-3} .

Cuadro 1. Hipótesis y condiciones de frontera utilizadas para la simulación.
Table 1. Hypothesis and boundary conditions used for the simulation.

Hipótesis de simulación	
Solver	Segregado, basado en presión
Formulación	Implícita
Condiciones de tiempo	Estacionario
Modelo de viscosidad	K-ε de dos ecuaciones
Características de frontera	
Temperatura	Constante (295 K)
Velocidad del viento	Constante (4 m s^{-1})
Tratamiento de medios porosos	Malla anti-insecto 16 x 20 hilos cm^{-1} en ventanas
Fuente de calor	Constante desde el suelo (315 W m^{-2}), se asumió la hipótesis de Boussinesq y se activó el efecto de flotación en el modelo de turbulencia
Potencia del ventilador	Constante (1.1 kW)

Simulation scenarios

Figure 2 shows the configurations that were tested in this study, which are discussed below:

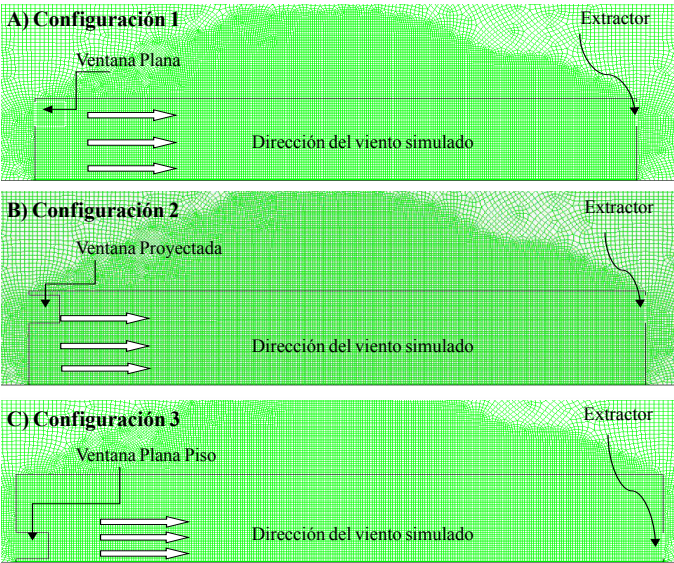


Figura 2. Escenarios de simulación y características de la malla. A) ventana plana y extractor en la cumbre; B) ventana proyectada al interior y extractor en la cumbre; y C) ventana proyectada al interior y extractor a nivel del suelo.

Figure 2. Simulation scenarios and characteristics of the mesh. A) flat window and extractor on the roof; B) window projected inward and extractor on the roof; and C) window projected inward and extractor at ground level.

Configuration 1: plane front window in the wall of the greenhouse, placed on the top of the chapel (Figure 2A), as the fan (extractor).

Resultados y discusión

Los resultados de cada escenario de simulación se muestran en las Figuras 3-6 y se visualizan mapas verticales de velocidades del viento y temperatura en el centro del invernadero, así como de magnitudes escalares de rapidez del viento y de temperatura del aire en el centro y a lo largo del invernadero.

Perfiles de velocidad del viento

La Figura 3A muestra el sistema de ventilación mecánico funcionando de acuerdo a la configuración 1, representada por la Figura 2A. Esta ubicación de la ventana de entrada de aire y ventilador corresponde a la forma tradicional que usan los invernaderos en México. Se observan las direcciones y magnitudes de la velocidad del viento bajo este esquema. En la ventana de entrada se genera una diferencia de presiones entre el exterior y el interior debido a la reducción del área de paso, lo cual origina la entrada de aire a mayor velocidad. Las velocidades mayores de viento interiores se mantienen en la parte alta del invernadero. Sin embargo, en la zona de cultivo, éstas se reducen hasta 80% con respecto a la parte superior del invernadero (Figura 4), observándose un área crítica en la zona baja-inmediata a la ventana de entrada.

El aire que no logra entrar por la ventana, al momento del choque, incrementa su velocidad, se eleva por encima del invernadero y pierde esta energía posteriormente, reduciendo su velocidad al grado de invertir su dirección.

De acuerdo con la ecuación de Bernoulli, la caída de presión es función directa del cuadrado de la velocidad en un área de paso; por lo tanto, si se aumenta esta área de paso, es posible atenuar dicha reducción. Para la configuración 2 (Figura 3B) y la configuración 3 (Figura 3C) se simuló una ventana proyectada (Figura 1C) en vez de una ventana plana. Con esta modificación al diseño del sistema de ventilación, la superficie de entrada de la ventana se incrementó de 2 a 10 m².

Los resultados de velocidad del viento de la configuración 2 se muestran en la Figura 3B. Es posible observar la diferencia en el patrón de los vectores con respecto a la configuración 1 (Figura 3A). Las zonas de baja velocidad que originalmente se observan en una ventana convencional (Figura 3A), con esta modificación se minimizan. Más aún, esta configuración también promueve el flujo de aire en la zona inmediata debajo de la ventana, como se puede observar en la Figura 3B para la configuración 2.

Configuration 2: front window projected 1 m inwards of the greenhouse (Figure 2B) placed in the upper part of the greenhouse and facing the fan.

Configuration 3: front window projected 1 m inwards of the greenhouse, placed at ground level, as the fan.

