



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

T E S I S

**DESARROLLO DE UN MODELO NUMÉRICO PARA EVALUAR EL AMBIENTE DE
INVERNADEROS DEDICADOS A LA PRODUCCIÓN INTENSIVA DE TOMATE**

que para obtener el grado de
Doctor en
Ciencias y Tecnología del Agua

presenta
Cruz Ernesto Aguilar Rodríguez

Tutor: Dr. Jorge Flores Velázquez
Cotutor: Dr. Fernando Rojano Aguilar

Jiutepec, Morelos

2020

Paseo Cuaunháhuac No. 8532, Col. Progreso, CP. 62550, Jiutepec, Morelos.
Tel: (777) 329 3600 www.gob.mx/imta



2020
ASOCIACIÓN
LEONA VICARIO
BENEMÉRITA MADRE DE LA PATRIA

F.C5.02.44.1



Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

Cruz Ernesto Aguilar Rodríguez

Jiutepec, Morelos, 23 de Noviembre de 2020



DOCTORADO EN CIENCIAS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA

Ante el Jurado integrado por:

Presidente. Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Secretario. Dr. Rodrigo Roblero Hidalgo

Vocal 1 Dr. Jorge Flores Velázquez

Vocal 2 Dr. Mauro Íñiguez Covarrubias

Vocal 3 Dr. Fernando Rojano Aguilar

Tutor de tesis



Dr. Jorge Flores Velázquez

Jiutepec, Morelos

Instituto Mexicano de Tecnología de Agua

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a mi asesor de tesis el Dr. Jorge Flores Velázquez por su inestimable ayuda y apoyo, por darme la oportunidad de llevar a cabo este trabajo de investigación.

A los integrantes de mi comité tutorial: Dr. Fernando Rojano Aguilar, Dr. Waldo Ojeda Bustamante, Dr. Mauro Iñiguez Covarrubias, Dr. Rodrigo Roblero, muchas gracias por cada uno de sus comentarios para mejorar y seguir adelante.

A mis colegas y amigos que encontré durante el transcurso de mi doctorado quienes hicieron más amena mi estancia.

Agradezco al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua que me brindó la oportunidad de seguir cumpliendo mis metas, proporcionándome los medios para seguirme superando.

A mi familia por siempre motivarme y brindarme su paciencia.

A mi nueva familia del estado de Morelos por su comprensión y su apoyo.

Por último, agradezco a mi esposa por siempre apoyarme a culminar mi doctorado. Gracias Xuzan por tu paciencia y motivación a lo largo de este camino.

Resumen

La evaluación del impacto de las variables climáticas en un invernadero ayuda a determinar ciclos de cultivos y también al uso estratégico de insumos. Técnicas experimentales, numéricas y analíticas se han desarrollado para el estudio del ambiente en un invernadero con el propósito de predecir calidad y cantidad de producción agrícola. Este trabajo de investigación analiza y aporta información sobre la función que tiene el clima diurno y nocturno, en conjunto con un análisis espacial en un invernadero. En particular, la temperatura como variable prioritaria del clima es utilizada para definir gradientes térmicos del invernadero, y a partir de allí estimar la duración del ciclo de producción de tomate en función de grados días calor (GDC). También, esta investigación evaluó el efecto que tienen los calefactores eléctricos sobre la homogeneización de temperatura en periodos críticos de baja temperatura para producción de tomate. Adicionalmente, se han estudiado las consecuencias de condiciones de operación de un invernadero en la concentración de vapor de agua e intensidad del infrarrojo cercano (NIR).

El Capítulo 1 presenta el contexto general y los objetivos de este trabajo de investigación. El Capítulo 2 analiza el gradiente térmico del invernadero mediante un modelo numérico con el propósito de estimar los GDC. También en este capítulo aborda el establecimiento de fecha óptima de siembra para el tomate en dos municipios productores de tomate en México: Navolato, Sinaloa municipio con mayor producción durante el 2017 y Texcoco, Estado de México municipio con más cercanía a la mayor demanda del país (Ciudad de México). El Capítulo 3 presenta un modelo numérico de un invernadero en Texcoco para estimar la energía necesaria de calefacción en un ciclo de cultivo y también analiza espacialmente el efecto de la posición y dirección del flujo de aire de los calefactores sobre los gradientes térmicos. El capítulo 4 analiza numéricamente el efecto de la concentración de vapor de agua en el aire y la intensidad del infrarrojo cercano (NIR) en el déficit de presión de vapor (DPV).

Summary

Impact assessment of climate variables in a greenhouse aids to determine production cycles and also for strategically use of supplies. Experimental, numerical, and analytical techniques have been developed to analyze the environment in a greenhouse with the aim to predict quantity and quality of produce. This research analyzes and provides information about the function of day and night climate together with spatial greenhouse climate distribution. In particular, temperature as meaningful climate variable was used to define thermal gradients, and from there estimate duration of tomato production cycle as a function of the Heating degree-day (HDD). Likewise, this research addresses the effect of electric heaters on temperature homogenization during critical periods of low temperature for tomato production. It was also studied consequences of operating conditions of a greenhouse on the concentration of water vapor and the intensity of near-infrared (NIR).

Chapter 1 presents the general context and objectives of this research work. Chapter 2 analyzes the thermal gradient of the greenhouse using a numerical model to estimate HDD. Also this chapter defines the more adequate date to start the tomato production lifecycle in two municipalities of Mexico: Navolato, Sinaloa, a municipality with the largest production in Mexico during 2017 and Texcoco, State of Mexico, a municipality with the closest location to the highest produce demand (Mexico City). Chapter 3 presents a model of a greenhouse in Texcoco estimating the energy needed for heating during a tomato production lifecycle and also analyzes the effect of the position and direction of the heaters airflow on thermal gradients. Chapter 4 numerically analyzes in a greenhouse the effect of water vapor concentration in the air and near-infrared (NIR) intensity on the vapor pressure deficit (VDP).

