

Determinación del comportamiento térmico de un invernadero colgante colombiano aplicando simulación CFD



Determination of the Thermal Behavior of a Colombian Hanging Greenhouse Applying CFD Simulation

<http://opn.to/a/V8J7U>

MSc. Edwin Andrés Villagrán-Munar ¹*, Ph.D. Carlos Ricardo Bojacá-Aldana ¹

¹Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Bogotá, Colombia.

RESUMEN: En Colombia la producción de flores se lleva a cabo en invernaderos de diferentes tipologías con una característica en común y es el control de clima de tipo pasivo. En la actualidad el conocimiento sobre el desempeño climático de estas estructuras es escaso. El objetivo del trabajo consistió en evaluar el comportamiento térmico de un invernadero capilla tipo colgante en condiciones de clima diurno y nocturno bajo las condiciones meteorológicas predominantes en la sabana de Bogotá. La evaluación se realizó mediante simulaciones numéricas empleando la dinámica de fluidos computacional (CFD) aplicada a un invernadero dedicado a la producción de rosa (*Rosa sp.*). Este enfoque metodológico permitió obtener los patrones de distribución térmica en el interior del invernadero, encontrando que para las condiciones meteorológicas evaluadas el invernadero genera unas condiciones térmicas inadecuadas para el desarrollo del cultivo durante el periodo nocturno donde el valor de la temperatura obtenido estuvo por debajo del mínimo recomendado de 15°C. La validación del modelo CFD se realizó comparando los resultados de las simulaciones y las temperaturas registradas en el prototipo real del invernadero, obteniendo un grado de ajuste adecuado entre los valores simulados y medidos y con una tendencia similar durante las 24 horas del día.

Palabras clave: dinámica de fluidos computacional, temperatura, simulación, periodo diurno, periodo nocturno.

ABSTRACT: In Colombia the production of flowers is carried out in different types of greenhouses with a common feature and it is the passive type of climate control. At present, the knowledge on the climatic performance of these structures is scarce. The objective of this work was to evaluate the thermal behavior of a suspension-type chapel greenhouse under diurnal and nocturnal climate conditions under the prevailing meteorological conditions of Bogotá savannah. The evaluation was made by numerical simulations using computational fluid dynamics (CFD) applied to a greenhouse dedicated to the production of rose (*Rosa sp.*). This methodological approach allowed obtaining the thermal distribution patterns inside the greenhouse. It was found that for the meteorological conditions evaluated, the greenhouse generates inadequate thermal conditions for the crop development during the night period, where the value of the temperature obtained was below the recommended minimum of 15°C. The validation of the CFD model was carried out by comparing the results of the simulations and the temperatures recorded in the real prototype of the greenhouse, obtaining an adequate degree of adjustment between the simulated and measured values and with a similar trend during the daily 24 hours.

Keywords: computational fluid dynamics, temperature, simulation, diurnal period, nocturnal period.

*Autor para correspondencia: Edwin Andrés Villagrán Munar, e-mail: edwina.villagranm@utadeo.edu.co

Recibido: 12/05/2018

Aceptado: 29/04/2019

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, Colombia es el segundo país exportador de flores a nivel mundial y el primero en el continente americano. De acuerdo con reportes dados por la Cadena de Flores y Follajes del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural ([MADR para el año 2017](#)) se registraron 8.004 ha dedicadas a la producción de ornamentales, área que se encuentran distribuida en los departamentos de Cundinamarca y Antioquia. La producción anual total de tallos estimada es de 242,944 t. Este sector productivo aporta unos ingresos económicos relevantes en el PIB agropecuario, generando un ingreso de divisas cercanas a los 1,312,000,000 de dólares, donde la rosa aporta US\$ 6,9 por kg exportado y ocupa un volumen del 30% del total de tallos exportados.

La producción nacional de flores se realiza en un alto porcentaje bajo invernadero, la estructura predominante es el invernadero tradicional que ocupa un 70% del área total, el 30% restante se encuentra ocupado por otras tipologías de invernadero dentro de los cuales se encuentra el invernadero capilla tipo colgante.

La temperatura es uno de los factores más relevantes a la hora de programar las actividades de control de clima ([Campen & Bot, 2001](#)). Principalmente porque cuando esta alcanza valores extremos en invernaderos pasivos (ventilados naturalmente) se limita la producción de forma parcial o total ([Kittas et al., 2005](#)). El control de la temperatura en los invernaderos pasivos colombianos es relevante en días calurosos de alta radiación en los que se hace necesario evacuar los excesos térmicos producidos al interior. Bajo estas condiciones es posible alcanzar temperaturas cercanas a 35 °C según [Bojacá et al. \(2009\)](#), que ocasionan desórdenes fisiológicos en las plantas ([Sato et al., 2001](#)). Adicionalmente, estos periodos de alta radiación suelen generar condiciones nocturnas secas y despejadas que favorecen la aparición del fenómeno de inversión térmica, fenómeno en el cual la temperatura interior del invernadero es inferior a la del aire exterior circundante.