The model was validated under Mediterranean climate conditions, the mechanical ventilation system operating, with closed zenith vents, having correlations higher than 90% (Flores-Velázquez *et al.*, 2011). For these study environmental characteristics of central Mexico, particularly from San Luis Potosí, taken from the weather station located at the Conservatory Faculty of Agronomy and Veterinary Medicine, of the Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), in San Luis Potosí, Mexico were used. The station was placed in an adjacent area to the greenhouse, at 8 m high which monitored variables of temperature and relative humidity (Vaisala HMP60, Woburn, MA, USA; $\pm 0.6^{\circ}\text{C}$, $\pm 3\%$), solar radiation (LI-200SA, LiCor, Inc., Lincoln, NE, USA), and wind speed and direction (03101 Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah, USA; 0 to 50 m s⁻¹, ± 0.5 m s⁻¹; 0 to 360° $\pm 5^{\circ}$).

Geographically, the greenhouse is located at 22° 14' 04" north latitude and 100° 52' 18" west longitude, at 1 836 masl, average annual temperature of 22 °C and 565.4 mm of annual rainfall. The direction of prevailing winds is N-S, parallel to the zenith window, with average speeds of 2 m s⁻¹ during the day and gusts of 4 m s⁻¹. These were the values of the simulated variables. The boundary conditions are specified in Table 1. Air density was assumed as 1.221 kg cm⁻³.

Results and discussion

The results of each simulation scenario are shown in Figures 3-6 and vertical maps of wind speeds and temperature at the center of the greenhouse, as well as scalar quantities of wind speed and air temperature are displayed in the center and along the greenhouse.

Wind speed profiles

Figure 3A shows the mechanical ventilation system operating according to configuration 1, represented by Figure 2A. This location of the window of air intake and fan corresponds to the traditional way used in greenhouses in Mexico. Directions and magnitudes of the wind speed are observed under this scheme.

Finalmente, la configuración 3 consta del invernadero equipado con una ventana en la pared frontal, con proyección de 1 m hacia el interior, y un extractor en la pared opuesta, ambos ubicados a nivel del suelo en la pared del invernadero (Figura 2C). Mediante esta forma de operar el sistema de ventilación mecánica, se observa un movimiento uniforme del viento en la zona de cultivo (Figura 3C). De hecho, velocidades del viento más bajas se ubican en la parte alta del invernadero, lo cual puede ser benéfico para el cultivo. Con la configuración 3, se eliminan las zonas de baja velocidad que se observan en las configuraciones 1 y 2, y el aire tiene una distribución más homogénea.

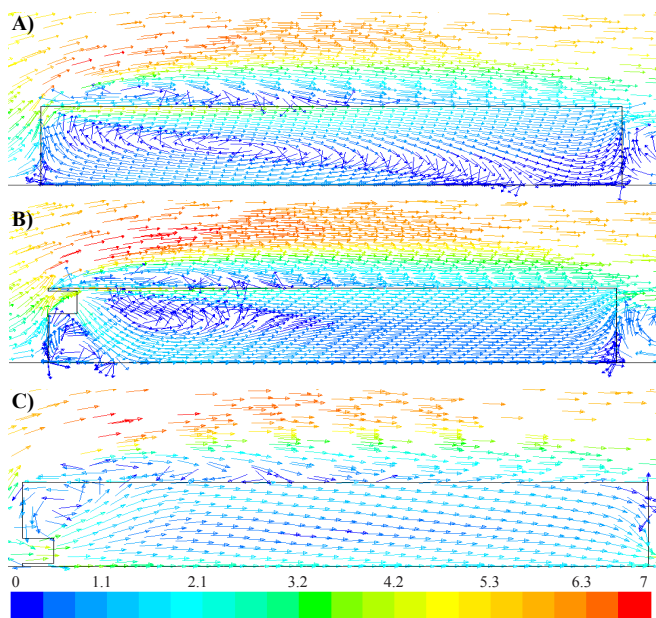


Figura 3. Vectores de velocidad del viento (m s^{-1}) simulados y coloreados por magnitud. A) configuración 1; B) configuración 2; C) configuración 3.

Figure 3. Vectors of wind speed (m s^{-1}) simulated and colored by magnitude. A) configuration 1; B) configuration 2; and C) configuration 3.

En la Figura 4 se observa la velocidad del viento de las tres configuraciones al interior del invernadero, al nivel del cultivo (2 m) existe una reducción máxima de hasta 0.2 m s^{-1} en la velocidad del viento en la parte central de la estructura, lo cual representa un riesgo para el cultivo desde el punto de vista agronómico, debido a valores críticos de temperatura, humedad y dióxido de carbono que pudieran alcanzarse en ciertos periodos del día. La rapidez del viento sufre una reducción superior a 80% al cruzar la matriz porosa (malla) y continua cayendo a medida que sigue avanzando en la misma dirección en la parte baja del invernadero. Después de la mitad del invernadero, flujos de la parte alta con una

In the entrance window a pressure difference between the outside and the inside is generated due to the reduction of flow area, causing that the air intake enter faster. The highest wind speeds inside are kept at the top of the greenhouse. However, in the growing area, these are reduced to 80% regarding the top of the greenhouse (Figure 4), showing a critical area in the immediately-lower part next to the entrance window.

The air that does not enter through the window, when colliding, speed increases, rising above the greenhouse and subsequently loses this energy, reducing its speed to the degree of reversing its direction.

