

Estudio CFD de la obstrucción del cultivo en la uniformidad térmica de un invernadero cenital

A CFD study of the crop obstruction on the thermal uniformity in a zenithal-type greenhouse

Christian O. Díaz-Ovalle^{1,*}, María J. Ramírez-Rivera², Felipe de J. Martínez-Gaspar², César L. Aguirre-Mancilla²

Tecnológico Nacional de México/I.T. Roque, (1) Departamento de Ingenierías, (2) Departamento de Posgrado, carretera Celaya-Juventino Rosas km 8.0 Celaya, 38124, Guanajuato - México

*autor de correspondencia (christian.do@roque.tecnm.mx)

Recibido 11/02/2026

Evaluado 07/03/2026

Aceptado 13/06/2026

<https://doi.org/10.65093/aci.v17.n3.2026.61>

RESUMEN

Este estudio aplica la técnica de CFD para evaluar la uniformidad térmica en un invernadero considerando la obstrucción espacial por el cultivo. El sistema es un invernadero cenital con cuatro escenarios de cargas de cultivo usando una geometría realista del cultivo. Las condiciones de frontera provinieron de las condiciones externas bajo la vecindad de otros invernaderos. Un análisis de independencia aplicó al escenario de carga completa y el Índice de Convergencia de Malla obtuvo para la velocidad valores de 0.01% y 1.658% en las mallas fina y gruesa, respectivamente. El análisis involucró cuatro modelos de turbulencia para describir la uniformidad térmica. Los valores de temperatura del caso de mayor cantidad de plantas fueron validados con datos experimentales (raíz cuadrada de la diferencia cuadrática media de 5.2) y alcanzaron la mayor uniformidad térmica (1.4762). El modelo de turbulencia $k-\omega$ predijo la menor uniformidad térmica en todos los escenarios. Los escenarios de carga incompleta presentan una uniformidad térmica baja con valores superiores a 1.55. Esto demuestra la importancia de operar invernaderos con cargas homogéneas de cultivo. Así, la técnica de CFD es viable para predecir una homogeneidad térmica alta usando la geometría real de los cultivos en invernaderos.

Palabras clave: simulación de invernaderos, modelado de turbulencia, obstrucción, flujo interno

ABSTRACT

This study employs CFD to evaluate thermal uniformity in a greenhouse with geometrical obstruction by the crop. A zenithal-type greenhouse system considers four crop load scenarios by using realistic crop geometry. The boundary conditions were determined by considering the environmental conditions and the neighborhood of other greenhouse systems. A mesh independence test was applied to the homogeneous crop distribution scenario, and the Grid Convergence Index (GCI) was determined for the velocity values with 0.01% and 1.658% for the fine and coarse meshes, respectively. This analysis included four turbulence models to describe the thermal uniformity inside a greenhouse. The temperature values for the homogeneous crop distribution were validated (root mean squared difference of 5.2) and reached the highest thermal uniformity (1.4762). The $k-\omega$ turbulence model predicted the lowest thermal uniformity for all scenarios. The inhomogeneous charging crop scenarios reached low-value thermal uniformities of 1.55. This demonstrates the importance of operating greenhouses with uniform crop loads. Thus, the CFD technique is a viable method for predicting high thermal uniformity using the actual geometry of crops in greenhouses. This demonstrates the importance of operating greenhouses with uniform crop loads. Thus, the CFD technique is a viable method for predicting high thermal uniformity using the actual geometry of crops in greenhouses.

Keywords: greenhouse simulation, turbulence modeling, obstruction, inner flow

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas agrícolas económicos y sostenibles es el principal objetivo de los sistemas novedosos en el diseño de invernaderos (Mistriotis *et al.*, 1997). Estos sistemas agrícolas están basados en la mejora de las condiciones de microclima para lograr altas eficiencias en la producción, a través de la reducción de enfermedades y garantizando un sistema libre de plagas (Badji *et al.*, 2022). Además, la heterogeneidad de las condiciones térmicas e hidrodinámicas dentro del invernadero debe ser controlada para lograr sistemas óptimos por transpiración y fotosíntesis minimizando el consumo de agua y evitando zonas de variaciones internas o alto nivel de homogeneidad (Bournet & Boulard, 2010).

La cantidad de estudios experimentales y teóricos sobre invernaderos son extensos y la simulación asistida por computadora es un elemento imprescindible, en particular, la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD por sus siglas en inglés). Norton *et al.* (2007), presentaron los fundamentos y aplicaciones iniciales de la técnica CFD en el estudio de la ventilación interna en invernaderos y sistemas de cría de ganado. Ese trabajo resumió la experiencia técnica para analizar invernaderos sujetos a condiciones térmicas y de flujo realistas, como la inclusión de radiación, transpiración y la representación como lechos porosos al cultivo y las ventanas de protección. Posteriormente, Bournet y Boulard (2010) describieron los trabajos más trascendentes en la aplicación de CFD en la ventilación interna de la mayoría de los diseños de invernaderos. Los autores presentaron pruebas CFD extendidas, como mallas y modelos de turbulencia, y trabajos con validación experimental. Recientemente, Bournet y Rojano (2022) reunieron trabajos actuales sobre el uso de CFD bajo consideraciones rigurosas en sistemas diversos como invernaderos con nebulización, calentamiento y enfriamiento; y Fatnassi *et al.* (2023), desarrollaron una revisión respecto a la interacción de transferencia de masa y calor del cultivo y el microclima a partir de una descripción de la fotosíntesis y la sensibilidad térmica de la planta en un lecho poroso. Recientemente, Xu *et al.* (2026) presentaron un compendio extenso sobre la simulación de invernaderos bajo diversas perspectivas en 3D, lo cual incluye técnicas de simulación desde la estructura del invernadero hasta interacciones globales entre sistemas de riego, dispersión de gotas y crecimiento y estrés de cultivo. Estos trabajos son revisiones bibliográficas extensas que demuestran la factibilidad de las simulaciones CFD en invernaderos bajo una gran diversidad de consideraciones.

El CFD es una herramienta elemental aplicada en invernaderos, como se ha demostrado desde la obtención del coeficiente de transferencia de calor entre el ambiente interno y externo del invernadero (Mao & Su, 2024) hasta la ubicación óptima de ventiladores internos (Lu *et al.*, 2025). Sobre el diseño actual de invernaderos, algunos trabajos selectos bajo CFD han estudiado el efecto de la altura del invernadero sobre el aumento de la temperatura interna (Zghal *et al.*, 2025), la forma del techo para la distribución térmica interna y su aplicabilidad en lugares semi-áridos (Allali *et al.*, 2026) y la diversidad de las entradas de aire para optimizar el flujo interno y reducir zonas de flujo reversible de alta fluctuación (Qi *et al.*, 2026). Asimismo, la estrategia de CFD ha permitido análisis extensos sobre la diversidad de condiciones climáticas, como la inclusión las temporadas del año (Lee *et al.*, 2026) y horas del día (Sun *et al.*, 2026), y la extensión a un número elevado de invernaderos vecinos (Liu *et al.*, 2026). Inclusive, la simulación CFD ha descrito la dispersión de esporas patógenas dentro de invernaderos donde la distribución de temperatura y de velocidad internas son fundamentales (Ma *et al.*, 2026).

El cultivo dentro de un invernadero ha sido tratado en CFD como un medio poroso bajo la ley de Darcy-Fechheimer (Bournet & Boulard, 2010), esto debido a la complejidad de la geometría y el desarrollo del dominio computacional a un amplio nivel de detalle característico de cada cultivo. Esta aproximación ha beneficiado a simulaciones con sistemas de transferencia de masa y calor por efecto transpiración y fotosíntesis (Fatnassi *et al.*, 2023). Algunos ejemplos de trabajos recientes han aplicado esta aproximación para el uso de sistemas fotovoltaicos para sustentabilidad (Amara *et al.*, 2021), sistemas de aireación con difusores (Chalill *et al.*, 2021), sistemas con respiración en estado transitorio (Zhang *et al.*, 2022a; Zhang *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2022b); incluso, la distribución espacial de camas de cultivo (sistemas porosos) con un uso excesivo de elementos del dominio computacional (Kang *et al.*, 2024) y el análisis de la altura del cultivo considerado como un sistema poroso (Lu *et al.*, 2025). Sin embargo, la complejidad de aproximar la forma del cultivo y su interacción con fenómenos característicos del crecimiento es un reto no abordado totalmente.