El estudio del comportamiento térmico y aerodinámico de un invernadero puede realizarse a través de modelos empíricos de balance de energía, experimentación en campo, termografía

digital o mediante simulación numérica aplicando técnicas como la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) ([Chen, 2009](#)). Esta herramienta permite realizar el análisis cualitativo y cuantitativo del comportamiento térmico de estructuras agrícolas o pecuarias bajo diferentes escenarios de simulación ([Norton et al., 2007](#)).

El objetivo de este trabajo consistió en desarrollar y ajustar un modelo numérico CFD 3D, con el fin de estudiar el comportamiento térmico de un invernadero capilla tipo colgante colombiano bajo condiciones climáticas de la sabana de Bogotá usado para la producción de rosa (*Rosa sp.*).

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio y descripción del invernadero

El trabajo experimental se desarrolló en un invernadero de 8640 m² de área cubierta, perteneciente a una finca productora de Rosa (5°03'22.16"N, 73°55'49.07"W, 2583 msnm) ubicada en el municipio de Cogua (Cundinamarca). El invernadero evaluado estaba compuesto de 24 naves cada una con una luz de 6,0 m ([Figura 1A](#)), las alturas mínimas y máximas bajo canal fueron de 3,2 y 6,4 m respectivamente, la distancia longitudinal del invernadero fue de 60 m y estaba orientado en sentido noreste-suroeste (NE-SW). Cada nave disponía de una apertura de ventilación cenital móvil de 1,0 m de ancho y 48 m de longitud y unas aperturas laterales fijas de 1,9 m de ancho en cada uno de los cuatro costados de la estructura, para un área total de ventilación natural de 1927 m².

Se evaluaron las condiciones meteorológicas exteriores para las 24 horas del día, dentro del periodo comprendido entre las 00:00 horas del 29 de marzo y las 23:00 horas de 02 de mayo del año 2016. El registro de las variables se realizó por medio de una estación meteorológica (Vantage Pro2 Plus, Davis Instruments, Hayward CA), que integraba sensores de radiación global, temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento y dirección y la frecuencia de registro fue cada 10 minutos.

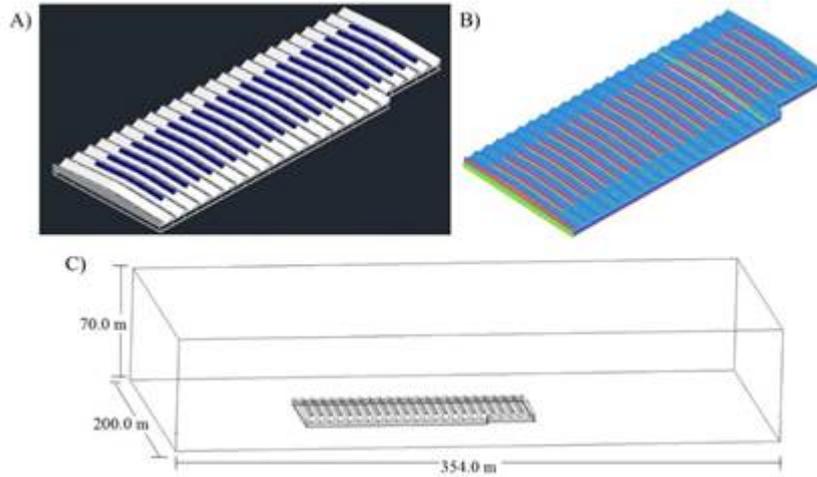


FIGURA 1. A) Vista isométrica del invernadero evaluado, B) detalle del mallado y C) dominio computacional.

Simulación numérica

La simulación numérica CFD permite resolver las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos utilizando el método de volumen finito (Molina *et al.*, 2009). Estas ecuaciones pueden ser representadas como ecuaciones de convección-difusión de un fluido para tres leyes de conservación, que incluyen las ecuaciones de momento, energía y transporte de un fluido compresible y en un campo tridimensional (3D) y se expresan así:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla(\rho \phi \vec{v}) = \nabla(\Gamma \nabla \phi) + S \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del fluido (kg m^{-3}), ∇ es el operador nabla, ϕ representa la variable de concentración, \vec{v} es el vector de velocidad (m s^{-1}), Γ es el coeficiente de difusión ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) y S representa el término fuente (Piscia *et al.*, 2012). La naturaleza turbulenta del flujo de aire se simuló utilizando el modelo de turbulencia estándar k - ϵ , el cual se basa en dos ecuaciones principales, una para k que representa la energía cinética y otra para ϵ que representa la tasa de disipación en tiempo y volumen unitarios. Las

ecuaciones de transporte para k y ϵ pueden ser modeladas como (2) y (3).