Contenido

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Agricultura protegida en México.....	1
1.2 Ventilación y uso de equipos de control climático en invernaderos	2
1.3 Requerimientos ambientales del tomate	4
1.4 Dinámica de Fluidos Computacional aplicado a la agricultura protegida.....	7
1.4.1 Ecuaciones fundamentales de CFD	7
1.4.2 Análisis de invernaderos en CFD	9
1.5 Objetivos de la investigación.....	10
1.5.1 Objetivo General.....	10
1.5.2 Objetivos Específicos	10
1.6 Esquema de tesis.....	11
1.7 Literatura citada.....	12
2 ESTIMACIÓN DEL CICLO DE CULTIVO DE TOMATE (<i>SOLANUM</i> <i>LYCOPERSICUM L.</i>) EN INVERNADERO, CON BASE EN GRADOS DÍAS CALOR (GDC) SIMULADOS CON CFD	17
2.1 Resumen	17
2.2 Introducción.....	18
2.3 Materiales y métodos.....	20
2.3.1 Sitio experimental.....	20
2.3.2 Modelo computacional	21
2.3.3 Evaluación del modelo computacional.....	22
2.3.4 Escenarios de simulación.....	23
2.3.5 Cálculo de GDC y GDE en el invernadero	24
2.4 Resultados y discusión	24
2.5 Conclusiones.....	32
2.6 Referencias	33
3 VALORACIÓN DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DE UN INVERNADERO CON CALENTADOR ELÉCTRICO MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS.....	37
3.1 Resumen	37
3.2 Introducción.....	38
3.3 Materiales y Métodos	41
3.3.1 Descripción del sitio experimental	41

3.3.2 Cálculo de climatización	43
3.3.3 Modelo computacional	45
3.3.4 Evaluación del modelo computacional.....	47
3.3.5 Escenarios de simulación.....	47
3.4 Resultados.....	48
3.4.1 Consumo de energía	48
3.4.2 Análisis de sensibilidad de malla del modelo computacional	50
3.4.3 Validación.....	50
3.4.4 Análisis ambiental de los modelos evaluados	51
3.4.5 Distribución espacial de temperatura de los escenarios de simulación	53
3.5 Conclusiones.....	57
3.6 Referencias	58
4 IMPACTO AGRONÓMICO DEL VAPOR DE AGUA E INFRARROJO CERCANO SOBRE LA EFICIENCIA AMBIENTAL DEL INVERNADERO	64
4.1 Resumen	64
4.2 Introducción.....	65
4.3 Metodología y materiales	68
4.3.1 Descripción del sitio experimental	68
4.3.2 Modelo computacional	70
4.3.3 Ecuaciones fundamentales del flujo modelado	71
4.3.4 Ecuación de modelación radioactiva	72
4.3.5 Evaluación del modelo computacional.....	73
4.3.6 Escenarios de simulación.....	73
4.4 Resultados.....	74
4.4.1 Evaluación del modelo	74
4.4.2 Análisis de resultados de escenarios simulados	75
4.5 Conclusiones.....	82
4.6 Referencias	82
5 CONCLUSIONES GENERALES	89
6 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS	91

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Agricultura protegida en México

Los factores que condicionan la producción agrícola están determinados por el ambiente, suelo y agua (Reséndez, Durón, & González, 2011). Una manera de regular el factor ambiental es por medio de la agricultura protegida (AP). Los invernaderos son un sistema de producción diseñado bajo diversas estructuras para proteger el cultivo al minimizar los efectos que imponen los fenómenos ambientales externos. Sin embargo, los grandes costos de construcción, operación y el bajo nivel de aprendizaje de los productores son factores que inciden en su uso extensivo. Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de México (SIAP) 2017 existen 25814 unidades de producción de AP, de las cuales 65% son invernaderos, 10% macrotúneles, 10% microtúnel y 15% son casa sombra, techo sombra o pabellón, siendo la superficie bajo invernadero la más representativa.

En México la vulnerabilidad de la producción agrícola a extremos ambientales es significativa, dado que una vasta parte del territorio es semiárido (poca precipitación la mayor parte del año). Los cambios en la temporada de lluvias pueden resultar en amenaza de sequía y frecuentemente en desastres para sectores dependientes del agua (Hernández, Torres, & Valdez, 2000). Una manera de reducir los efectos climáticos es mediante la producción bajo invernadero ocasionando que el agricultor tenga mejor control de las variables ambientales internas (Kim *et al.*, 2008; Majdoubi, Boulard, Fatnassi, & Bouirden, 2009; Flores, Mejía, Montero, & Rojano, 2011; Flores, Lorenzo, Mejía, & Montero, 2014).

Los invernaderos de baja y media tecnología representan la mayor superficie de invernaderos en México y son los que manifiestan mayor dependencia de los cambios ambientales exteriores, provocando un incremento del consumo energético para el control de humedad y temperatura. Los invernaderos de baja tecnología al ser 100% dependientes del ambiente exterior requieren mayor cuidado por parte de los productores para mantener un ambiente idóneo para el cultivo presente. Este tipo de invernaderos tienen como función principal mitigar los factores ambientales externos (i.e. lluvias, vientos, cambios rápidos de

temperatura). Los invernaderos de media tecnología son estructuras de mayor resistencia, semi-climatizados con cierta dependencia al ambiente exterior, pero que requieren apoyo por parte de los productores para el manejo de ventanas laterales y cenitales.

1.2 Ventilación y uso de equipos de control climático en invernaderos

En el control de la temperatura de los invernaderos de baja y media tecnología, la ventilación natural es uno de los factores de estudio más importantes. El incremento en la tasa de ventilación depende de la velocidad del viento exterior y del efecto de las fuerzas térmicas flotantes. Las desventajas ocasionadas por la dependencia de la ventilación natural en un invernadero ocurren cuando se tienen temperaturas por encima o debajo del umbral térmico del cultivo.

La ventilación mecánica de un invernadero requiere de una entrada de aire, ventiladores situados preferentemente en la parte de sotavento y electricidad para poder operar. Cuando se tiene instalado un diseño apropiado del invernadero para el lugar establecido, la ventilación mecánica será suficiente para proveer un enfriamiento necesario para atenuar los gradientes térmicos en el interior del invernadero. Y de esta forma, temperaturas por encima del umbral térmico pueden ser mitigadas.

Existen estudios que coadyuvan a la comprensión de los fenómenos presentes en el invernadero, concluyendo que la tasa de ventilación tiene un papel importante en el ambiente del invernadero (Lee & Short, 2000). El tamaño del invernadero, el tipo de ventana, el área de ventilación, la localización y la malla anti-insectos son los factores más importantes que afectan la renovación de aire en el invernadero y en consecuencia la distribución de temperaturas (Molina-Aiz, Valera, Gil, & Peña, 2005; Baeza, Pérez-Parra, & Montero, 2005; Romero-Gómez, 2005; Romero-Gómez *et al.*, 2008; Romero-Gómez, *et al.*, 2010; Chu, Lan, Tasi, Wu y Yang 2017; Tong, Christopher, & Zhang, 2018).