According to Bernoulli's equation, pressure drop is a direct function of the square of the speed in a passage area; therefore, if the passage area is increased, it is possible to mitigate such reduction. For configuration 2 (Figure 3B) and configuration 3 (Figure 3C) was simulated a projected window (Figure 1C) rather than a flat window. With this modification to the design of the ventilation system, the input surface of the window is increased from 2 to 10 m^2 .

The results of wind speed of configuration 2 are shown in Figure 3B. It is possible to observe the difference in the pattern of the vectors in regard to configuration 1 (Figure 3A). The low velocity zones originally observed in a conventional window (Figure 3A), are minimized with this modification. Furthermore, this configuration also promotes the flow of air in the immediate area under the window, as shown in Figure 3B for configuration 2.

Finally, configuration 3 consists of the greenhouse equipped with a window in the front wall, with a projection of 1 m inward and extractor fan on the opposite wall, both located at ground level in the wall of the greenhouse (Figure 2C). Through this operating mode the mechanical ventilation system, note a uniform wind movement in the crop area (Figure 3C). In fact, lower wind speeds are located in the upper part of the greenhouse, which may be beneficial to the crop. With configuration 3, the low velocity zones seen in the configurations 1 and 2 are eliminated, and the air has a more homogeneous distribution.

Figure 4, shows the wind speed of the three configurations inside the greenhouse, at crop level (2 m) there is a maximum reduction of up to 0.2 m s^{-1} in wind speed in the central part of the structure, which represents a risk for the crop from the agronomic point of view, due to critical values of temperature, humidity and carbon dioxide that could

mayor energía se combinan y la rapidez se incrementa. Hacia el final del invernadero, a este efecto se suma la succión del ventilador que depende de la potencia del mismo.

La configuración 2, provee un flujo más uniforme y mayores velocidades que la configuración 1, logrando rangos de velocidad que oscilan entre los 0.4-0.6 m s⁻¹ durante la segunda y tercera partes del invernadero (Figura 4). Bajo estas condiciones, se infiere una mayor tasa de ventilación y más alta eficiencia en el proceso de renovación de aire y reducción de la temperatura del mismo dentro del invernadero.

Bajo las condiciones de la configuración 3 (Figura 4), se observan velocidades del viento mayores a 1 m s⁻¹ en la zona de cultivo (Figura 9) que es el límite recomendado para los cultivos según la Asociación Americana de Ingenieros Agrícolas (ASAE, 1991). Lo anterior pudiera originar problemas de secado de la planta (ASAE, 1991). No obstante, estas configuraciones permiten proponer hipótesis para corregir estos inconvenientes. En este caso concreto por ejemplo, el uso de un deflector en la zona inmediata a la ventana de entrada podría solucionar este problema.

Distribución de temperaturas

Como consecuencia de las velocidades del viento producidas dentro del invernadero por el sistema de ventilación mecánica, se produce una distribución espacial de temperaturas en el interior de la estructura. Así, cada una de las tres configuraciones analizadas en este estudio genera una distribución espacial de temperaturas en particular, las cuales son mostradas en la Figura 5. Las velocidades del viento producidas en la configuración 1 (Figura 5A), la configuración 2 (Figura 5B) y la configuración 3 (Figura 5C) generan los perfiles escalares de temperatura mostradas en la Figura 6.

La Figura 5A muestra una distribución espacial de las temperaturas del aire en el interior del invernadero cuando se simula la configuración 1. Debido a que en la zona inferior a la ventana se producen bajas velocidades del viento (Figura 3A), se observan como consecuencia temperaturas más elevadas y una mayor estratificación térmica (Figura 5A).

Una maduración de calidad depende en gran medida de la uniformidad térmica dentro del invernadero. En un invernadero con este diseño del sistema mecánico de

be reached at certain times of day. Wind speed suffers a reduction greater than 80% when crossing the porous matrix (mesh) and continues to fall as it continues moving in the same direction at the bottom of the greenhouse. After half of the greenhouse, the flows from the upper part with higher energy are combined and speed increases. Towards the end of the greenhouse, to this effect adds the suction of the extractor fan which depends from the power thereof.

Configuration 2 provides a more uniform flow and higher speeds than configuration 1, achieving ranges of speed oscillating from 0.4-0.6 m s⁻¹ during the second two-thirds of the greenhouse (Figure 4). Under these conditions, a higher rate of ventilation and higher efficiency in the process of air renewal and reduction of temperature inside the greenhouse is inferred.

Under configuration 3 (Figure 4), is observed a higher wind speed at 1 m s⁻¹ in the crop zone (Figure 9) which is the recommended limit for crops according to the American Society of Agricultural Engineers (ASAE, 1991). This could cause drying problems of the plant (ASAE, 1991). However, these configurations allow proposing hypotheses to correct these inconvenient. In this case for example, the use of a baffle in the immediate area of the entrance window could solve this problem.