Este modelo estándar k - ϵ ha sido ampliamente usado y validado en estudios enfocados a invernaderos demostrando una precisión adecuada (Fatnassi *et al.*, 2006; Katsoulas *et al.*, 2006). Todas las simulaciones consideraron la ecuación de energía lo cual permitió analizar el campo escalar de temperaturas al interior del invernadero. Así mismo se modeló el fenómeno de flotabilidad, fenómeno que impulsa el movimiento del aire bajo condición de velocidad exterior se realizó por medio de la aproximación de Boussinesq, que se describe de la siguiente forma:

$$\rho = \rho_{ref} [1 - \beta(T - T_{ref})] \quad (4)$$

donde ρ_{ref} es la densidad constante del flujo; T_{ref} es la temperatura real ($^{\circ}\text{C}$) y β es el coeficiente de expansión térmica para el aire ($\beta = 0.00329 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). La aproximación de Boussinesq es válida si las diferencias de temperaturas que aparecen en el dominio computacional no son demasiado grandes $\beta(T - T_{ref}) < 1$, situación que generalmente ocurre en el estudio de microclima de invernaderos (Baeza *et al.*, 2006).

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_{1\epsilon} S_\epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b k \quad (3)$$

donde μ es viscosidad y μ_t es viscosidad turbulenta en ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$), σ_k y σ_ϵ son los números turbulentos de Prandtl para k y ϵ , G_k es la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidad, G_b es generación de energía cinética turbulenta debida a la flotabilidad, Y_M es la dilatación fluctuante en la turbulencia debida a la tasa de disipación global y ν es el coeficiente de viscosidad cinemática. $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, $C_{3\epsilon}$, σ_k y σ_ϵ son constantes con valores predeterminados.

El modelo de radiación seleccionado fue el de ordenadas discretas (DO) con discretización angular. Este modelo permite realizar el análisis de clima en condiciones de periodo nocturno, simulando y resolviendo el fenómeno de radiación desde el suelo del invernadero hacia el ambiente exterior. Para tal fin se consideró el cielo como un cuerpo negro con una temperatura equivalente (T_c) de 0 °C para un escenario predominante de noches húmedas y despejadas (Iglesias *et al.*, 2009).

Dominio computacional y generación de la malla

El software de preprocesamiento ANSYS ICEM CFD (v. 17.0) se utilizó para generar un gran dominio computacional compuesto por el invernadero y sus alrededores, esto con el fin de garantizar la no afectación de la solución numérica del campo de flujo fuera del invernadero y para permitir una definición apropiada de la capa límite atmosférica (Rico, 2011). Las dimensiones del dominio computacional fueron de 354, 260 y 70 m para los ejes x, y, z, respectivamente (Figura 1C). Este tamaño se determinó siguiendo las pautas para el cálculo de CFD del entorno eólico alrededor de los edificios (Tominaga *et al.*, 2008). El dominio computacional estuvo compuesto por una malla no estructurada de 76,651,871 volúmenes discretizados en el espacio, número de elementos que se obtuvo luego de verificar la independencia de las soluciones numéricas del flujo de aire a tamaños de malla con un número superior e inferior de elementos de acuerdo al procedimiento reportado por He *et al.* (2017). Un criterio fundamental para establecer la precisión de las soluciones consiste en evaluar la calidad de la malla (Figura 1B). Los parámetros de calidad evaluados fueron el tamaño de las celdas y la variación del tamaño de celda a celda encontrando que un 93,1% de las celdas de la malla estaban dentro del intervalo de calidad alta (0,95-1). También se evaluó la calidad ortogonal, donde el valor mínimo obtenido fue de 0,94, resultados que se clasifican dentro del rango de alta calidad (Flores *et al.*, 2015). Los criterios de convergencia del modelo fueron establecidos en 10^{-8} para la ecuación de energía y en 10^{-6} para las

ecuaciones de continuidad, momento y turbulencia (Baxevanou *et al.*, 2017).