En las últimas décadas se ha demostrado que altos índices en la tasa de ventilación dentro del invernadero no siempre son los mejores métodos para reducir la temperatura, debido a que

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

un incremento potencial en la tasa de ventilación aumenta el nivel de transpiración de las plantas (Sapounas, Nikita, Bartzanas, & Kittas, 2007). Para homogenizar la temperatura del invernadero se ha encontrado que una adecuada configuración de las ventanas puede contribuir a generar un ambiente homogéneo (Tadj, Bartzanas, Fidaros, Draoui, & Kittas, 2010; Zeroual, Bougoul, & Benmoussa, 2018).

Además de la ventilación natural y mecánica, existen diferentes tipos de acciones para el control de temperaturas en el invernadero como son:

- Enfriadores
- Calefactores
- Sistemas de riego
- Control de insolación y radiación solar

El uso de enfriadores y calefactores no son utilizados frecuentemente en México, debido al alto costo que representa su consumo energético. Sin embargo, estos sistemas son requeridos cuando se desea tener un mayor control ambiental e incrementar la cantidad y calidad de la producción en el invernadero. Los equipos auxiliares más utilizados en México son: el sistema de niebla, el calefactor de resistencia eléctrica y las tuberías de agua caliente. En cuanto a los sistemas de calefacción, el sistema de tuberías de agua caliente es más eficiente para homogenizar la temperatura en el invernadero, dado que este sistema se sitúa en forma de red a lo largo del invernadero. Para el enfriamiento en zonas desérticas, la refrigeración por evaporación es la manera más eficiente de reducir la temperatura y aumentar la humedad dentro del invernadero (Predigones *et al.*, 2008).

Los calefactores eléctricos utilizan resistencias para calentar el aire que entra en el calefactor, el calefactor cuenta con un ventilador acoplado cuya finalidad es distribuir el aire caliente mediante convección forzada en todo el invernadero. Las principales desventajas de este tipo

de calefactores es su gran consumo de energía eléctrica y su distribución, dado que es necesario mantener una temperatura uniforme en todo el invernadero.

En la actualidad el uso de sistemas de calefacción convencionales (combustibles fósiles) han ido disminuyendo derivado de la lucha contra el cambio climático. A sí mismo, han generado un cambio a sistemas de calefacción con fuentes de energías renovables, reduciendo los gases de efecto invernadero y otros contaminantes que contribuyen al cambio climático. Las principales fuentes de energía alterna usadas para calentar el aire al interior del invernadero son: la biomasa, solar y geotérmicas (Zhang, Jiachen, Tang, & Jianguo, 2015; Gourdo *et al.*, 2018), mismas que pueden ser utilizadas para generar la electricidad usada por los calefactores eléctricos.

1.3 Requerimientos ambientales del tomate

El tomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) es uno de los cultivos más importante en el mundo (Gad & Hassan, 2013; Mehdizad *et al.*, 2013) y el segundo en superficie cultivada después de la papa.

El tomate para un óptimo desarrollo requiere de:

Precipitación

- ✓ 460 mm de agua por ciclo vegetativo (Baradas, 1994).
- ✓ 400-600 mm de agua por periodo vegetativo, considerando una evapotranspiración máxima de 5 a 6 mm/día (Doorenbos & Kassam, 1979).
- ✓ En caso de cultivarse bajo temporal 600 mm se consideran suficientes (Benacchio, 1982).

Humedad ambiental

- ✓ Un rango favorable es de 50 a 60% (Huerres & Caraballo, 1988).

- ✓ Óptima de 65 a 70% (Corpeño, 2004).

Temperatura

- Guenkov, 1974:
 - ✓ El rango se sitúa entre 15 y 29 °C.
- Huerres y Caraballo, 1988:
 - ✓ Existe una disminución del crecimiento con temperaturas inferiores a 10 °C.
 - ✓ La floración se detiene con temperaturas por debajo de los 13 °C.
 - ✓ La temperatura óptima para la floración está entre los 15 y 18 °C.
 - ✓ Temperaturas entre 22-30 °C durante la noche reducen la formación de flores.
 - ✓ El licopeno comienza a destruirse por arriba de los 30 °C.
 - ✓ La temperatura del suelo debe de estar entre 25 y 30 °C para un óptimo desarrollo de la actividad fotosintética.
- Benacchio, 1982:
 - ✓ El rango de temperaturas está entre 10-35 °C.
 - ✓ El óptimo para la fotosíntesis es de 25-30 °C.
 - ✓ La media óptima se encuentra entre 21-24 °C durante el día y 15-20 °C durante la noche.
 - ✓ La mínima no debe de ser menor de 12 °C.
 - ✓ Temperaturas inferiores a 21 °C durante el día reducen la floración.

- ✓ Para la maduración, la temperatura diurna se debe de situar entre 23-27 °C y para la noche debe de ser inferior a 20 °C.
- ✓ La oscilación térmica diaria debería de ser de 9-11 °C.
- Baradas, 1994:
 - ✓ La temperatura de germinación de la semilla está entre 26-32 °C.
 - ✓ Para el crecimiento de la plántula la temperatura se sitúa entre 25-26 °C.
 - ✓ Para la germinación del polen y crecimiento del tubo polínico 22-27 °C.
 - ✓ 18-20 °C para formación de fruto.
 - ✓ Para la maduración del fruto 24-28 °C.
- Ibar y Juscafresa, 1987:
 - ✓ Óptimo de temperatura mensual 24-28 °C.
 - ✓ El desarrollo se detiene 10-12 °C.
 - ✓ La planta se hiela -2 °C.

Luz

- ✓ Escasez produce debilitamiento y hace más susceptible a enfermedades al tomate (Huerres & Caraballo, 1988).
- ✓ Durante altas intensidades luminosas se registra el más alto contenido de ácido ascórbico (Benacchio, 1982).

1.4 Dinámica de Fluidos Computacional aplicado a la agricultura protegida

El uso de modelos numéricos ha permitido evaluar condiciones climáticas requeridas por el cultivo para mejorar la cantidad y calidad de la producción en invernaderos durante las últimas décadas. El uso de herramientas de predicción ambiental ha ido en incremento. Una de ellas es la Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) porque permite analizar el ambiente al interior del invernadero. Los programas comerciales de CFD son diseñados con una plataforma amigable para el usuario, facilitando su manejo y comprensión de los resultados.