El estado del arte sobre trabajos de invernaderos con CFD indica un límite en la descripción física del sistema real del cultivo. Este trabajo analiza el efecto de la obstrucción del cultivo en un invernadero cenital basado en una geometría realista del cultivo. Esta propuesta analiza diversos escenarios de carga del cultivo con diversos modelos de turbulencia, lo cual no ha sido reportado en trabajos previos. Además, la uniformidad térmica dentro del sistema es cuantificada para relacionar la obstrucción del cultivo con el comportamiento del flujo interno. La estrategia general sigue el procedimiento convencional de CFD e incluye la validación experimental de la temperatura interna del escenario.

METODOLOGÍA

Este estudio analiza la distribución térmica e hidrodinámica dentro de un invernadero cenital. El sistema considera el aire como gas ideal sujeto a transferencia de calor por radiación y convección, flotabilidad y efecto de turbulencia. El cultivo es una geometría realista de la planta dentro del dominio computacional, ya que no consiste en una aproximación porosa. No obstante, el sistema no considera en esta fase de estudio la interacción del cultivo con el microclima a través de fenómenos de transferencia de masa. Adicionalmente, este trabajo consideró al sistema en estado estable como representación puntual de los datos y las mediciones no fueron extendidas ni interpoladas en varios momentos. A partir de esto, el sistema consideró cuatro geometrías basadas en la ubicación de la geometría del cultivo. En particular, este análisis involucra cuatro modelos de turbulencia que son validados experimentalmente, similar al trabajo de Zghal *et al.* (2025). La técnica CFD es empleada para analizar el comportamiento hidrodinámico en el invernadero, la cual sigue la estrategia convencional: elaboración del dominio computacional, proceso de discretización, definición de las ecuaciones de gobierno y condiciones de frontera, y solución numérica. El desarrollo del análisis fue posible con el paquete comercial ANSYS® Fluent 2025 R2. La validación experimental aplicó un Sistema de Arduino dentro del invernadero para la medición de la temperatura.

Descripción del sistema

Este estudio consideró un invernadero cenital (12 m de largo, 10 m de ancho y 6 m de alto hasta la cumbrera superior) con ubicación geográfica: 20° 34' 53.256'' N y 100° 49' 35.256'' W. El sistema incluyó plantas de jitomate en un periodo de maduración (70 días después del trasplante) con altura aproximada de 100 cm en macetas cilíndricas de 40 cm de diámetro y 40 cm de altura. Las macetas fueron distribuidas en hileras de 9 macetas con separación de 1.2 m entre hilera y 1.2 m entre maceta. La Figura 1 contiene distintas vistas del invernadero analizado y la Figura 2 a) las dimensiones.

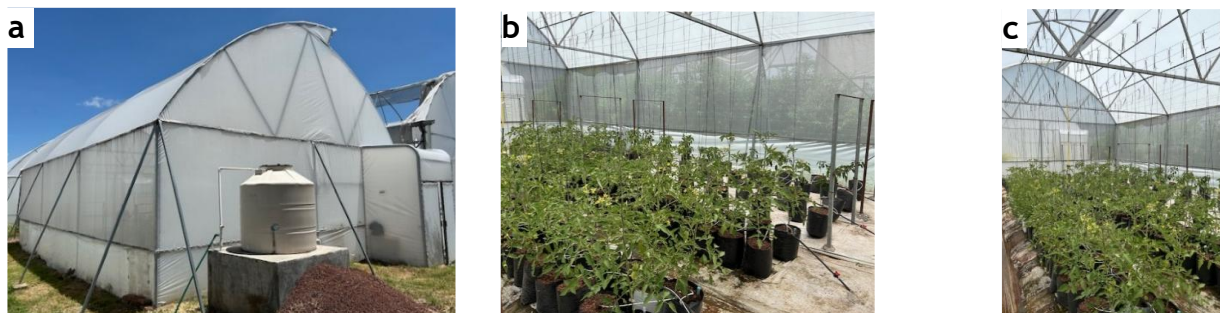


Fig. 1: Imágenes del invernadero cenital estudiado: a) vista externa, b) vista interna 1 y c) vista interna 2.

En este caso, cuatro propuestas de distribución de plantas son consideradas con base al desarrollo de proyectos agrícolas distintos (Figura 2): a) carga completa, 8 hileras de macetas (C1), b) media carga de plantas bajo la cumbrera inferior, 4 hileras de macetas (C2), c) media carga de plantas bajo la cumbrera superior, 4 hileras de macetas (C3), y d) carga nula (C4). La temperatura del caso de carga completa (C1) fue validada experimentalmente. Los datos experimentales obtenidos fueron distribuidos en un sistema nodal espacial (Kalbasinia *et al.*, 2025), el cual contó con las siguientes separaciones entre puntos (m): $\Delta x=3.3$, $\Delta y=1.5$ y $\Delta z=4.5$. Los puntos son identificados con la notación Kmn, con $m=x$ (1,2,3), $n=y$ (1,2,3), y $K=z$ (A,B,C). La Figura 2 a) describe la distribución de puntos de medición, donde la cruz verde identifica el nodo ejemplo $A_{3,1}$.

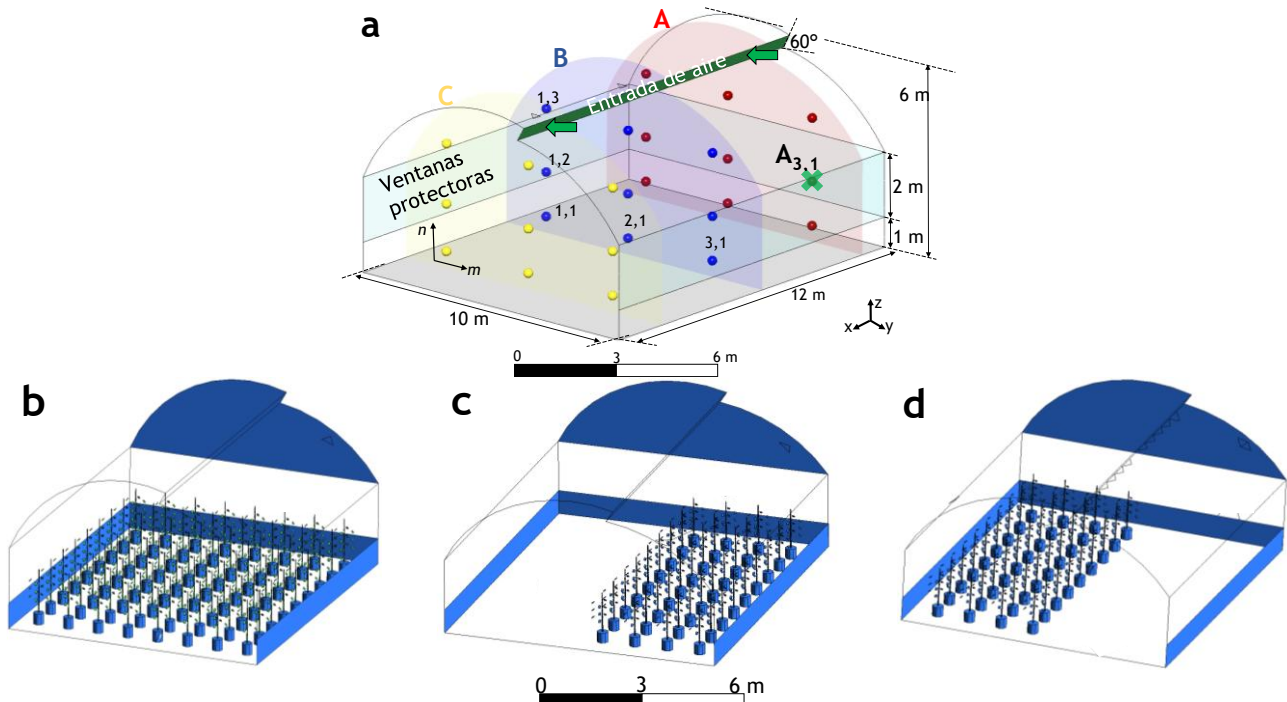


Fig. 2: Representaciones del dominio computacional del sistema: a) condiciones de frontera, sistema nodal y medidas en el caso de carga nula, C4, b) caso de carga completa de macetas, C1, c) caso de media carga de macetas bajo la cumbrera inferior, C2, y d) caso de media carga de macetas bajo la cumbrera superior, C3.