Condiciones de frontera

El límite superior del dominio y las superficies paralelas al flujo fueron fijados con condiciones de frontera de propiedades simétricas para no generar pérdidas de fricción del flujo de aire en contacto con estas superficies. Las simulaciones consideraron las características atmosféricas del municipio de Cagua tales como presión atmosférica de 74992 Pa, viscosidad del aire igual a $1,7E-05 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ y gravedad de $9,81 \text{ m s}^{-2}$. Otras propiedades del polietileno y del suelo agrícola como calor específico (C_p), conductividad térmica (k) y densidad (ρ) fueron establecidas de acuerdo con Villagrán *et al.* (2012). Los límites perimetrales del dominio computacional se establecieron como límites de entrada de aire o salida de presión según el caso evaluar. Se consideró un perfil uniforme de velocidad del viento evaluando velocidades con valores entre 0,001 y $1,21 \text{ m s}^{-1}$ y valores de temperatura medios para cada hora del día. Dichos valores fueron establecidos a partir de la información climática recopilada en el periodo de medición experimental.

Otros parámetros de entrada que son necesarios para alimentar el modelo de radiación son las propiedades ópticas del material de cubierta tales como, coeficiente absorción (α) de 0,69, coeficiente de transmisión (T) de 0,19 y coeficiente de reflexión (ρ) de 0,11. El modelo no incluyó cultivo alguno y se asumió una hermeticidad máxima del invernadero. Estas simplificaciones son válidas puesto que son aplicadas a cada una de los casos simulados y los errores que puedan derivarse tendrán el mismo grado de magnitud para cada escenario.

Escenarios considerados

La evaluación se realizó asumiendo las condiciones meteorológicas medias para cada hora evaluada (Tabla 1) y la configuración de ventilación estándar del invernadero estudiado que, para este caso, fue ventilación lateral combinada con ventilación de techo para las horas diurnas (6-18 horas) y ventilación de techo para las condiciones nocturnas (19-5 horas).

TABLA 1. Condiciones meteorológicas medias usadas como parámetros de entrada al modelo CFD-3D

Hora	Temperatura (°C)	Velocidad viento (km h ⁻¹)	Dirección del viento (°)	Radiación solar (W m ⁻²)
0	11,84	0,001	117,62	0
1	11,74	0,007	125,85	0
2	11,57	0	124,57	0
3	11,44	0	119,96	0
4	11,32	0,021	123,08	0
5	11,39	0,031	115,79	0
6	11,29	0	109,78	0,2
7	11,45	0,017	118,4	26,2
8	12,78	0,038	106,09	126,6
9	14,14	0,35	169,85	221,8
10	15,79	0,42	212	280,1
11	16,91	0,84	194	353,9
12	17,69	0,85	123,5	376,9
13	18,21	1,21	192,3	415,4
14	18,38	1,17	192,6	356,6
15	18,49	1,18	157,4	306,8
16	18,23	1,19	112,8	238,9
17	16,83	0,89	156,5	90,3
18	15,8	0,49	155,8	30,2
19	14,35	0,25	132,3	0
20	13,5	0,05	115,9	0
21	12,98	0,01	117,3	0
22	12,59	0,02	121,9	0
23	12,25	0,01	120,3	0

Validación del modelo desarrollado

La validación del modelo CFD se realizó a través de la comparación entre los resultados de las simulaciones y el registro experimental para la misma frecuencia temporal de la temperatura dentro del invernadero real durante el periodo de evaluación. La temperatura del aire del invernadero se registró por medio de treinta termopares tipo T (cobre-constantan) conectados a un número igual de registradores de datos (Cox-Tracer Junior, Escort DLS, Edison, NJ) desplegados de manera uniforme a 1.5 m de la superficie del suelo y registrando datos cada 10 minutos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación del modelo

La validez del modelo se realizó mediante la comparación de los valores de temperatura medidos experimentalmente y los obtenidos a

través de las simulaciones CFD, para las 24 horas del día. La [Figura 2](#) muestra que el comportamiento de la temperatura para cada hora evaluada presenta un buen ajuste entre las dos metodologías usadas y a su vez una misma tendencia para el periodo de medición. Cuantitativamente al comparar los datos medidos y simulados se obtuvo un error porcentual absoluto medio (MAPE) de 4,26%, un error medio absoluto (MAE) de 0,75 °C y el error cuadrático medio (MSE) de 0,94 °C, valores que permiten garantizar que el uso del modelo CFD es adecuado para la evaluación y descripción del comportamiento térmico del invernadero.