1.4.1 Ecuaciones fundamentales de CFD

Ecuación de transporte

La ecuación de transporte clásica que representa la masa, velocidad, temperatura y vapor de agua está regida por la ecuación 1.1.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + s_\phi \quad (1.1)$$

Donde u_j es la componente de velocidad en las tres direcciones (m s^{-1}), Γ_ϕ componente de difusión de la variable ϕ , s_ϕ término fuente.

El modelo de turbulencia estándar $k - \varepsilon$, establece las ecuaciones 1.2, 1.3, 1.4 y 1.5 sobre las ecuaciones de transporte para cada derivada física en función del término fuente.

Continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1.2)$$

Momentum

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

$$\frac{\partial(\overline{\rho u_i})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_j u_i}) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\sigma_{ij}}) + \overline{\rho \sigma_i} - \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i' u_j'}) + s_m \quad (1.3)$$

Energía cinética turbulenta

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_j k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \mu_t s^2 - \rho \varepsilon + s_k \quad (1.4)$$

Disipación de la energía cinética turbulenta

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_j \varepsilon}) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_{1\varepsilon} \frac{\mu_t}{\sigma_k} \left(\mu_t s^2 - c_{3\varepsilon} g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) - c_{2\varepsilon} \varepsilon^2 + s_\varepsilon \end{aligned} \quad (1.5)$$

El espectro de radiación de un medio transparente se resuelve mediante la ecuación de transferencia radioactiva (RTE) que presenta un balance de un haz de luz (Modest *et al.*, 1993). El modelo de ordenadas discretas (DO) resuelve la ecuación RTE para un número finito de ángulos, cada uno asociado a una dirección vectorial \vec{s} en el sistema cartesiano (x , y , z). El modelo de banda no gris se acopla al modelo DO permitiendo dividir el espectro de radiación en n bandas de longitud de onda, quedando de la siguiente manera (Ecuación 1.6):

$$\nabla \cdot (I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s}) + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}^l) \phi(\vec{s}, \vec{s}^l) d\Omega \quad (1.6)$$

Donde \vec{r} es la posición del vector, $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$ es la intensidad espectral de RTE, \vec{s}^l dirección del vector de dispersión y σ constante de Stefan Boltzmann ($0.000567 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), n índice de refracción, ϕ función fase y Ω ángulo sólido (rad).

El modelo de especies de la distribución de la humedad en el invernadero resuelve el transporte de especies según la ecuación 1.7.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho u Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + s_i \quad (1.7)$$

Donde Y_i es la fracción de masa local de cada especie (kg m^{-3}), R_i la tasa neta de producción de la especie ($\text{mol m}^{-3} \text{s}^{-1}$), s_i tasa de creación por adición de la fase dispersa más cualquier fuente definida por el usuario (kg S^{-1}).

1.4.2 Análisis de invernaderos en CFD

Los avances tecnológicos han permitido mediante técnicas o herramientas numéricas simular o predecir los comportamientos físicos presentes en el invernadero. Resultando útil estudiar las propiedades de cubierta en el invernadero durante el periodo nocturno, y destacando que se puede generar una ganancia de 4 °C con el uso de cubiertas de baja emisividad y transmisividad (Piscia, Montero, Bailey, Muñoz, & Oliva, 2013).

El CFD además ha permitido simular el proceso de condensación nocturna debido a las condiciones de sensibilidad ambientales de calefacción y propiedades de cubierta, demostrando que la humedad y la temperatura son los factores que más impacto tienen dentro del invernadero (Bouhoun, Bournet Danjou, Morille, & Migeon, 2014). Así mismo, el CFD ha sido utilizado para estimar el efecto convectivo que tiene la variación de temperatura del cielo, destacando que el coeficiente de convectivo depende de la tasa de ventilación y no de la variación de temperatura del cielo (Piscia, Muñoz, Panades, & Montero, 2015).

En los últimos años se ha enfatizado sobre la utilidad de CFD para obtener a detalle la comprensión de los fenómenos de transpiración, absorción de radiación por el cultivo y los detalles de distribución de humedad dentro y alrededor del cultivo (Farber *et al.*, 2017). CFD ha sido utilizado como herramienta para estudiar la interacción cultivo-ambiente de un invernadero, simulando mediante ecuaciones definidas por el usuario (UDFs) el proceso fotosintético y el efecto que tiene la estratificación térmica del aire sobre el cultivo (Boulard, Roy, Pouillard, Fatnassi, & Grisey, 2017). De igual forma, las UDFs han sido utilizadas para estimar las consecuencias de cultivar bajo restricciones hídricas y ambientales, destacando la secuela en la transpiración del cultivo (Bouhoun, Bournet, Cannavo, & Chantoiseau, 2017).

La correlación entre los resultados de las simulaciones y los modelos experimentales ha ocasionado un incremento en el uso de herramientas numéricas para identificar mayor eficiencia energética del invernadero mediante la modificación de su diseño o el material de cubierta (Mesmoudi, Meguallati, & Bournet, 2017). Con el uso de herramientas numéricas es posible buscar alternativas para optimizar la tasa de renovación de aire de los invernaderos, adaptándolos a las condiciones ambientales de la región donde se desea construir (Cemek, Atis, & Küçüktopçu, 2017).

Los resultados de los modelos numéricos destacan que las longitudes superiores a seis veces la altura del invernadero presentan problemas en la tasa de ventilación derivado de la obstrucción generada por la vegetación, la malla anti-insectos y la longitud del invernadero. Por lo cual, es importante considerar estas variables para la construcción de un invernadero con ventilación natural (Chu *et al.*, 2017; Tong *et al.*, 2018).

Una correcta selección del material de cubierta puede mejorar considerablemente las condiciones ambientales tal y como lo mencionan Subin, Lourence, Karthikeyan y Periasamy (2018), en donde por medio de CFD destacaron que es posible incrementar la energía interior de un invernadero durante el periodo nocturno. Sin embargo, estos materiales tienen ciertas limitaciones, siendo recomendable buscar la solución de manera local (He *et al.*, 2018).

1.5 Objetivos de la investigación

1.5.1 Objetivo General

Modelación de las condiciones ambientales en un invernadero mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

1.5.2 Objetivos Específicos

- Analizar el comportamiento térmico de un invernadero bajo condiciones climáticas de Navolato, Sinaloa, y Texcoco, Estado de México mediante el cálculo de grados días calor y CFD.