Propiedades del sistema

El sistema consideró en esta etapa aire puro como fluido, el cual sigue el modelo de gas ideal con capacidad calorífica bajo modelo NASA9 y conductividad térmica y viscosidad aproximados por el modelo de teoría cinética de gases. El plástico de recubrimiento tuvo las propiedades de densidad 925 kg/m^3 , capacidad calorífica de 1900 kJ/kgK , conductividad térmica de 0.333 W/mK , y radiación por absorptividad de 0.05 y por transmisividad de 0.85 (Dehbi *et al.*, 2010; Emekli *et al.*, 2016; Lin *et al.*, 2019). El sistema presentó efecto de flotabilidad bajo principio de Boussinesq con temperatura de operación de 288.16 K y densidad del aire de 1.223 kg/m^3 .

Condiciones de frontera

El aire del ambiente fue simulado para determinar la condición de frontera de entrada en el invernadero. Esta simulación incluyó a otros invernaderos vecinos para aproximar un flujo de aire. La Figura 3 a) representa este sistema de un diámetro de 68 m y altura de 15 m con nueve invernaderos idénticos separados lateralmente 5 m y frontalmente 3 m . Para este sistema, la condición de frontera del aire consideró una temperatura de 22°C y un perfil logarítmico de velocidad, basado en los parámetros indicados en la literatura (Kichah *et al.*, 2012; Amara *et al.*, 2021; Mao & Su, 2024; Liu *et al.*, 2026). La Tabla 1 contiene las expresiones representativas de las condiciones de frontera para la entrada de aire a través de perfiles de velocidad, energía cinética de turbulencia y disipación de turbulencia (Richards & Hoxey, 1993). Los valores son aproximados para el clima local: velocidad de referencia, u_0 , 2 m/s a una altura de referencia, h_0 , de 10 m , tomados de un centro meteorológico local, rugosidad del terreno de pasto, z_0 , de 0.03 m y constante de von Kármán, $k=0.42$ (Liu *et al.*, 2026). Particularmente, una simulación preliminar a la del estudio de este trabajo fue desarrollada, la cual es resumida como: malla de $620,644$ elementos tetraédricos bajo el modelo de turbulencia κ - ϵ Realizable y solución con el algoritmo SIMPLE a $1,000$ iteraciones. La Figura 3 b) muestra el comportamiento del aire exterior y la Figura 3 c) corresponde a los perfiles de velocidad, temperatura y energía cinética de turbulencia, κ , para la frontera de entrada de aire. Para el flujo interno del invernadero, las

ventanas protectoras del invernadero han sido tratadas en la literatura como un sistema poroso bajo el modelo de Darcy-Forchheimer. No obstante, para evitar el tratamiento de porosidad en la ventana, estas fronteras consideraron el valor del coeficiente de descarga de 0.75 (Roy *et al.*, 2002).

Tabla 1: Expresiones para las condiciones de frontera del flujo de aire del ambiente.

Nombre	Expresión matemática
Velocidad de fricción	$u^* = ku_0 \left[\ln \left(\frac{h_0 + z_0}{z_0} \right) \right]^{-1} = 0.144 \frac{m}{s}$
Perfil de velocidad	$u = \frac{u^*}{k} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) = (0.344 \frac{m}{s}) \ln \left(\frac{z + 0.03m}{0.03m} \right)$
Energía cinética de turbulencia	$\kappa = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_{\epsilon 2}}} = 0.015 \frac{m^2}{s^2}$
Perfil de ϵ	$\epsilon = \frac{(u^*)^3}{k(z + z_0)} = \frac{7.19 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s^3}}{(z + 0.03m)}$

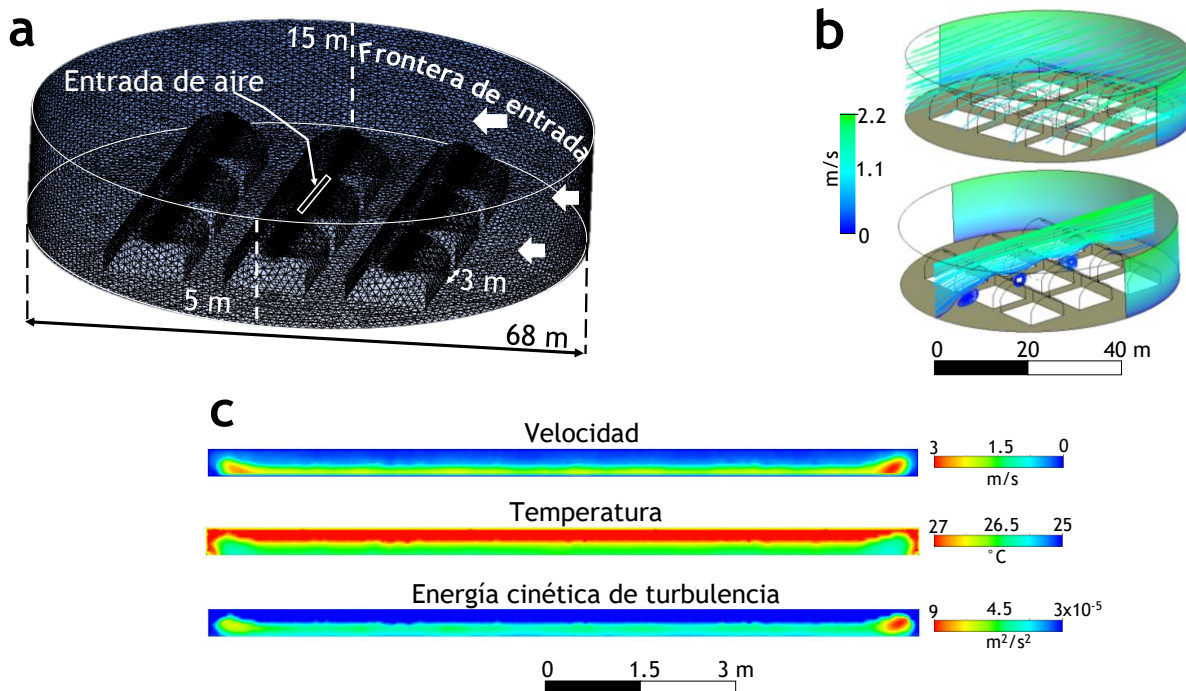


Fig. 3: Representación del sistema exterior para determinar la condición de frontera de entrada en el germinador: a) descripción general, b) comportamiento del aire exterior y c) perfiles para la frontera de entrada.

Ecuaciones de gobierno

La simulación CFD parte de las ecuaciones de continuidad y conservación de energía y momentum. Adicionalmente, el tratamiento de turbulencia es incluido dada la generación de zonas y condiciones de flujo impredecibles y caóticas. Wilcox (2006) y Rodríguez (2019) han presentado el tratamiento generalizado de las ecuaciones de Navier-Stokes a través de la aproximación de viscosidad de turbulencia propuesta por Boussinesq.