Periodo diurno

En la [Table 2](#) se presenta la evolución temporal de la temperatura interior del invernadero para el periodo diurno. Se observa que la variable presento un valor mínimo de 12,17 °C para la hora 6 y alcanzó un valor máximo de 24,31 °C en

la hora 14, este aumento temporal está influenciado por la radiación solar. El diferencial térmico entre el interior y el exterior del invernadero ($\Delta T = T_{\text{media interior}} - T_{\text{media exterior}}$) exhibió un valor mínimo de 0,88 °C para la hora 6. Este valor es coherente puesto que el aire interior del invernadero viene de un proceso de pérdida energética durante las horas nocturnas y adicionalmente la radiación solar para la hora 6 es generalmente baja en las zonas intertropicales, por lo tanto, la ganancia energética en el interior del invernadero es baja también. El valor máximo de ΔT fue de 5,93 °C para la hora 14, valor que es generado en función de la ganancia térmica en el interior del invernadero en el transcurso de 7 horas (7-14 horas)

La temperatura es uno de los principales parámetros que incide en la calidad y crecimiento de los tallos florales. En el caso del cultivo de rosa es recomendable que las temperaturas óptimas en el periodo diurno se encuentren en valores que oscilen entre 21 y 24 °C según [Yong \(2004\)](#). Para el caso evaluado se observa que esto se cumple para el periodo comprendido entre las 11 y las 16 horas, para las horas restantes el valor de temperatura presenta niveles inferiores al recomendado; esto se traduce en ciclos vegetativos más largos y una menor producción de tallos [Zieslin y Mor \(1990\)](#). Adicionalmente, temperaturas entre 15 y 20°C y en condiciones de alta humedad favorecen la germinación de conidios de *Botrytis cinérea* [Restrepo \(2010\)](#), enfermedad que genera grandes pérdidas

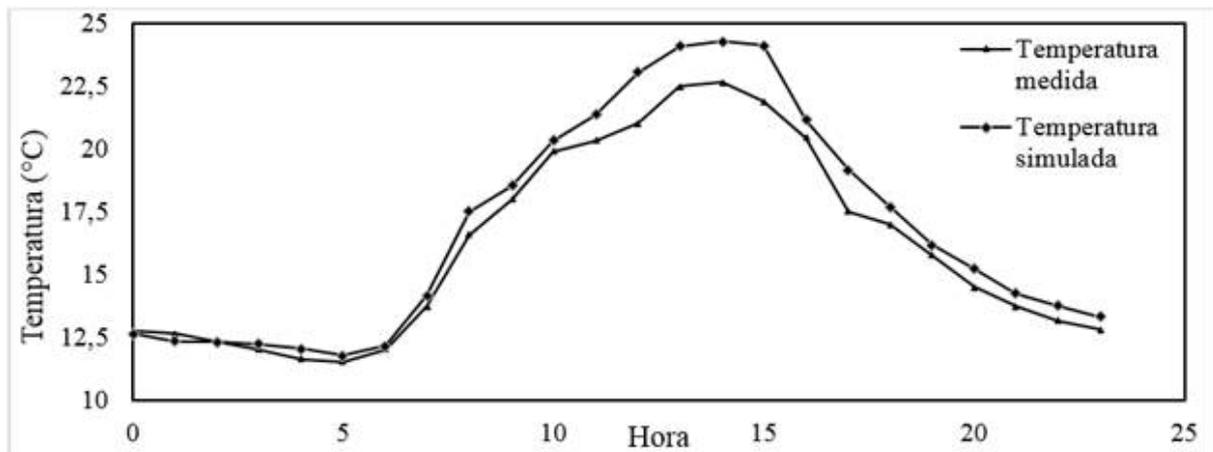


FIGURA 2. Perfil de temperatura horario medido y simulado dentro del invernadero capilla tipo colgante.

TABLA 2. Temperatura media interior y diferencia térmica entre el interior y el exterior del invernadero para los escenarios de clima diurno simulados

Hora	Temperatura media interior (°C)	Diferencial térmico (ΔT , °C)
6	12,17	0,88
7	14,16	2,71
8	17,52	4,74
9	18,55	4,41
10	20,34	4,55
11	21,38	4,47
12	23,05	5,36
13	24,10	5,89
14	24,31	5,93
15	24,12	5,63
16	21,17	2,94
17	19,18	2,35
18	17,71	1,91

económicas en los cultivos de rosa de la sabana de Bogotá.