- Estimar el consumo de energía y distribución de temperatura en un invernadero con calefacción eléctrica bajo condiciones invernales del centro de México, utilizando un modelo de balance de energía y CFD.
- Estudiar el efecto de la concentración de fracción de masa de vapor de agua y el infrarrojo cercano (NIR) en el déficit de presión de vapor (VPD).

1.6 Esquema de tesis

El núcleo de tesis está distribuido en tres capítulos. **Capítulo 2** Estimación espacial de temperatura y duración del ciclo de cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) en invernadero con base en Grados Días Calor (GDC) simulados con un modelo desarrollado en CFD. Este modelo CFD permite establecer la duración del ciclo del cultivo de tomate en el invernadero mediante el análisis espacial de temperatura. Después de evaluar el modelo CFD fueron utilizados datos de estaciones meteorológicas de dos municipios que cuentan con diferencias ambientales. La temperatura media mensual obtenida de las estaciones meteorológicas fue empleada como condición inicial de frontera del modelo CFD. Los resultados de las simulaciones fueron usados para estimar los grados días calor (GDC), establecer la duración del ciclo del cultivo de tomate en el invernadero y proponer la fecha óptima de siembra. **Capítulo 3** Valoración del rendimiento energético de un invernadero mediante un modelo en CFD. El modelo de balance y energía fue usado para estimar el consumo de energía necesario para mantener una temperatura de 12 °C al interior del invernadero en Texcoco, Estado de México y el modelo en CFD para predecir la distribución térmica bajo diferentes condiciones de calentamiento. Después de evaluar el modelo CFD fue modificada la posición y la dirección del flujo de calor del calefactor para estimar el efecto que tiene en la distribución de temperatura a 2 m del suelo. **Capítulo 4** Efecto de la concentración de vapor de agua e intensidad del NIR sobre el ambiente al interior del invernadero. El modelo de ordenadas discretas (DO) fue acoplado al modelo de banda no gris para simular la longitud de onda del NIR y estimar el efecto térmico que tiene derivado de la concentración y distribución de HR en el aire dentro del invernadero, resaltando la gestión ambiental para mantener condiciones idóneas para cultivar tomate.

1.7 Literatura citada

Baeza, E. J., Perez-Parra, J., & Montero J. I. (2005). Effect of ventilator size on natural ventilation in parral greenhouse by means of CDF simulations. *Acta Hort. (ISHS)*, 691, 465-472.

Baradas, M. W. (1994). *Crop requirements of tropical crops*. In: Handbook of agricultural meteorology. J.F. Griffiths Editor. Oxford Univ. Press. New York, 189-202.

Benacchio, S. S. (1982). *Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivo con potencial de producción en el Trópico Americano*. FONAIAP-Centro Nal. de Inv. Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Cría. Maracay, Venezuela, 202.

Boulard, T., Roy, J. C., Pouillard, J. B., Fatnassi, H. & Grisey, A. (2017). Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 158, 110–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.001>

Bouhoun Ali, H., Bournet, P. E., Cannavo, P., & Chantoiseau, E. (2017). Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 26-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.021>

Bouhoun Ali, H., Bournet, P. E., Danjou, V., Morille, B., & Migeon, C. (2014). CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: Sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties. *Biosystems Engineering*, 127(0), 159–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.08.017>

Cemek, B., Atiş, A., & Küçüktopçu, E. (2017). Evaluation of temperature distribution in different greenhouse models using computational fluid dynamics (CFD). *Anadolu Journal of Agricultural Sciences*, 32(1), 54–54. DOI: <https://doi.org/10.7161/omuanajas.289354>

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Chu, C. R., Lan, T. W., Tasi, R. K., Wu, T. R., & Yang, C. K. (2017). Wind-driven natural ventilation of greenhouses with vegetation. *Biosystems Engineering*, 164, 221–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.008>

Corpeño, B. (2004). *Manual del cultivo de tomate. Centro de Inversión, Desarrollo y Exportación de Agronegocios*. San Salvador, El Salvador, 38.

Doorenbos, J., & Kassam, A. H. (1979). *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos*. Estudio FAO: Riego y Drenaje No. 33. FAO. Roma, 212.

Farber, K., Peter F., Jens G., Sebastian K., & Peer U. (2017). A numerical study of a greenhouse CFD simulation including radiation heat transfer and transpiration. *International Journal of Engineering Systems Modelling and Simulation*, 9(3), 161. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJESMS.2017.085055>

Flores-Velázquez, J., Mejía, E., Montero, J. I., & Rojano, A. (2011). Numerical analysis of the inner climate inamechanically-ventilated greenhouse with three spans. *Agrociencia*, 45, 545-560.

Flores-Velázquez, J., López-Cruz, I., Mejía-Sáenz, E., & Montero-Camacho, J. I. (2014). Evaluación del desempeño climático de un invernadero baticenital del centro de México mediante dinámica de fluidos computacional (CFD). *Agrociencia*, 48(2), 131-146.

Gad, N., & Hassan, N. M. K. (2013). Role of cobalt and organic fertilizers amendments on tomato production in the newly reclaimed soil. *World App. Sci. J.* 22, 1527-1533.

Guenkov, G. (1974). *Fundamentos de horticultura cubana*. Instituto Cubano del Libro. La Habana, Cuba.

Gourdo, L., Bazgaou, A., Ezzaeri, K., Tiskatine, R., Wifaya, A., Demrati, H., Aharoune, A., & Bouirden, L. (2018a). Heating of an agricultural greenhouse by a reservoir filled with rocks. *J. Mater. Environ. Sci.*, 9, 1193–1199, DOI: <https://doi.org/10.26872/jmes.2017.9.4.131>

He, X., Wang, J., Guo, S., Zhang, J., Wei, B., Sun, J., & Shu, S. (2018). Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 16–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.10.001>

Hernández, C. M. E., Torres, T. L. A., & Valdez, M. G. (2000). *Sequía Meteorológica*, En: C. Gay (comp.) México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país, coordinados por el INE con el apoyo del U.S. Country Studies Program, México: INE, SEMARNAP, UNAM, US Country Studies Program, 25-40

Huerres, P. C., & Caraballo, N. (1988). *Horticultura*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, Cuba, 193.

Ibar, A. L., & Juscafresa, B. (1987). *Tomates, pimientos, berenjenas: Cultivo y comercialización*. Editorial AEDOS. Barcelona, España. 153.