Esto genera las ecuaciones de Reynolds-Stress basadas en la aplicación de la fluctuación de velocidad, u' , que equivale a: $u - \bar{u}$, con u como la velocidad del sistema y $\bar{u}$ como el promedio de la velocidad. Así, los problemas

de cerradura son aproximados bajo parámetros de turbulencia aproximados provenientes de esas ecuaciones agregando la teoría de capa límite de Prandtl. La literatura recomienda el uso del modelo k-ε en invernaderos (Bournet & Boulard, 2010). Sin embargo, la obstrucción por las plantas sugiere la validación de distintos modelos de turbulencia, como ha sido tratado en trabajos previos de Zghal *et al.* (2025) y Xu *et al.* (2021). La Tabla 2 contiene la formulación matemática de los modelos que son:

- Modelo k-ε Realizable: presenta robustez y funcionalidad en sistemas de turbulencia para cálculo de energía cinética de turbulencia bajo la aproximación de Boussinesq. La energía cinética de turbulencia, κ , engloba la intensidad de las fluctuaciones de los componentes de velocidad, u_i' . Launder y Spalding (1974), desarrollaron el modelo fundamental que fue modificado por Shih *et al.* (1995) a la forma Realizable al incluir la aproximación de la curvatura por efecto de la vorticidad y la rotación.
- Modelo k-ω con transporte por esfuerzo cortante (SST, por sus siglas en inglés): aplicable a zonas de transición de flujo con Reynolds bajos, compresibilidad y variabilidad en el esfuerzo de corte. Wilcox (2006), presentó este modelo basado en la aproximación de la transición entre flujo laminar y turbulento y el efecto de capas cercanas a las paredes.

Tabla 2: Modelos de turbulencia aplicados en este estudio.

Nombre	Formulación matemática
k-ε Realizable	$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho \kappa}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + R_{\kappa j} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \varepsilon \rho$ $\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} \left(C_{\varepsilon 1} R_{\kappa j} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon \right)$ Constantes: $\sigma_\kappa=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$.
k-ω SST	$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho \kappa}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma^* \mu_t \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + R_{\kappa j} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \beta^* \kappa \omega \rho$ $\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma \mu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \gamma \frac{\omega}{\kappa} R_{\kappa j} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} - \beta \omega^2$ Constantes: $\sigma=\sigma^*=1/2$, $B=3/40$, $B^*=9/100$, $\gamma=5/9$.
Transición SST	$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho \kappa}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma_\kappa \mu_t \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + P_\kappa - \beta^* \kappa \omega \rho$ $\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho \omega}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \sigma \mu_t \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \alpha}{\mu_t} P_\omega - \beta \omega^2 + 2\sigma_{\omega 2} (1-F_1) \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$ $P_\kappa = \min \left[R_{\kappa j} - \frac{2}{3} \delta_{jk} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_k}, 10\beta^* \kappa \omega \right] \quad P_\omega = \min \left[R_{\omega j} \frac{\partial u_j}{\partial x_j}, 10\beta^* \kappa \omega \right]$ $F_1 = \tanh \left(\left[\min \left[\max \left(\frac{\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega y^*}, \frac{500\mu}{\rho \omega y^{*2}} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} \kappa}{CD_{\omega 2} y^{*2}} \right] \right]^4 \right) \quad F_2 = \tanh \left(\left[\max \left(\frac{2\sqrt{\kappa}}{\beta^* \omega y^*}, \frac{500\mu}{\rho \omega y^{*2}} \right) \right]^2 \right)$ Constantes: $\sigma_\kappa=0.85F_1+F_2$, $\alpha=(5/9)F_1+0.44F_2$, $B=(3/40)F_1+0.0828F_2$, $\sigma_\omega=0.5$, $\sigma_{\omega 2}=0.856$, $B^*=9/100$. Variable: y^* es la distancia para la cercanía a la superficie.
RST	$\frac{\partial R_{jk}}{\partial t} + u_l \frac{\partial R_{jk}}{\partial x_l} = \underbrace{-R_{jl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l}}_{(3)} - \underbrace{R_{kl} \frac{\partial u_j}{\partial x_l}}_{(4)} + \underbrace{\epsilon_{jk} - \Pi_{jk}}_{(5)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_l} \left[\frac{\mu}{\rho} \frac{\partial R_{jk}}{\partial x_l} + C_{jkl} \right]}_{(6)}$ (1) (2) (3) (4) (5) (6) Descripción: (1) cambio transitorio, (2) convección, (3) producción de estrés, (4) velocidad de disipación, (5) tensor de presión, (6) difusión.
Tensor de Reynolds:	$R_{jk} = -\overline{u_j' u_k'} = \left[\mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \rho \kappa \delta_{jk} \right]$

- Modelo de transición SST: considera el fundamento del modelo k- ω propuesto por Wilcox (1988), el cual aplicó a regiones de la capa límite bajo una función de mezcla, $\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 F_2$ con $\phi_1 + \phi_2 = 1$ y F_1 y F_2 son funciones provenientes de los parámetros de turbulencia (Menter, 1994).
- Modelo de transporte de esfuerzos de Reynolds (RST, por sus siglas en inglés): es el modelo más completo de la transformación de las ecuaciones de Navier-Stokes y está basado en el tensor de Reynolds (R_{ij}). Este modelo no predice un comportamiento de turbulencia isotrópica y es apropiado para flujos de rotación con cambios considerables en la velocidad. La estructura matemática de RST considera términos tensoriales como: ϵ_{jk} (tasa de disipación) Π_{jk} (presión) y C_{jkl} (transporte de turbulencia). Estos han sido aproximados bajo descomposiciones lineales, expansiones axi-simétricas, planos de rotación, etc. (Gibson & Launder, 1978; Launder *et al.*, 1975; Speziale *et al.*, 1991).

La radiación fue analizada bajo el modelo Rosseland, que proviene de una modificación al modelo Pn, el cual proviene de aplicar armónicos esféricos en la ecuación integro-diferencial de transferencia de radiación (Modest, 2013). Así, la ecuación de transferencia de radiación es reducida a la modificación de la ley de Fourier. El modelo Rosseland considera un algoritmo de trazado de rayos solares para determinar la irradiación solar directa y difusa bajo los principios del modelo Pn (Cheng, 1964), lo que corresponde a:

$$q = - \left(k' + \frac{16\sigma n^2 T^3}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \right) \nabla T \quad (1)$$

donde q es el flux de calor de la ley de Fourier modificada, k' es la conductividad térmica del medio, σ es la constante de Stefan-Boltzman, σ_s es el coeficiente de dispersión, a es el coeficiente de absorción, n es el índice de refracción del medio y C es el coeficiente de función de fase lineal anisotrópico.

Solución numérica

La discretización computacional de los escenarios propuesta consideró elementos hexaédricos para aplicar el método de Volumen Finito y resolver las ecuaciones de gobierno (Yeoh & Tu, 2010). Una prueba de independencia de malla fue realizada para demostrar la invariabilidad de los resultados con respecto al número de elementos hexaédricos. Esta prueba aplicó al caso real (C1) y consideró tres niveles de refinamiento (número de elementos): grueso (572,655), medio (711,752) y alto (1,513,402). Celik *et al.* (2008), propusieron un algoritmo para cuantificar la incertidumbre en esta prueba bajo el índice de convergencia de malla (GCI por sus siglas en inglés). Este parámetro compara los resultados obtenidos de distintas mallas bajo la extrapolación hacia una solución exacta, así los valores bajos son deseados. En este caso, la velocidad promedio volumétrica dentro del invernadero fue seleccionada para calcular el GCI. El algoritmo fue resuelto bajo código propio en VBasic (comparado previamente con los resultados del trabajo de Celik *et al.* (2008)). Los resultados de la velocidad para las mallas fueron (m/s): gruesa (0.4334), media (0.4144) y fina (0.4179). El cálculo de GCI indicó una incertidumbre de 1.658 % (malla gruesa) y 0.01% (malla fina). Esto demuestra una prueba de independencia de malla aceptable que sugiere el uso de la malla de refinamiento medio.