La [Figura 3](#) presenta los patrones de distribución térmica en una sección vista de planta a 1,5 m del nivel del suelo para las horas 8, 12 y 16 ([Figura 3 A-C](#)). Para la hora 8 se puede observar un comportamiento térmico homogéneo con un valor medio de 17,52 °C ([Figura 3A](#)). Para la hora 12 se obtuvo un valor medio de temperatura de 23,05 °C, bajo esta condición se observa un comportamiento heterogéneo en un 40% del área evaluada, encontrando temperaturas más elevadas cerca de los costados laterales con valores medios de 25,1 °C y temperaturas más bajas con valores aproximados de 21,1 °C en la zona central del invernadero justo en las áreas de influencia de las ventilaciones de techo ([Figura 3B](#)). Estas condiciones heterogéneas no son adecuadas para la producción de flores ya que generan volúmenes de producción de tallos diferenciados en cantidad y calidad. Para la hora 16 el valor medio de temperatura interior obtenido fue de 21,17 °C, observando algunas zonas con valores de temperatura de 22,8 °C cerca de las aperturas laterales y frontales de

ventilación ([Figura 3C](#)). Lo anterior permite concluir que las condiciones térmicas en el interior del invernadero no son totalmente homogéneas y el comportamiento térmico para las primeras horas del periodo diurno son las más desfavorables para la producción de rosa.

Periodo nocturno

En la [Table 3](#) se pueden observar los valores medios de temperatura calculados para las horas nocturnas. El máximo valor de temperatura de 16,19 °C se registró para la hora 19, momento a partir del cual el comportamiento es decreciente a medida que transcurre la noche. Lo anterior se debe principalmente a que en los invernaderos pasivos se genera un enfriamiento radiativo desde el suelo hacia el ambiente exterior promovido por el confinamiento del aire interno y la alta transmisión de la cubierta plástica a las radiaciones infrarrojas ([Majdoubi et al., 2016](#)).

El invernadero presenta una hermeticidad térmica aceptable, lo que permitió la generación de ΔT positivos para las horas evaluadas,

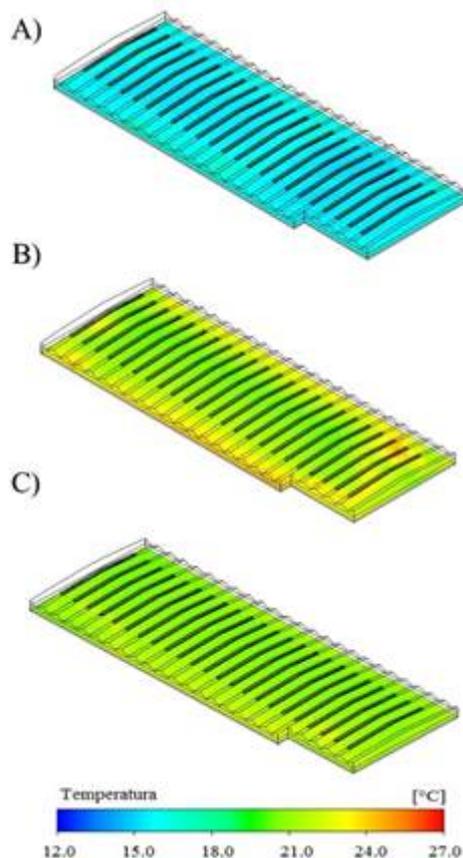


FIGURA 3. Contornos de temperatura (°C) simulados para A) hora 8, B) hora 12 y C) hora 16.

TABLA 3. Temperatura media interior y diferencia térmica entre el interior y el exterior del invernadero para los escenarios simulados de clima nocturno

Hora	Temperatura media interior (°C)	Diferencial térmico (ΔT , °C)
19	16,19	1,84
20	15,23	1,73
21	14,25	1,27
22	13,76	1,17
23	13,29	1,04
0	12,62	0,78
1	12,34	0,60
2	12,29	0,72
3	12,19	0,75
4	12,06	0,74
5	11,76	0,37

presentando unos valores máximos y mínimos de ΔT de 1,84 y 0,37 °C para la primera y última hora de la noche respectivamente. Teniendo en cuenta que las condiciones generales fueron despejadas y húmedas se debe mencionar que el invernadero presentó un comportamiento térmico que limitó la ocurrencia del fenómeno de inversión térmica que bajo estas condiciones meteorológicas predominantes es frecuente en los invernaderos colombianos.

La recomendación general para el cultivo de rosa es poder garantizar temperaturas nocturnas que oscilen entre los 15 y 17 °C (Yong, 2004). El análisis de los datos indicó que estos valores recomendados solo se obtienen para las horas 19 y 20. Las horas posteriores presentan valores medios por debajo del valor recomendado lo cual puede generar afectaciones relevantes en el crecimiento y desarrollo de la planta, en términos productivos bajo estas condiciones predomina la obtención de flores deformadas con un número de pétalos no deseables (Yong, 2004).

El análisis cualitativo de los patrones de distribución térmica en un plano a 1,5 m sobre el nivel del suelo para las horas 20, 0 y 4 se presenta en las Figuras 4 A, B y C. En general se observa un comportamiento térmico homogéneo para las tres horas evaluadas en aproximadamente un 95% del área evaluada.