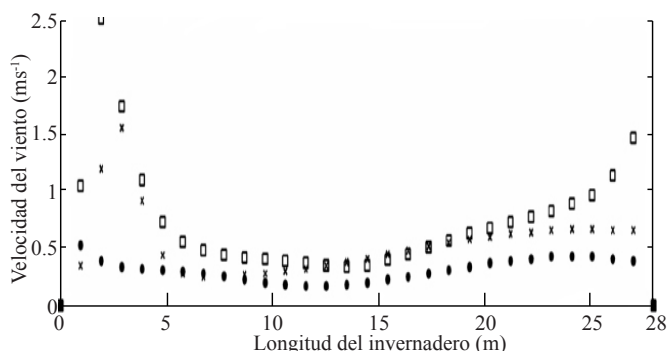


Figura 4. Perfil escalar de velocidad del viento medido longitudinalmente a 2 m de altura y en la sección central del invernadero. Configuración 1 (•); configuración 2 (×); configuración 3 (□).

Figure 4. Scalar wind speed profile measured longitudinally at 2 m height in the central section of the greenhouse. Configuration 1 (•); configuration 2 (×); configuration 3 (□).

Temperature distribution

As a result of wind speeds within the greenhouse produced by mechanical ventilation system, a spatial distribution of temperature in the interior of the structure is produced.

ventilación, la estratificación de temperaturas en la zona cercana a la ventana de entrada de aire (Figura 5A) podría poner en riesgo la calidad de producción.

Cuando la configuración 2 es simulada, gran parte de la estratificación en la zona inmediata de la ventana de entrada es eliminada, creando una zona más estable (Figura 5B). Los valores escalares muestran que en la zona de entrada, el aire entra a temperatura ambiente y este se mantiene hasta la mitad del invernadero (Figura 6). Luego el aire más caliente que viene del suelo es transportado (convección) y llevado hacia la salida, donde el gradiente térmico no supera los 3 K en la zona del cultivo.

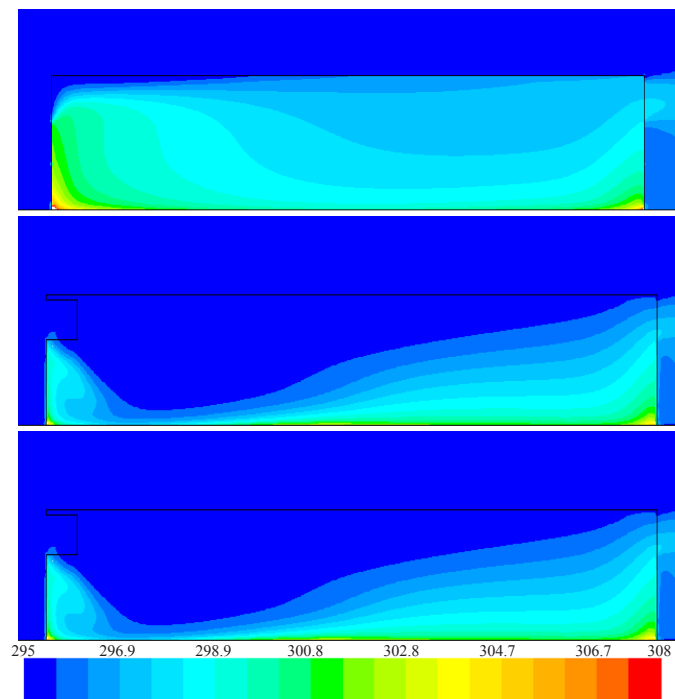


Figura 5. Mapa de temperaturas del aire (K) en la sección longitudinal central del invernadero. A) configuración 1; B) configuración 2; y C) configuración 3.

Figure 5. Map of air temperature (K) in the central longitudinal section of the greenhouse. A) configuration 1; B) configuration 2 ; and C) configuration 3.

Finalmente, el escenario 3 es el que presenta los mejores resultados desde el punto de vista del acondicionamiento térmico. En la zona central del invernadero, el cultivo se encuentra prácticamente a temperatura ambiente (Figura 5C y Figura 6), lo que mantiene a esta configuración como la mejor opción para el control del clima en un invernadero de estas dimensiones. Los valores de temperatura a lo largo del invernadero se mantienen sin cambios

Thus, each of the three configurations discussed in this study generates a spatial distribution of temperature in particular, which are shown in Figure 5. Wind speeds produced in configuration 1 (Figure 5A), Configuration 2 (Figure 5B) and Configuration 3 (Figure 5C) generate the scalar temperature profiles shown in Figure 6.

Figure 5A shows a spatial distribution of air temperatures in the inside of the greenhouse when configuration 1 is simulated. Because in the lower are of the window, low wind speeds (Figure 3A) are produced, as consequence higher temperatures and a higher thermal stratification (Figure 5A) are observed.

A ripening of quality depends largely on thermal uniformity within the greenhouse. In a greenhouse with this design of mechanical ventilation system, temperature stratification in the zone near the air intake window (Figure 5A) could jeopardize the quality of production.

When configuration 2 is simulated, a large part of the stratification in the immediate area of the entrance window is removed, creating a more stable area (Figure 5B). The scalar values show that in the entrance area, the air enters at room temperature and maintains like this up to half of the greenhouse (Figure 6). Then the hot air from the soil is transported (convection) and led to the exit, where the thermal gradient does not exceed 3 K in the crop area.

Finally, configuration 3 is the one with the best results from the standpoint of thermal conditioning. In the central area of the greenhouse, the crop is almost at room temperature (Figure 5C and Figure 6), which maintain this configuration as the best option for climate control in a greenhouse of this size. Temperature values along the greenhouse are maintained without significant change with respect to external temperature, noting a maximum gradient of 0.5 K near the end of the greenhouse (Figure 6). However, do not forget the problems inherent to high wind speeds in the area of entrance and exit, forcing to propose alternatives.