La calidad de la elaboración de la malla fue cuantificada con la distorsión de los elementos hexaédricos. Este concepto determina el nivel de deformidad de un elemento respecto a un sistema ideal circunscrito en una esfera y sus valores deben tender a cero para indicar bajo nivel de distorsión o alta calidad de malla (Ali *et al.*, 2017; Song *et al.*, 2025). La cuantificación general de los escenarios planteados en este estudio fue (elementos-distorsión): C1 (711,752-0.4547), C2 (360,202-0.4527), C3 (359,473-0.4539) y C4 (123,310-0.2836). Los datos indican una calidad de malla aceptable y claro es que los casos con plantas generaron mayor cantidad de elementos por la obstrucción de éstas. La Figura 4 representa una vista general del sistema discretizado y una distribución espacial de la distorsión para C1 con detalle de la zona con plantas.

El paquete computacional ANSYS® Fluent 2025R2 cuenta con distintas estrategias numéricas para resolver este problema. La estrategia general fue basada en la presión aplicando el algoritmo SIMPLE (solución de las ecuaciones de gobierno discretizadas con corrección de la presión) y aproximación entre los nodos basados en una interpolación de segundo orden, que corresponde a la expansión de una serie de Taylor sobre la derivada central sobre las caras

del volumen (Barth & Jespersion, 1989). La inicialización numérica partió de la solución de la ecuación de Laplace para el flujo dentro del sistema. La solución numérica aplicó 5,000 iteraciones y cada simulación tomó un tiempo de 3 a 5 h en una computadora con 32 GB RAM y procesador Intel® Corel™ i7-13700 2.1 GHz.

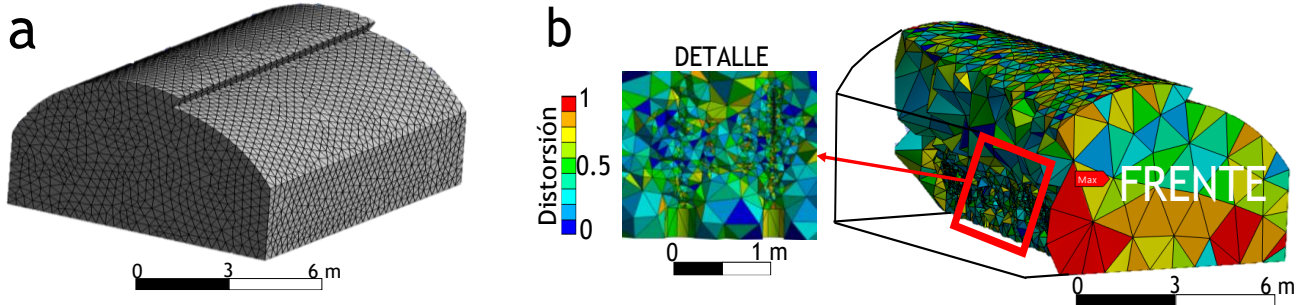


Fig. 4: Discretización del sistema: a) vista general y b) distribución de la distorsión para el invernadero completo de plantas (C3). El detalle esquematiza el refinamiento por efecto de la existencia de plantas.

Medición de temperatura y uniformidad térmica

Esta fue realizada durante diez días del mes de septiembre de 2025 por el medio día. Estos valores fueron promediados y tomados como puntos de comparación a las simulaciones. El sistema de medición fue un sensor Arduino DHT11 (Electrónica Steren S.A. de C.V, CDMX, México) conectado directamente a una computadora, donde los datos fueron medidos en tiempo real por segundo y promediados a dos minutos de medición, similar a la técnica empleada por Zghal *et al.* (2025). El sensor fue colocado en los puntos descritos del sistema matricial (K_{mn}) de la Figura 2 a). El Arduino fue colocado a una regla graduada para medir los puntos superiores. La validación numérica de simulación ha sido extendida y en la literatura existen varias opciones de cuantificar la diferencia entre los valores experimentales y de simulación (Jin *et al.*, 2025; Kalbasinia *et al.*, 2025; Song *et al.*, 2025). De esas opciones, este trabajo aplicó la raíz cuadrada de la diferencia cuadrática media (RDCM), que indica la diferencia promedio de unidades de temperatura entre los puntos experimentales y de la simulación bajo la siguiente expresión:

$$RDCM = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (T_{exp} - T_{CFD})_k^2}{n}} \quad (2)$$

La operatividad ideal en los invernaderos, en algunos cultivos, requiere un sistema uniforme en sus condiciones. En este caso, la temperatura es considerada el principal factor de cuantificación de uniformidad térmica. Existen distintas aproximaciones de cuantificación y la literatura emplea la referida al análisis de la variación respecto el punto central (en este caso temperatura en $B_{2,2}$, T_c) (Smolka, 2013). Este concepto de uniformidad relativa de temperatura respecto al punto central (UT) es obtenido por la expresión:

$$UT = \sum_{k=1}^n \frac{|T_k - T_c|}{T_c} \quad (3)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis validó el caso de estudio C1 (caso real) y describió todos los escenarios geométricos (C2, C3 y C4) bajo los cuatro modelos de turbulencia de la Tabla 2 (κ - ϵ , κ - ω , SST y RST). La Tabla 3 contiene las lecturas experimentales de temperatura en los puntos propuestos para el escenario C1. Adicionalmente, la uniformidad térmica fue analizada a los distintos escenarios y modelos de turbulencia. La validación de datos y la uniformidad térmica son examinadas considerando el comportamiento hidrodinámico y térmico dentro de invernadero.

Tabla 3: Valores de temperatura experimental con el sistema nodal ($^{\circ}\text{C}$).

Sección	A			B			C		
Posiciones	m=1	m=2	m=3	m=1	m=2	m=3	m=1	m=2	m=3
n=1	30.84	32.16	32.98	34.02	34.32	32.12	29.68	31.24	34.30
n=2	31.00	32.71	34.01	34.54	33.15	31.73	30.67	32.60	35.31
n=3	31.48	32.71	34.53	35.20	32.40	30.04	30.60	33.34	36.24

Validación experimental

El escenario de carga completa (C1) es el escenario real sobre el que fue realizada la validación. Los resultados de RDCM para los modelos de turbulencia son ($^{\circ}\text{C}$): 5.017 (κ - ϵ), 5.231 (κ - ω), 5.204 (SST) y 5.332 (RST). Estos resultados demuestran un alejamiento mayor para el modelo RST en contraste con el modelo κ - ϵ ; esto a pesar de la rigurosidad matemática del modelo RST. Los modelos κ - ω y SST presentaron un valor similar de RDCM dado a su naturaleza matemática, la cual emplea el concepto de ω como se observa en la Tabla 2. Este punto recomienda el modelo κ - ϵ para este escenario basado en una aproximación de Boussinesq para la disipación de turbulencia. Adicionalmente, la Figura 5 contrasta las lecturas de la temperatura en los puntos del sistema nodal para este escenario con los cuatro modelos de turbulencia. Estos resultados presentaron una predicción inferior en el valor de temperatura con un alejamiento de mayor en los puntos de la sección C. Esta sección está influida por la pared del invernadero. El punto $B_{1,3}$ logró la mayor diferencia entre la temperatura simulada y la experimental.