Kim, K., Yoon, J. Y., Kwon, H. J., Han, J. H., Eek-Son, J., Nam, S. W., & Lee, I. B. (2008). 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosystems Engineering*, 100(2), 245–255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.03.006>

Lee, I. B., & Short, T. H., (2000). Two-dimensional numerical simulation of natural ventilation in a multi-span greenhouse. *Trans. ASAE*, 43 (3), 745–753.

Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., & Bourden, L. (2009). Airflow and microclimate patterns in a one-hectare canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. *Agr. Forest Meteorol.*, 149, 1050-1062.

Mehdizadeh, M., Darbandi, E. I., Naseri-Rad, H., & Tobeh, H. (2013). Growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) as influenced by different organic fertilizers. *Int. J. Agron. Plant Prod.*, 4, 734-738.

Mesmoudi, K., Meguallati, K., & Bournet, P. E. (2017). Effect of the greenhouse design on the thermal behavior and microclimate distribution in greenhouses installed under semi-arid climate. *Heat Transfer–Asian Res.*, 00,1–18. DOI: <https://doi.org/10.1002/htj.21274>

Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., Gil, J. A., & Peña, A. A. (2005). Optimisation of Almería-type greenhouse ventilation performance with computational fluid dynamics. *Acta Hort. (ISHS)* 691, 433-440.

Perdigones, A., Garcia, J. L., Romero, A., Rodriguez, A., Luna, L. & Raposo, C. (2008). Cooling strategies for greenhouses in summer: control of fogging by pulse width modulation. *Biosyst. Eng.*, 99, 573–586.

Piscia, D., Montero, J. I., Bailey, B., Muñoz, P., & Oliva, A. (2013). A new optimization methodology used to study the effect of cover properties on night-time greenhouse climate. *Biosystems Engineering*, 116(2), 130–143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.07.005>

Piscia, D., Muñoz, P., Panades, C. & Montero, J. I. (2015). A method of coupling CFD and energy balance simulations to study humidity control in unheated greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 129–141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.005>

Reséndez, M., Durón, A., & González, L. (2011). Characteristics of protected agriculture and their environment in Mexico. *Revista Mexicana de Agronegocio*, 12, 763–774. DOI: <https://doi.org/10.22004/ag.econ.114479>

Romero-Gomez. P. M. (2005). Modeling natural ventilation for Mexican greenhouses. Thesis MsC. In Agricultural and Biosystems Engineering. The University of Arizona. Arizona.

Romero-Gómez, P., Choi, C. Y., & López-Cruz, I. L. (2010). Enhancement of the Greenhouse Air Ventilation Rate under Climate Conditions of Central Mexico. *Agrociencia*, 44(1), 1–15.

Romero-Gómez, P., López-Cruz, I. L., & Choi, C. Y. (2008). Analysis of greenhouse natural ventilation under the environmental conditions of central Mexico. *Transactions of the ASABE*, 51(5), 1753-1761.

Sapounas, A., Nikita, C., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2007). Aspects of CFD modeling of fan and pad evaporative cooling system in greenhouses. *International Journal of Ventilation*, 6, 4, 379-388. DOI: <https://doi.org/10.1080/14733315.2008.11683793>

Subin, M. C., Lourence, J. S., Karthikeyan, R., & Periasamy, C. (2018). Analysis of materials used for Greenhouse roof covering -structure using CFD. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 334(1). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/346/1/012068>

Tadj, N., Bartzanas, T., Fidaros, D., Draoui, B. & Kittas, C. (2010). Influence of heating system on greenhouse microclimate distribution. *Trans. ASABE*, 53 (1), 225–238.

Tong, G., Christopher, D. M., & Zhang, G. (2018). New insights on span selection for Chinese solar greenhouses using CFD analyses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 3–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.031>

Zeroual, S., Bougoul, S., & Benmoussa, H. (2018). Effect of Radiative Heat Transfer and Boundary Conditions on the Airflow and Temperature Distribution Inside a Heated Tunnel Greenhouse. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 59, 1008–1014, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894418060068>

Zhang, L., Jiachen, P. X., Tang, M. X., & Jianguo, Z. L. (2015). A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study. *Appl. Energy*, 156, 213–222, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.036>

2 ESTIMACIÓN DEL CICLO DE CULTIVO DE TOMATE (*SOLANUM LYCOPERSICUM L.*) EN INVERNADERO, CON BASE EN GRADOS DÍAS CALOR (GDC) SIMULADOS CON CFD

El contenido de este capítulo se publicó en Tecnología y Ciencias del Agua: Estimación del ciclo de cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum l.*) en invernadero, con base en grados días calor (GDC) simulados con CFD.

Volumen 11, núm. 4, julio-agosto de 2020

DOI: 10.24850/j-tyca-2020-04-02

2.1 Resumen

Los grados días calor (GDC) son un indicador del crecimiento de un cultivo, que puede ser usado para inferir la duración del ciclo del tomate bajo invernadero. Inferir duración del ciclo de cultivo basado en temperatura supone la posibilidad de programar fechas de siembra, gestión de los recursos y establecer mejores prácticas agrícolas. El objetivo de este trabajo consistió en simular el comportamiento térmico de un invernadero usando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), bajo condiciones ambientales de Navolato, Sinaloa, y Texcoco, Estado de México, para estimar la duración del ciclo de tomate en función de los GDC con fines agronómicos. La predicción de temperaturas al interior del invernadero se realizó mediante un modelo numérico basado en CFD. Los resultados de las simulaciones fueron utilizados para cuantificar GDC y estimar la duración del ciclo del tomate con base en su requerimiento de temperatura. Se estimaron en Navolato, Sinaloa, 5 772.01, 6 128.34 y 6 411.93 GDC anuales en la entrada, centro y salida del invernadero, respectivamente. El incremento en la acumulación anual de GDC favorece los ciclos cortos y, en consecuencia, aumenta el número de ciclos por año (más de dos ciclos de tomate). En Texcoco, Estado de México, se estimaron 2 447.94, 2 803.5 y 3 076.09 GDC anuales, en la entrada, centro y salida del invernadero, respectivamente, lo que limita cultivar de manera natural sólo un ciclo. No obstante, si se favorecen las temperaturas del último tercio del invernadero, se estima cultivar aproximadamente dos ciclos.

Palabras clave: distribución espacial de temperaturas, modelo computacional, tomate.