It is necessary to clarify that, considering the effect of a mechanical ventilation system, the incoming air is at exterior ambient temperature; i.e. using this system the minimum temperature that can be achieved within the greenhouse is environmental. However, by implementing any of the configurations discussed in this study, especially configuration 3 (Figure 5C), has the potential to reduce vertical stratification and increase thermal stability in the longitudinal profile of the greenhouse.

significativos respecto de la temperatura exterior, observándose un gradiente máximo de 0.5 K casi al final del invernadero (Figura 6). Sin embargo, no hay que olvidar los problemas inherentes a las altas velocidades del viento en la zona de entrada y salida, lo que obliga a plantear alternativas.

Es necesario aclarar que, considerando el efecto de un sistema de ventilación mecánica, el aire entrante está a la temperatura del ambiente exterior; es decir, mediante este sistema la temperatura mínima que se puede alcanzar dentro del invernadero es la ambiental. Sin embargo, que mediante la implementación de alguna de las configuraciones analizadas en este estudio, especialmente la configuración 3 (Figura 5C), se tiene el potencial de reducir la estratificación vertical y aumentar la estabilidad térmica en el perfil longitudinal del invernadero.

La Figura 7 muestra una comparación de la velocidad del viento del interior del invernadero normalizada con respecto a la velocidad exterior del mismo (V_{int}/V_{ext}^{-1}) y el gradiente de temperatura para las configuraciones 1 y 2.

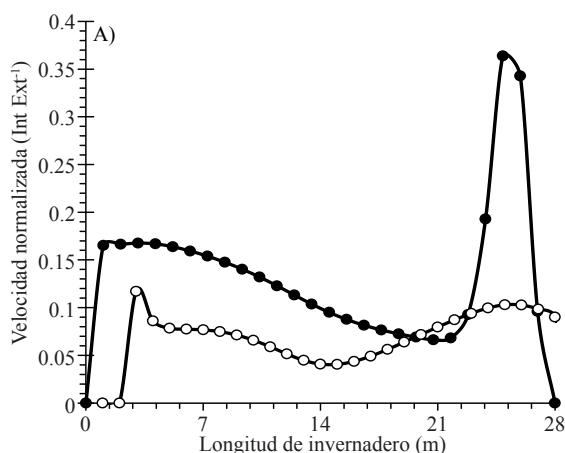


Figura 7. (A) Perfil longitudinal de velocidad del viento normalizada (interior/exterior) y (B) gradiente térmico (K) para las configuraciones 1 (o) y 2 (•) del sistema de ventilación mecánica del invernadero.

Figure 7. (A) Longitudinal wind speed profile normalized (interior / exterior) and (B) thermal gradient (K) for configurations 1 (o) and 2 (•) from the mechanical ventilation system of the greenhouse.

Se puede observar que una proyección de la ventana de entrada de aire (aumento del área de paso), es conveniente para reducir la caída de presión y producir velocidades del viento más uniformes y gradientes de temperatura menores. Lo anterior se traduce en mejores condiciones ambientales para el cultivo. Los resultados encontrados en este estudio, indican que las distribuciones espaciales de las velocidades del viento y la temperatura del aire mejoraron bajo las configuraciones 2 y 3.

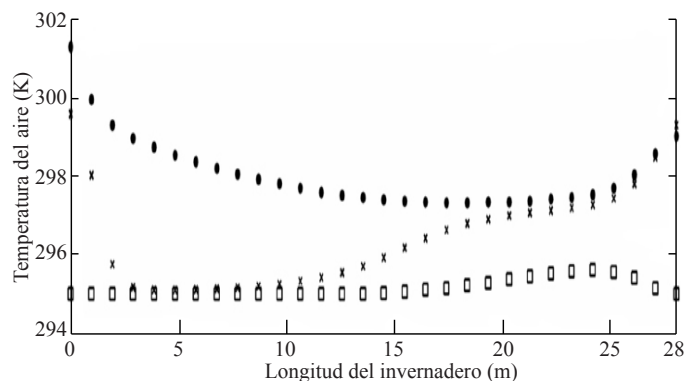
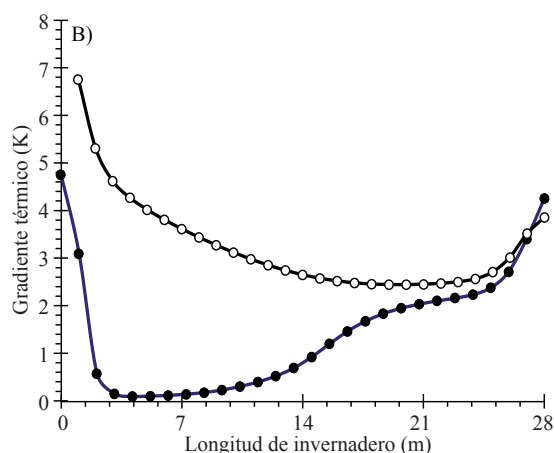


Figura 6. Perfil escalar de temperaturas del aire (K) medido a 2 m de altura y en el centro del invernadero. Configuración 1 (•); configuración 2 (×); configuración 3 (□).