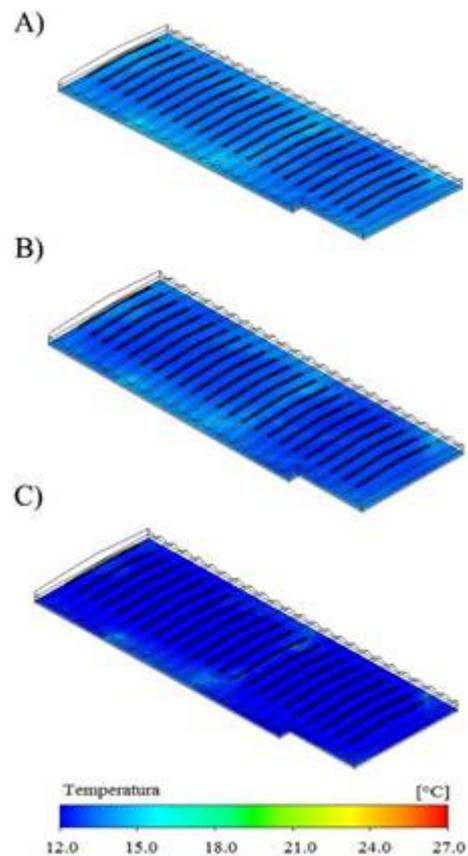


FIGURA 4. Contornos de temperatura (°C) simulados para A) hora 20, B) hora 0 y C) hora 4.

CONCLUSIONES

- Se generó un modelo CFD 3D para estudiar el comportamiento térmico de un invernadero colgante colombiano, el modelo fue validado a través de la comparación de datos obtenidos experimentalmente y datos simulados, esta comparación mostro un grado de ajuste

adecuado y una misma tendencia, por lo cual se concluye que el modelo CFD es fiable para desarrollar simulaciones numéricas y puede ser usado para evaluar el comportamiento térmico de otra tipología de invernaderos bajo las mismas condiciones meteorológicas.

- Los resultados encontrados muestran un comportamiento térmico óptimo para un total de seis de las trece horas evaluadas en el periodo diurno, durante estas seis horas la temperatura osciló en el intervalo óptimo para la producción de rosa que es de 21 y 24 °C. Para el periodo nocturno se encontró que el comportamiento térmico es inadecuado para nueve de las once horas evaluadas, en las que los valores de temperatura fueron inferiores al mínimo recomendado de 15 °C. Estas condiciones pueden limitar la producción final del cultivo de rosa y la calidad comercial de los tallos florales.
- Es recomendable que estudios posteriores incluyan otra serie de parámetros climáticos, tales como humedad relativa, déficit de presión de vapor o tasas de ventilación lo que permitirá realizar un análisis del comportamiento microclimático del invernadero y relacionarlo con el comportamiento agronómico y fisiológico de las plantas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), la Asociación Colombiana de Exportadores de Flores (Asocolflores) y al Centro de Innovación de la Floricultura Colombiana (Ceniflores). Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe conflicto. Financiación: Este estudio fue financiado por el SENA, Ceniflores y Asocolflores en el desarrollo del proyecto de investigación denominado “Generación de una herramienta de diseño u

optimización de ventilación natural de los invernaderos dedicados a la producción de flores de corte en cuatro subregiones de la Sabana de Bogotá, mediante el uso de herramientas de simulación basadas en la técnica Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAEZA, E.J.; PÉREZ-PARRA, J.J.; LÓPEZ, J.C.; MONTERO, J.I. CFD study of the natural ventilation performance of a parral type greenhouse with different numbers of spans and roof vent configurations. *Acta Horticulturae* 719: 333-338, 2006.
- BAXEVANOU, C.; FIDAROS, D.; BARTZANAS, T.; KITTAS, C.; Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149 (1): 54-70, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.006>
- BOJACÁ, C. R.; GIL, R.; COOMAN, A.; Use of geostatistical and crop growth modelling to assess the variability of greenhouse tomato yield caused by spatial temperature variations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 65(2): 219-227, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.10.001>
- CAMPEN, J. B.; BOT, G. P. A. SE-Structures and Environment: Design of a Low-Energy Dehumidifying System for Greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78(1): 65-73, 2001, <https://doi.org/10.1006/JAER.2000.0633>, 2004.
- CHEN, Q.; Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. *Building and Environment*, 44(4): 848-858, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.025>
- FLORES-VELÁZQUEZ, J.; VILLARREAL-GUERRERO, F.; Diseño de un sistema de ventilación forzada para un invernadero cenital usando CFD, (2015). *Revista Mexicana*