2.2 Introducción

El aumento de la población ha generado un incremento en la demanda de productos agrícolas y en la forma de producir. Tal es el caso de los invernaderos, cuyo propósito es el acondicionamiento ambiental. El análisis del microclima en su interior se convierte en una herramienta de gestión en la toma de decisiones para su manejo, con la finalidad de mantener la temperatura del cultivo dentro de rangos recomendados para su desarrollo (Zeidan, 2005).

Grijalva, Macías y Robles (2011) establecen que la problemática principal que enfrenta el productor de tomate que utiliza invernaderos de bajo nivel tecnológico en Sinaloa, México, es el control de temperaturas ocasionando que un 30 o 40% de su producción no cumpla los requisitos de calidad que el tomate requiere para su exportación. Una alternativa para reducir este porcentaje es concentrar el periodo de producción en los meses donde la temperatura no supere el umbral máximo para el tomate (30 °C), y usar híbridos de éste, mejor adaptados a las condiciones locales de manejo y clima.

El tomate (*Solanum lycopersicum L.*) es la hortaliza que más se cultiva bajo invernadero. La temperatura es uno de los factores más importantes en su desarrollo, existiendo un rango favorable para su crecimiento. Los rangos de temperatura reportados para el tomate oscilan entre 22 a 26 °C durante el día y de 13 a 16 °C por la noche (Tesi, 2001; Castilla, 2004).

La integración diaria de la temperatura ambiental es la forma más representativa de medir el desarrollo del tomate (Trudgill, Honek, Li, & Van-Straaalen, 2005). Una manera de medir la integración, el crecimiento y la duración del ciclo del tomate es por medio de los grados días calor (GDC). Para el cálculo de GDC, los valores usados deben ser locales debido a la variación temporal y espacial de temperatura (Doorenbos & Pruitt, 1977).

Ojeda-Bustamante, Sifuentes-Ibarra, Slack y Carrillo (2004) utilizaron este concepto para estimar a partir de la Ecuación (2.1), los grados días de desarrollo (DGD) en el cultivo de maíz a campo abierto en el norte de Sinaloa, de acuerdo con el valor de temperatura diaria

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

(i), de la variable grado ($^{\circ}D$), y su relación con las temperaturas mínimas y máximas del aire ($T_{c-mín}$ y $T_{c-máx}$).

$$^{\circ}D_i = \bar{T}_i - T_{c-mín} \text{ si } \bar{T}_i < T_{c-máx} \quad (2.1)$$

$$^{\circ}D_i = T_{c-máx} - T_{c-mín} \text{ si } \bar{T}_i \geq T_{c-máx}$$

$$^{\circ}D_i = 0 \text{ si } \bar{T}_i \leq T_{c-mín}$$

Ardila, Gustavo-Fischer y Balaguera-López (2011) estimaron la equivalencia entre los días después del trasplante (DDT) y los GDC de tres híbridos de tomate larga vida: Beverly, Franco y SVR 565 en un invernadero. La investigación se realizó en el municipio de San Antonio Tequendama (Cundinamarca), en la vereda Laguna Grande, Finca La Despensa (4° 38'02, 55" N; 74° 20'07, 57" O). Los resultados mostraron que son necesarios 1 398.5 GDC después del trasplante hasta el periodo de cosecha.

Los grados días pueden ser empleados en la estimación de los días con necesidades de calefacción y refrigeración (GDE) de edificios residenciales, comerciales e industriales, así como en invernaderos (Gelegenis, 2009; Mourshed, 2012; Coskun, Ertürk, Oktay, & Hepbasli, 2014).

En un invernadero, el microclima interior depende, entre otros factores, del ambiente externo, tipo de cultivo y equipos de control climático. La dinámica de fluidos computacional (CFD) es útil en la toma de decisiones, mediante el análisis de procesos físicos para definir el movimiento de los fluidos y la comprensión de los fenómenos ambientales.

CFD puede ser útil cuando se requiere estudiar la distribución térmica en invernaderos sin calefacción. Piscia, Muñoz, Panadès y Montero (2015) demostraron mediante CFD que las temperaturas durante la noche dependen de la tasa de ventilación.

Una de las ventajas de CFD es su capacidad de predecir la distribución de temperatura, concentración de vapor de agua, dióxido de carbono (Boulard, Roy, Pouillard, Fatnassi, & Grisey, 2017) y la interacción que tienen con la planta (Bouhoun-Ali, Bournet, Cannavo, &

Chantoiseau, 2017). Por tal motivo, el uso de modelos computacionales y normales climatológicas puede emplearse para inferir la duración del ciclo del tomate bajo invernadero y como apoyo en factores de manejo para definir fechas de siembra.

El objetivo de este trabajo fue simular el comportamiento térmico de un invernadero usando CFD, bajo condiciones ambientales de Navolato, Sinaloa, y Texcoco, Estado de México, México, para estimar la duración del ciclo de cultivo del tomate en función de los GDC.

2.3 Materiales y métodos

2.3.1 Sitio experimental

El invernadero prototipo es de tipo cenital con tres capillas, cuenta con sistema de ventilación pasiva que consiste en ventanas cenitales y frontales. La estructura está cubierta de polietileno translúcido y malla anti-insecto en las ventanas. La superficie cultivada es de 1 000 m², con tomate sembrado en 20 camas distribuidas en las tres naves.

El sitio del invernadero experimental está localizado en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez, en San Luis Potosí (22° 10'59" N; 100° 56'27" O), a 1 850 msnm. La temperatura media en el municipio oscila de 5 a 29 °C durante el año (Conagua, 2018).

Al interior del invernadero se instalaron cinco sensores Vaisala (HMP50, Woburn, MA, USA), los cuales registraron temperatura y humedad relativa (HR) (Figura 2.1). Los sensores se colocaron a una altura de 2.5 m. Tres de ellos (1, 2 y 3) en el centro de cada capilla. Los sensores 4 y 5 en la capilla central, cerca de la zona de barlovento y sotavento, respectivamente. El registro y almacenamiento de datos se hizo en promedio cada 10 minutos durante junio y julio de 2014, utilizando un almacenador de datos (CR1000, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah). La información almacenada se descargó y procesó en *Excel*, para determinar las condiciones ambientales de entrada del modelo a evaluar.