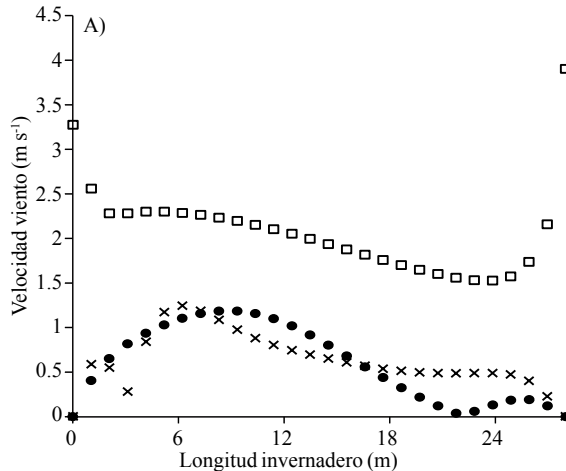
Figure 6. Scalar air temperature profile (K) measured at 2 m height in the center of the greenhouse. Configuration 1 (•); configuration 2 (×); and configuration 3 (□).

Figure 7 shows a comparison of wind speed inside the greenhouse normalized with respect to the exterior speed thereof (V_{int}/V_{ext}^{-1}) and temperature gradient for configurations 1 and 2.



It can be seen that a projection of the air intake window (increase of the flow area), is convenient to reduce pressure drop and produce more uniform wind speeds and lower temperature gradients. This results in better environmental conditions for the crop. The findings in this study indicate that spatial distributions of wind speeds and air temperatures improved under configurations 2 and 3.

Considerando las condiciones críticas del cultivo, que es en la etapa de trasplante, cuando la planta tiene aproximadamente 0.3 m de altura, los valores escalares de velocidad del viento y su respectivo de temperatura se muestra en la Figura 8.



Considering the critical conditions of the crop, which are during transplantation, when the plant is approximately of 0.3 m high; scalar values of wind speed and the respective temperature are shown in Figure 8.

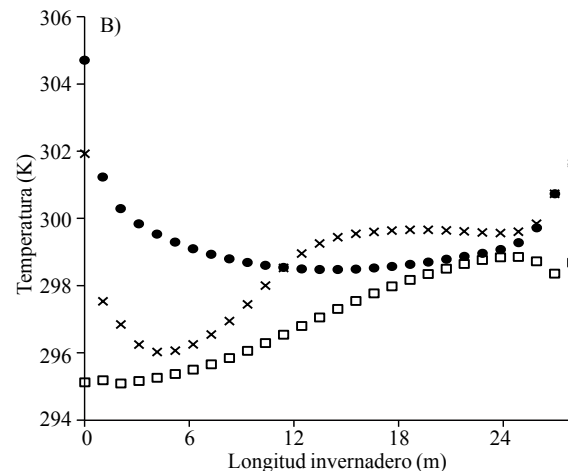


Figura 8. Perfil escalar de (A) velocidad del viento (ms⁻¹) y (B) temperaturas del aire (K) simulado a 0.3 m de altura. Configuración 1 (•); configuración 2 (×); configuración 3 (□).

Figure 8. Scalar profile (A) wind speed (ms⁻¹) and (B) air temperatures (K) simulated at 0.3 m height. Configuration 1 (•); configuration 2 (×); and configuration 3 (□).

El gradiente de temperatura en el escenario 3, que representa una ventana proyectada hacia el interior y colocada a nivel de suelo, presenta un gradiente térmico menor a 2 K, sin embargo las velocidades son altas desde el punto de vista de la transpiración. Si bien es cierto se pretende la entrada de aire suficiente para generar una tasa de renovación superior a las 40 renovaciones horarias, no debe olvidarse el efecto inverso a las bajas velocidades que para cultivos se recomienda no superen 1 ms⁻¹. Para lograr velocidades de 1 ms⁻¹ bajo la configuración 3, se sugiere utilizar un deflector a la entrada del aire.

En la Cuadro 2 se muestra la media, varianza, desviación estándar, gradiente, valor máximo y valor mínimo de la velocidad del viento y la temperatura del aire bajo las tres configuraciones analizadas en este estudio. Se puede observar que, de acuerdo a los rangos de velocidad del viento y temperatura del aire recomendados para los cultivos y en específico el tomate (Hannan, 1997), la configuración 3 genera las mejores condiciones tanto de velocidades del viento como de temperatura. Por un lado, esta configuración produce las velocidades del viento más uniformes, con un valor mínimo de 0.17 y un máximo de 4.07 m s⁻¹, lo que contribuye a producir una distribución homogénea del ambiente interior del invernadero y en consecuencia, obtener los menores gradientes de temperaturas de las tres configuraciones. La configuración 3 no solo produce la temperatura promedio más

The temperature gradient in configuration 3, which represents a projected window inwards and placed at ground level, shows lower thermal gradient to 2 K, but the speeds are high from the point of view of transpiration. It is intended enough air intake to generate a renewal ratio higher than 40 hourly renovations; do not forget the inverse effect at low speeds, for crops is recommended not to exceed 1 m s⁻¹. To achieve speeds of 1 m s⁻¹ in configuration 3, it is suggested to use a baffle in the air intake.