- de Ciencias Agrícolas vol. 6, n.2, pp. 303-316. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S200709342015000200007&lng=es&nrm=iso. ISSN 2007-0934.
- FATNASSI, H.; BOULARD, T.; PONCET, M. C.; Optimisation of Greenhouse Insect Screening with Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, 93(3): 301-312, 2006. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2006.11.014>
- HE, X.; WANG, J.; GUO, S.; ZHANG, J.; WEI, B.; SUN, J.; SHU, S.; Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149 (1): 16-25, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.001>
- IGLESIAS, N.; MONTERO, J.I.; MUÑOZ, P.; ANTÓN, A.; Estudio del clima nocturno y el empleo de doble cubierta de techo como alternativa pasiva para aumentar la temperatura nocturna de los invernaderos utilizando un modelo basado en la Mecánica de Fluidos Computacional (CFD). *Hort. Argentina*, 28, 18-23, 2009.
- KATSOULAS, N.; BARTZANAS, T.; BOULARD, T.; MERMIER, M.; KITTAS, C.; Effect of Vent Openings and Insect Screens on Greenhouse Ventilation. *Biosystems Engineering*, 93(4): 427-436, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.01.001>
- KITTAS, C.; KARAMANIS, M.; KATSOULAS, N.; Air temperature regime in a forced ventilated greenhouse with rose crop. *Energy and Buildings*, 2005, 37(8): 807-812, 2005, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.009>
- MAJDOUBI, H.; BOULARD, T.; FATNASSI, H.; SENHAJI, A.; ELBAHI, S.; DEMRATI, H.; BOUIRDEN, L.; Canary Greenhouse CFD Nocturnal Climate Simulation. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 6(6): 88-100, 2016. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2016.62008>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL (MADR). Estadísticas del sector 2017- Cadena sector flores. <https://www.minagricultura.gov.co/Paginas/default.aspx>. [Consulta: 21 de abril de 2018].
- MOLINA-AIZ, D.; VALERA, D.; PEÑA, A.; GIL, J.; LÓPEZ, A.; A study of natural ventilation in an Almería-type greenhouse with insect screens by means of tri-sonic anemometry. *Biosystems Engineering*, 104(2): 224-242, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.06.013>
- NORTON, T.; SUN, D.; GRANT, J.; FALLON, R.; DODD, V.; Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. *Bioresource Technology*, 98(12): 2386-2414, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>
- PISCIA, D.; MONTERO, J. I.; BAEZA, E.; BAILEY, B.; A CFD greenhouse night-time condensation model. *Biosystems Engineering*, 111(2): 141-154, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.11.006>
- RESTREPO, F. Manual de manejo de Botrytis cinerea en Rosas. Ediciones ceniflores. Bogota-Colombia. 120 p, 2010.
- RICO-GARCÍA, E.; Aerodynamic study of greenhouses using computational fluid dynamics. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(28): 2011. <https://doi.org/10.5897/IJPS11.852>
- SATO, S.; PEET, M. M.; GARDNER, R.G.: Formation of parthenocarpic fruit, undeveloped flowers and aborted flowers in tomato under moderately elevated temperatures. *Sci. Hortic.* 90: 243-254, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(00\)00262-4](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(00)00262-4)

- TOMINAGA, Y.; MOCHIDA, A.; YOSHIE, R.; KATAOKA, H.; NOZU, T.; YOSHIKAWA, M.; SHIRASAWA, T.; AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10-11): 1749-1761. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>
- VILLAGRÁN, E.; GIL, R.; ACUÑA, J. F.; BOJACÁ, C.; Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a colombian multispans greenhouse. *Agronomía colombiana*, 30(2): 282-288, 2012. ISSN 0120-9965.
- YONG, A.; El cultivo del rosal y su propagación Cultivos Tropicales, vol. 25, núm. 2, pp. 53-6 Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas La Habana, Cuba, ISSN: 0258-5936, 2004.
- ZIESLIN, N.; MOR, Y.; Light on roses. *Scientia Horticulturae*, 1990, vol. 43, p. 1-14. [https://doi.org/10.1016/0304-4238\(90\)90031-9](https://doi.org/10.1016/0304-4238(90)90031-9).

Edwin Andrés Villagrán Munar, PhD student in Environmental Sciences and Sustainability, Department of Biological and Environmental Sciences, Natural Sciences and Engineering Faculty, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia. e-mail: edwina.villagranm@utadeo.edu.co

Carlos Ricardo Bojacá Aldana, Profesor Basic Sciences and Modeling Department, Natural Sciences and Engineering Faculty, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia. e-mail: carlos.bojaca@utadeo.edu.co
Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.