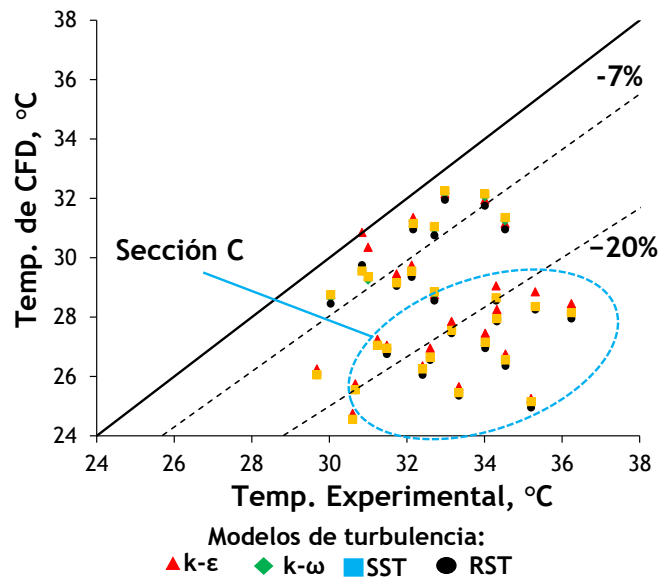


Fig. 5: Resultados de la validación de temperatura para el escenario C1.

Comportamiento hidrodinámico

Esta sección describe el flujo y la temperatura dentro del invernadero e indica los puntos de mayor aproximación con los datos experimentales para el escenario C1. La Figura 6 presenta los resultados obtenidos de todos los casos bajo los modelos de turbulencia con el valor menor de RDCM, además incluye el punto más alejado del valor experimental y el más cercano para el escenario C1, $B_{1,3}$ y $A_{1,1}$, respectivamente. Además, la imagen izquierda contiene iso-volumenes de la temperatura y la energía cinética de turbulencia (κ) dentro del invernadero; y la imagen derecha las líneas de corriente. Las escalas de las imágenes varían entre sí debido a que un solo valor de escala distorsiona la percepción visual de los resultados y evita el nivel de detalle requerido para este análisis.

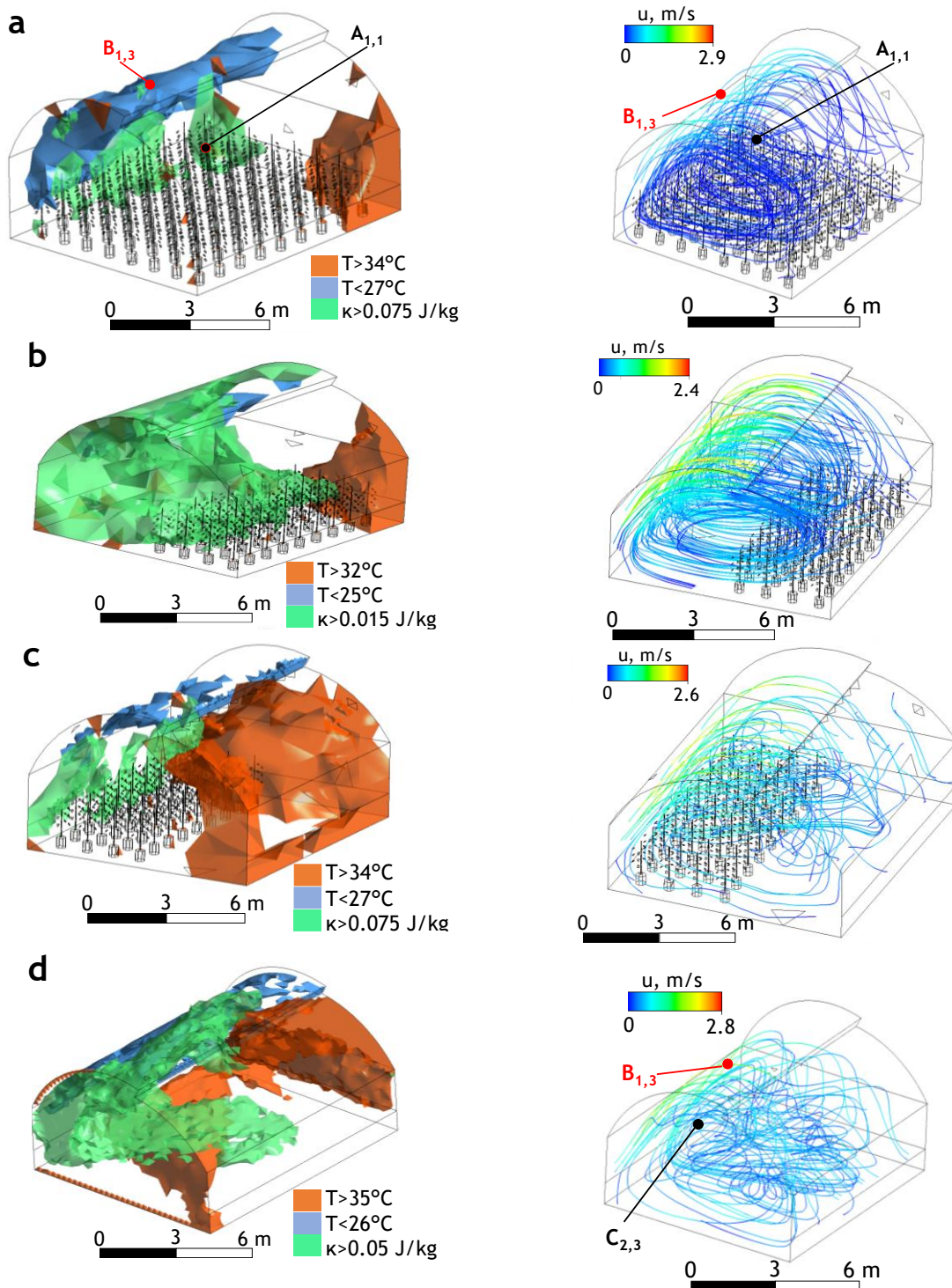


Fig. 6. Resultados internos de hidrodinámica y térmica del invernadero para todos los escenarios con los modelos del valor menor de UT: a) C1- κ - ω , b) C2- κ - ω , c) C3-SST y d) C4- κ - ω . La imagen izquierda contiene iso-volumenes de regiones con las escalas indicadas y la derecha las líneas de corriente. La validación experimental de la temperatura para el escenario C1 mostró al $(B_{1,3})$ como el más alejado y al punto $(A_{1,1})$ como el más cercano.

Los casos C2 y C4 lograron zonas de baja turbulencia. Esta es cuantificada con la energía cinética de turbulencia que engloba las fluctuaciones de los componentes de la velocidad e interpreta el nivel de disipación de energía mecánica bajo distintas escalas de remolinos (Wilcox, 2006). Así, los casos con las escalas menores de κ presentan zonas de menor turbulencia. Esto fue consecuencia de escenarios de nula obstrucción al flujo de aire entrante bajo la cumbrera mayor. Los casos C1 y C3 presentaron lo contrario. En general, la ausencia de plantas genera flujos fluctuantes mayores que aumentan las zonas de temperatura caliente, como se observa en los casos C3 y C4, Figuras 6 c) y d), respectivamente.

Todos los casos presentaron las zonas de menor temperatura con cercanía al aire de entrada. Esto correspondió al valor de la condición de frontera. No obstante, el escenario C1 (Figura 6 a) extendió la zona de baja temperatura por debajo de la cumbrera superior. En caso contrario, el escenario C3 (Figura 6 c) presentó un mayor volumen de alta temperatura en la sección de ausencia de plantas; esto corresponde a flujos no homogéneos con menor disipación de energía mecánica. Los puntos de las esquinas alejadas a las corrientes de entrada (puntos $A_{3,1}$ y $C_{3,1}$) presentaron las zonas de mayor temperatura. Así, la generación de zonas de turbulencia y temperatura son consecuencia de la homogeneidad de las corrientes internas de aire, las cuales son resultado de la obstrucción presente para cada escenario.