Table 2 shows the mean, variance, standard deviation, gradient, maximum value and minimum value of wind speed and air temperature under the three configurations analyzed in this study. It can be seen that according to wind speed ranges and air temperature recommended for crops and specifically tomato (Hannan, 1997), configuration 3 generates the most favorable conditions both for wind speed and temperature. For one, this configuration produces more uniform wind speeds, with a minimum value of 0.17 and a maximum of 4.07 m s⁻¹, which contributes to produce a homogeneous distribution of the internal environment of the greenhouse and consequently obtaining lower temperature gradients of the three configurations. Configuration 3 not only produces the lowest average temperature and lower temperature

baja y los menores gradientes de temperatura, si no que el invernadero experimenta una máxima de temperatura 3.12 °C menor que en la configuración 2, y 5.57 °C menor que en la configuración 1 (Cuadro 2).

Ahora, para determinar si las diferencias en temperatura producidas bajo los escenarios simulados en este estudio son significativamente diferentes, se llevó a cabo un análisis de varianza. Los tratamientos consistieron en las tres configuraciones del sistema de ventilación y se realizaron tres simulaciones bajo tres temperaturas exteriores (294, 295 y 296 K) para cada configuración con el fin de generar las repeticiones necesarias el Cuadro 3 muestra los resultados.

gradients, but the greenhouse experiences a maximum temperature of 3.12 °C lower than in configuration 2, and 5.57 °C lower than in configuration 1 (Table 2).

Now, to determine if differences in temperature produced under simulated scenarios in this study are significantly different, it was performed an analysis of variance. The treatments consisted of the three configurations of the ventilation system and three simulations under three ambient temperatures (294, 295 and 296 K) for each configuration in order to generate the necessary repetitions were performed. Table 3 shows the results.

Cuadro 2. Media, varianza, desviación estándar, gradiente, valor máximo y valor mínimo de la velocidad del viento y la temperatura del aire bajo tres configuraciones de ventilas y extractores en el invernadero.

Table 2. Mean, variance, standard deviation, gradient, maximum value and minimum value of wind speed and air temperature under three configurations of vents and extractor fan in the greenhouse.

Variable	Configuración 1		Configuración 2		Configuración 3	
	Vel. (m s ⁻¹)	Temp. (K)	Vel. (m s ⁻¹)	Temp. (K)	Vel. (m s ⁻¹)	Temp. (K)
Media	0.81	297.97	0.81	296.4	1.16	295.32
Varianza	0.48	1.17	0.39	2.14	0.43	0.45
Desviación estándar	0.69	1.08	0.62	1.46	0.66	0.67
Gradiente	4.22	8.67	5.1	6.16	3.9	3.05
Máximo	4.28	303.62	5.17	301.17	4.07	298.05
Mínimo	0.06	294.95	0.07	295	0.17	295

Cuadro 3. Análisis de varianza de la temperatura media interior producida bajo tres configuraciones de ventilas y extractores en el invernadero.

Table 3. Analysis of variance of the mean indoor temperature produced under three configurations of vents and extractor fan in the greenhouse.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Prob > F
Tratamientos	2	12.6487	6.32434	6.52	0.0313
Error	6	5.8219	0.97031		
Total	8	18.47			

La Figura 9 muestra la comparación de medias. La temperatura promedio producida en el invernadero por la configuración 1 es significativamente mayor que la producida bajo la configuración 3, sugiriendo que instalar la ventana de entrada del viento a una altura baja y con una proyección hacia el interior del invernadero mantiene el invernadero más fresco.

Figure 9 shows the comparison of means. The average temperature produced in the greenhouse by configuration 1 is significantly greater than that produced under configuration 3, suggesting that install an air intake window at a low height and with a projection inward the greenhouse, keeps the greenhouse cooler.

Conclusiones

Se analizó el efecto de tres configuraciones del sistema de ventilación mecánica de un invernadero de tres naves y su impacto en la distribución espacial de las velocidades del viento y la temperatura del aire interior. El sistema consistió de una ventana de entrada de aire en las paredes frontales del invernadero y extractores colocados en las paredes opuestas.

Un incremento en la superficie de entrada de aire en la ventana disminuye la caída de presión. Esto promueve una mayor entrada de aire, reduciendo las temperaturas del interior y mejorando su distribución en el invernadero. Desde el punto de vista del diseño, debe haber correspondencia entre la potencia del motor (caudal de salida) con el área de entrada de aire (caudal de entrada).

El sistema de ventilación mecánico con ventana de entrada de aire plana, presenta bajas velocidades del viento y el más alto gradiente térmico en la zona inferior inmediatamente después de la entrada, situación que puede ser en general mejorada con la colocación de la ventana de entrada de aire a una baja altura y con una proyección de 1 m hacia adentro del invernadero para aumentar el área de entrada de aire. Esta condición debe ser evaluada al definir la altura del invernadero.

La simulación del desempeño del sistema de ventilación aporta información *a priori* sobre el comportamiento climático del interior del invernadero. Velocidades del viento exterior medias (4 m s^{-1}), con un sistema de ventilación como el representado en la configuración 3, produce patrones de viento uniformemente distribuidas dentro del invernadero, tasas de renovación de aire apropiadas que consecuentemente producen bajos gradientes de temperaturas dentro del invernadero.

Literatura citada

- Anderson, J. D. 1997. Computational fluid dynamics. The basics with applications. Mc. Graw-Hill. USA.
- ASAE. 1991. Engineering practice (EP406-1) standards. Am. Soc. Agric. Eng. St. Joseph, Michigan, EE.UU.
- Abreu, P. E.; Meneses, J. F. and Monteiro, A. A. 1994. Response of non heated plastic covered greenhouse tomatoes during the cold season under two different ventilation methods. Acta Hort. 366:195-200.

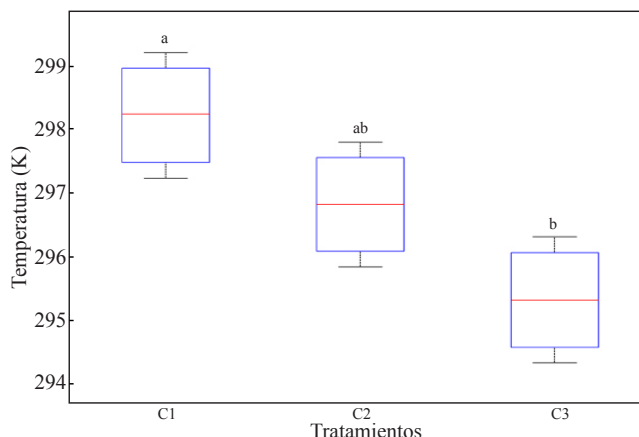


Figura 9. Comparación de medias de la temperatura interior promedio producida en el invernadero bajo tres configuraciones del sistema mecánico de ventilación. C1, C2, y C3 se refieren a la configuración 1, configuración 2 y configuración 3, respectivamente.

Figure 9. Comparison of means for the average indoor temperature produced in the greenhouse with three configurations of the mechanical ventilation system. C1, C2, and C3 refer to configuration 1, configuration 2 and configuration 3, respectively.

Conclusions

The effect of three configurations of mechanical ventilation system of a greenhouse with three spans and its impact on the spatial distribution of wind speeds and indoor air temperature was analyzed. The system consisted of an air intake window in the front walls of the greenhouse and extractor fan positioned on opposite walls.

An increase in air intake surface on the window decreases pressure drop. This promotes greater air intake, reducing interior temperatures and improving its distribution in the greenhouse. From the standpoint of design, there must be correspondence between the engine power (outflow) with air intake area (inflow).

The mechanical ventilation system with flat air intake window has low wind speeds and the highest thermal gradient in the lower region immediately after the entrance, a situation which may be generally improved by placing the air intake window at a low height and with a projection of 1 m inward from the greenhouse to increase the air intake area. This condition should be evaluated to determine the height of the greenhouse.

- Arbel, A.; Barak, M. and Shklyar, A. 2003. Combination of forced ventilation and fogging systems for cooling greenhouses. *Biosyst. Eng.* 84(1):45-55.
- Baeza, E. J.; Pérez-Parra, J. and Montero, J. I. 2004. Effect of ventilator size on natural ventilation in parral greenhouse by means of CFD simulations. *Acta Hort.* 691:465-472.
- Boulard, T. and Baille, A. 1995. Modelling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents. *J. of Agric. Eng. Res.* 65:145-157.
- Castilla, N. 1994. Greenhouses in the Mediterranean area: technological level and strategic management. *Acta Hort.* 361:44-56.
- Conellan, G. J. 2002. Selection of greenhouse design and technology options for high temperature regions. *Acta Hort.* 578:113-117.
- Flores-Velázquez, J.; Mejía, S. E.; Montero, J. I. y Rojano, A. A. 2011. Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. *Agrociencia.* 45:545-560.
- Hanan, J. J. 1997. Greenhouses: advanced technology for protected horticulture. 1th (Ed.). CRC Press LLC. USA. 691 p.
- Kittas, C.; Boulard, T. and Papadakis, G. 1997. Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: sensitivity to temperature and wind effects. *Trans. Asabe.* 40(2):415-425.
- Kittas, C.; Bartzanas, T. and Jaffrin, A. 2001. Greenhouse evaporative cooling: measurements and data analysis. *Trans. ASAE.* 44(3):683-689.
- Montero, J. I.; Antón, A. J. H. and Castilla, N. 2000. Direct and diffuse light transmission of insect-proof screens and plastic films for cladding greenhouses. *Acta Hort.* 559:203-210.
- Lorenzo, P.; Maroto, C. and Castilla, N. 1990. CO₂ in plastic greenhouse in Almería (Spain). *Acta Hort.* 268:165-170.

The simulation performance of the ventilation system provides *a priori* information about climate behavior inside the greenhouse. Exterior wind speed means (4 m s^{-1}), with a ventilation system as shown in configuration 3 produces wind patterns uniformly distributed inside the greenhouse, appropriate air renewal rates which consequently produce low temperature gradients within the greenhouse.

End of the English version



- Lorenzo, P.; Medrano, E. and Sánchez-Guerrero, M. C. 1998. Greenhouse crop transpiration: an implement to soilless irrigation management. *Acta Hort.* 458:113-122.
- Mantallana A. y Montero, J. I. 2001. Invernaderos: diseño y climatización. Ed. Mundi-Prensa España. 207 p.
- Montero, J. I.; Muñoz, P. and Antón, A. 1996. Discharge coefficients of greenhouse windows with insect-proof screens. *Acta Hort.* 443:71-77.
- Muñoz, P. 1998. Ventilación Natural de Invernaderos Multitúnel. Tesis Doctoral. Escola Técnica Superior de Enginyeria Agrària. Universitat de Lleida.
- Papadakis, G.; Mermier, M.; Meneses, J. F. and Boulard, T. 1996. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *J. Agric. Eng. Res.* 63:219-228.