Uniformidad térmica

Los valores bajos de UT indican un sistema de alta uniformidad térmica. Los datos experimentales de este estudio presentaron un valor de UT de 1.1992. La Tabla 4 contiene los valores de UT para los distintos escenarios y modelos de turbulencia. El escenario C1 presentó la mayor uniformidad térmica dada a los efectos de las plantas sobre la distribución del flujo (Figura 6 a). El escenario C3 fue el caso contrario por la mayor generación de zonas con turbulencia, así como el flujo no-uniforme debajo de la cumbrera inferior y la mayor zona de temperatura caliente (Figura 6 c). Como fue mencionado, la generación de flujos fluctuantes mayores (causa de zonas sin cultivo) demerita la uniformidad térmica. Por otra parte, los modelos de turbulencia con alta uniformidad (valores menores) por escenario fueron: κ - ω (C1, C2 y C4), y SST (C3); así, como el modelo RST predice una uniformidad térmica menor. Ambas observaciones tienen similitud con la validación experimental.

Tabla 4: Valores de UT para cada escenario y modelo de turbulencia.

Caso	C1	C2	C3	C4
Modelo				
k- ϵ	1.5146	1.6221	1.6068	1.6190
k- ω	1.4762	1.5222	1.5988	1.4977
SST	1.4825	1.6317	1.5982	1.5312
RST	1.4821	1.7504	1.6131	1.7566

UT: uniformidad térmica relativa al punto central.

CONCLUSIONES

El estudio de invernaderos ha sido extendido ampliamente bajo simulación CFD con el objeto de describir el flujo y temperatura interno. Este estudio analizó el efecto del cultivo a través de una geometría realista basada en cuatro escenarios de carga de cultivo. Inicialmente, las condiciones de frontera provinieron de una simulación que involucró las condiciones ambientes y el efecto de vecindad de otros invernaderos. Este punto favoreció la precisión en los datos aplicados a la simulación en estado estable para esta fase de la investigación. Posteriormente, una prueba de independencia de malla obtuvo un parámetro GCI de 0.01% para la malla fina, lo cual sugiere el uso de la malla intermedia. Como parte central, el escenario con carga completa de cultivo fue validado experimentalmente con RDCM de 5.2 y con mayor alejamiento en los nodos cercanos al frente del invernadero. Así, los cuatro escenarios fueron analizados con cuatro modelos de turbulencia para indicar su diferencia numérica. La uniformidad térmica cuantificó esta comparación, donde el modelo de turbulencia κ - ω logró la mayor uniformidad. Este resultado fue comparado con el comportamiento hidrodinámico interno que demostró una generación de flujos fluctuantes intensos a causa de zonas sin cultivo con reducción de la

uniformidad térmica. Por lo cual, la estrategia CFD demostró que modelos de la familia κ - ω predicen con mejor aceptación el efecto de la obstrucción por los cultivos, y que la uniformidad térmica es mayor evitando zonas vacías dentro de los invernaderos. Esta observación puede extenderse a invernaderos de mayor tamaño con limitaciones en la homogeneidad y problemas de ventilación.

NOMENCLATURA

a	coeficiente de absorción
C	coeficiente de función de fase lineal anisotrópico
C_{jkl}	tensor de transporte de turbulencia
F	funciones de parámetros de turbulencia
h_0	altura de referencia para condiciones del ambiente
K	identificador de los puntos en distintos plantas en dirección z
k	constante de von Kármán
k'	conductividad térmica del medio
n	índice de refracción del medio
q	flux de calor para la ley de Fourier modificada
R_{ij}	tensor de Reynolds
T	temperatura
T_C	temperatura central
T_{CFD}	temperatura de simulación
T_{exp}	temperatura de medición
u	magnitud de velocidad
u_0	velocidad de referencia para condiciones del ambiente
$\bar{u}$	promedio de la magnitud de velocidad
u'	fluctuación de velocidad
u^*	velocidad de fricción sobre la superficie para condiciones del ambiente
y^*	distancia para la cercanía a la superficie
z_0	rugosidad para condiciones del ambiente

Subíndices

i, j, k	índices para las coordenadas espaciales
m	índice de la dirección x para los puntos de medición
n	índice de la dirección y para los puntos de medición

Letras griegas

δ_{jk}	delta de Kronecker
ε	energía de disipación de turbulencia
ϵ_{jk}	tensor de la tasa de disipación de turbulencia
κ	energía cinética de turbulencia
μ_t	viscosidad de turbulencia
Π_{jk}	tensor de la presión por efecto de turbulencia
σ	constante de Stefan-Boltzman
σ_s	coeficiente de dispersión de radiación
ϕ	función de mezcla para el modelo SST
ω	frecuencia de la disipación de turbulencia

Acrónimos

CFD	Dinámica Computacional de Fluidos
GCI	Índice de Convergencia de Malla
RDCM	Raíz cuadrada del Error Cuadrático Medio
RST	Modelo de Transporte de Esfuerzos de Reynolds
SIMPLE	Método Semi-implícito para las Ecuaciones Relacionadas con Presión
SST	Transporte por Esfuerzo Cortante
UT	Uniformidad relativa de temperatura

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por SECIHTI, México.

REFERENCIAS

- Ali, Z., Tucker, P.G. & Shahpar, S. (2017). Optimal mesh topology generation for CFD. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 317, 431-457. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2016.12.001>
- Allali, F.E., Fatnassi, H., Demrati, H., Amarraque, A., Bouharroud, R., Elame, F., et al. (2026). Design and evaluation of climate-adaptive greenhouses for semi-arid regions using CFD model. *Case Studies in Thermal Engineering*, 78, 107648. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2026.107648>
- Amara, H.B., Bouadila, S., Fatnassi, H., Arici, M. & Guizani, A.A. (2021). Climate assessment of greenhouse equipped with south-oriented PV roofs: An experimental and computational fluid dynamics study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 101100. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101100>
- Badji, A., Benseddik, A., Bensaha, H., Boukhelifa, A. & Hasrane, I. (2022). Design, technology, and management of greenhouse: A review. *Journal of Cleaner Production*, 373, 133753. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133753>
- Barth, T.J. & Jespersion, D.C. (1989). *The design and application of upwind schemes on unstructured meshes*, 27th Aerospace Sciences Meeting, AIAA, 366. <https://doi.org/10.2514/6.1989-366>
- Bournet, P.-E. & Boulard, T. (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Computers and Electronics in Agriculture*, 74 (2), 195-217. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.08.007>
- Bournet, P.-E. & Rojano, F. (2022). Advances of Computational Fluid Dynamics (CFD) applications in agricultural building modelling: Research, applications and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 201, 107277. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107277>
- Celik, I., Ghia, U., Roache, P.J., Freitas, C. J., Coleman, H. & Raad, P.A. (2008). Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, 130 (7). <https://doi.org/10.1115/1.2960953>
- Chalill, S.M., Chowdhury, S. & Karthikeyan, R. (2021). Prediction of key crop growth parameters in a commercial greenhouse using cfd simulation and experimental verification in a pilot study. *Agriculture*, 11, 658. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070658>
- Cheng, P. (1964). Two-dimensional radiating gas flow by a moment method. *AIAA Journal*, 2 (9), 1662-1664. <https://doi.org/10.2514/3.2645>
- Dehbi, A., Bouaza, A., Hamou, A., Youssef, B. & Saiter, J.M. (2010). Artificial ageing of tri-layer polyethylene film used as greenhouse cover under the effect of the temperature and the UV-A simultaneously. *Materials & Design*, 31 (2), 864-869. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.047>
- Emekli, N.Y., Büyüktaş, K. & Başçetinçelik, A. (2016). Changes of the light transmittance of the LDPE films during the service life for greenhouse application. *Journal of Building Engineering*, 6, 126-132. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.02.013>
- Fatnassi, H., Bournet, P.E., Boulard, T., Roy, J.C., Molina-Aiz, F.D. & Zaaboul, R. (2023). Use of computational fluid dynamic tools to model the coupling of plant canopy activity and climate in greenhouses and closed plant growth systems: A review. *Biosystems Engineering*, 230, 388-408. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.04.016>

- Gibson, M.M. & Launder, B.E. (1978). Ground effects on pressure fluctuations in the atmospheric boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 86 (3), 491-511. <https://doi.org/10.1017/S0022112078001251>
- Jin, W., Hong, X., Yang, J., Liu, Q., Li, Z., Dingm Q., *et al.* (2025). Development of a high-accuracy temperature sensor for meteorological observations based on computational fluid dynamics and neural networks. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 164, 108801. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108801>
- Kalbasinia, A., Jafari, M., Kouhikamali, R., Sadeghi, M., Nikbakht, A. & Tayefi, A. (2025). Application of computational fluid dynamics (CFD) for optimal temperature sensor placement in a greenhouse equipped with a pad-fan cooling (PFC) system. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101109. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101109>
- Kang, L., Zhang, Y., Kacira, M. & van Hooff, T. (2024). CFD simulation of air distributions in a small multi-layer vertical farm: Impact of computational and physical parameters. *Biosystems Engineering*, 243, 148-174. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.05.004>
- Kichah, A., Bournet, P.-E., Migeon, C. & Boulard, T. (2012). Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse. *Biosystems Engineering*, 112 (1), 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.01.012>
- Launder, B.E., Reece, G.J. & Rodi, W. (1975). Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *J. Fluid Mechanics*, 68 (3), 537-566. <https://doi.org/10.1017/S0022112075001814>
- Launder, B.E. & Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied mechanics and Engineering*, 3, 269-289. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
- Lee, S.-h., Kim, R.-w., Shin, H. & Lee, T.-s. (2026). Dynamic energy modeling of a naturally ventilated greenhouse using TRNSYS-TRNFlow: Part II. Impact of ventilation opening ratios on energy load and uncertainty quantification. *Applied Thermal Engineering*, 129818. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.129818>
- Lin, Y., Patel, R., Cao, J., Tu, W., Zhang, H., *et al.* (2019). Glass-like transparent high strength polyethylene films by tuning drawing temperature. *Polymer*, 171, 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.03.036>
- Liu, R., Bournet, P.-E., Guzmán, J. L., Tingting, Q., Li, M. & Yang, X. (2026). Variation analysis of natural ventilation and air temperature within a greenhouse cluster using a large-scale 3D CFD modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 240, 111220. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111220>
- Lu, J., Li, H., Wang, C., Tian, X., Song, W., Zhao, S., *et al.* (2025). CFD based airflow uniformity optimization of Chinese solar greenhouses with long-row cultivation: Impact of unit layout design. *Case Studies in Thermal Engineering*, 71, 106192. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106192>
- Ma, J., Chai, A., Shi, F., Liu, M., Li, B. & Fan, T. (2026). CFD-guided ventilation design to suppress pathogen spread in a cucumber greenhouse. *Smart Agricultural Technology*, 13, 101859. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.101859>
- Mao, C. & Su, Y. (2024). CFD based heat transfer parameter identification of greenhouse and greenhouse climate prediction method. *Thermal Science and Engineering Progress*, 49, 102462. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102462>
- Menter, F.R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32 (8), 1598-1605. <https://doi.org/10.2514/3.12149>
- Mistriotis, A., de Jong, T., Wagemans, M. & Bot, G.P.A. (1997). The analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural buildings by Computational Fluid Dynamics (CFD). *IFAC Proceedings Volumes*, 30 (5), 289-295. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)44447-8](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)44447-8)

- Modest, M.F. (2013). *Radiative Heat Transfer*, 3rd Ed., Academic Press, Boston, MA.
- Norton, T., Sun, D.-W., Grant, J., Fallon, R. & Dodd, V. (2007). 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. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>
- Qi, D., Wang, H., Zhao, C., Xu, L., Song, B. & Li, A. (2026). Airflow and pressure characteristics of naturally ventilated greenhouses with roof openings. *Applied Thermal Engineering*, 290, 129888. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.129888>
- Richards, P.J. & Hoxey, R.P. (1993). Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46-47, 145-153. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90124-7](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90124-7)
- Rodriguez, S. (2019). *Applied Computational Fluid Dynamics and turbulence modeling*, Springer-Verlag.
- Roy, J.C., Bourland, T., Kittas, C. & Wang, S. (2002). Convective and ventilation transfers in greenhouses, Part 1: the greenhouse considered as a perfectly stirred tank. *Biosystems Engineering*, 83 (1), 1. <https://doi.org/10.1006/bioc.2002.0107>
- Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. & Zhu, J. (1995). A new κ - ϵ eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows- Model development and validation. *Computers Fluids*, 24 (3), 227-238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T)
- Smolka, J. (2013). Genetic algorithm shape optimisation of a natural air circulation heating oven based on an experimentally validated 3-D CFD model. *International Journal of Thermal Sciences*, 71, 128-139. <http://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2013.04.014>
- Song, M., Li, C., Guo, X. & Liu, J. (2025). An adaptive gradient correction method based on mesh skewness for finite volume fluid dynamics simulations. *Physics of Fluids*, 37 (1). <https://doi.org/10.1063/5.0246823>
- Speziale, C.G., Sarkar, S. & Gatski, T.B. (1991). Modelling the pressure-strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach. *Journal of Fluid Mechanics*, 227, 245-272. <https://doi.org/10.1017/S0022112091000101>
- Sun, H., Qi, Z., Zhang, Q., Xu, Z., Zheng, W., Wei, M., et al. (2026). Thermal and ventilation performance of the innovative asymmetrical flexible wall greenhouse for annual usage. *Applied Thermal Engineering*, 289, 129969. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.129969>
- Wilcox, D.C. (1988). Multiscale model for turbulent flows. *AIAA Journal*, 26 (11), 1311-1320. <https://doi.org/10.2514/3.10042>
- Wilcox, D.C. (2006). *Turbulence Modeling for CFD*, DCW Industries Inc.
- Xu, D., Zhu, J. & Ma, Y. (2026). Advances in 3D simulation technology for solar greenhouse systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116387. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116387>
- Xu, F.-y., Lu, H.-f., Chen, Z., Guan, Z.-c., Chen, Y.-w., Shen, G.-w., et al. (2021). Selection of a computational fluid dynamics (CFD) model and its application to greenhouse pad-fan cooling (PFC) systems. *Journal of Cleaner Production*, 302, 127013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127013>
- Yeoh, G.-H. & Tu, J. (2010). *Computational techniques for multi-phase flows*, Butterworth-Heinemann.
- Zghal, O., Ketata, A., Abid, H., Zouari, S., Gugliuzza, G., Mejri, M., et al. (2025). Numerical investigation of CFD parameters: Evaluating height variations on microclimate and crop performance in large-scale soilless greenhouses in northern Tunisia. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2025.02.006>

- Zhang, C., Liu, R., Yang, J., Díaz, F.R. & Li, M. (2025). Assessing the impact of tomato crop row orientation on the microclimate in Chinese solar greenhouses: CFD simulation and numerical analysis. *Biosystems Engineering*, 258, 104247. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104247>
- Zhang, C., Liu, R., Liu, K., Yang, X., Liu, H., *et al.* (2022a). A CFD transient model of leaf wetness duration on greenhouse cucumber leaves. *Computers and Electronics in Agriculture*, 200, 107257. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107257>
- Zhang, Y., Yasutake, D., Hidaka, K., Okayasu, T., Kitano, M., *et al.* (2022b). Crop-localised CO₂ enrichment improves the microclimate, photosynthetic distribution and energy utilisation efficiency in a greenhouse. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133465>