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

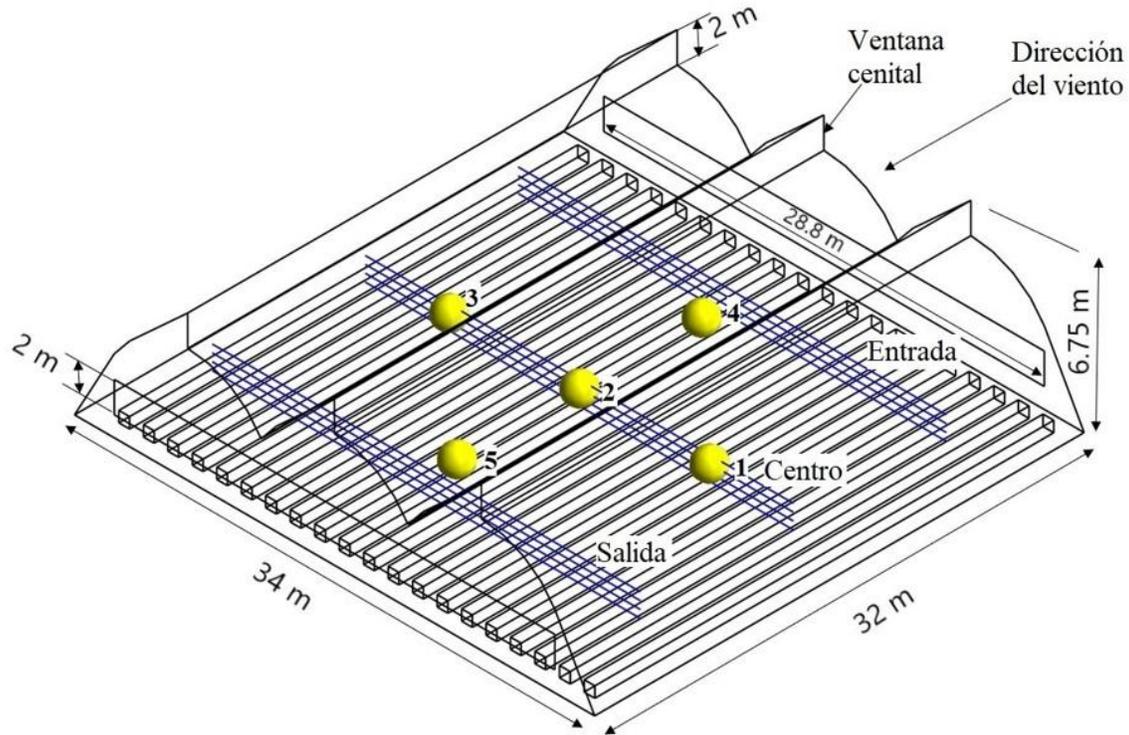


Figura 2.1 Dimensiones, ubicación de los sensores y zonas de análisis de temperaturas en el invernadero.

2.3.2 Modelo computacional

La construcción y simulación del modelo computacional se llevó a cabo en *Ansys Fluent*. La geometría se elaboró en *Ansys Workbench*, mediante la herramienta *Design Modeler*. El mallado se realizó en *Meshing* y cuenta con 416 113 elementos no estructurados, con una calidad ortogonal de 0.75 y una distorsión de 0.23. Las dimensiones del modelo y el número de elementos de la malla se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Dimensiones (m) y número de elementos de la malla.

	Invernadero	Dominio exterior	Zona de cultivo
Dimensiones	34x32x4.75	170x192x22.35	31x30x0.7
Número de elementos	32895	382818	400

En la fase de proceso se definieron las condiciones del modelo (Tabla 2.2) y de las variables aplicadas al flujo de aire dentro del invernadero, para darle solución a las ecuaciones de transporte, discretizadas en ecuaciones algebraicas y calculadas con métodos numéricos.

Tabla 2.2. Condiciones de frontera del modelo computacional.

Condiciones de frontera	Método
Solucionador	Basado en presión
Estado	Estacionario
Modelo de viscosidad	Estándar k-ε (dos ecuaciones)
Ecuación de energía	Activada
Dominio de entrada	Velocidad de entrada
Dominio de salida	Presión de salida
Temperatura del aire	Perfil constante
Velocidad del viento	Perfil constante
Tratamiento de medios porosos	Salto poroso
	Cultivo: zona porosa
Salto poroso	Permeabilidad de la cara
	Espesor del medio poroso
	Coefficiente del salto de presión
Zona porosa	Resistencia inicial
	Porosidad del fluido
Fuente de calor	Constante desde el suelo, hipótesis de Boussinesq
Condición térmica del suelo	Flujo de calor

2.3.3 Evaluación del modelo computacional

Se llevó a cabo un análisis estadístico para la evaluación del modelo CFD entre los datos simulados y experimentales del municipio de Soledad de Graciano Sánchez, en San Luis Potosí. Se consideraron dos intervalos de tiempo de 12:30 a 13:30 p.m. (cálido) y de 4:30 a 5:30 a.m. (frío) en la evaluación, con la finalidad de mejorar la sensibilidad del modelo a cambios de temperatura. El estudio estadístico se hizo por medio de un análisis de varianza (ANOVA) de un factor con un nivel de significancia de 0.05, utilizado para contrastar

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

paramétricamente la diferencia de las temperaturas en el modelo experimental y simulado (Fisher, 1971).

2.3.4 Escenarios de simulación

Una vez evaluado el modelo CFD, se utilizaron normales climatológicas mensuales de la estación meteorológica 25171 de Navolato, Sinaloa (24° 45' 55" N; 107° 42' 06" O), y la estación 154145 del municipio de Texcoco, Estado de México (19° 30' 20" N; 98° 52' 55" O), como condición de frontera inicial para los escenarios simulados (Tabla 2.3). Se seleccionaron estos dos municipios, dado que Navolato es el municipio más representativo del estado, con mayor producción de tomate durante 2017 en México (SIAP, 2018), y Texcoco es un municipio productor de tomate con condiciones climáticas diferentes al municipio de Navolato (Conagua, 2018).

Tabla 2.3. Temperatura y velocidad del viento de los escenarios simulados.

Mes	Navolato, Sinaloa		Texcoco, Estado de México	
	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura (°C)	Velocidad del viento (m/s)
Ene	19.4	3.1	12.5	3.6
Feb	20.2	3.1	14.0	3.9
Mar	21.8	3.1	16.3	4.0
Abr	23.8	3.1	18.0	3.7
May	26.3	3.2	18.9	2.8
Jun	29.6	3.3	18.7	2.5
Jul	30.2	2.7	17.8	2.7
Ago	30.3	2.5	17.8	2.5
Sep	29.8	2.6	17.5	2.6
Oct	28.3	2.7	16.2	2.7
Nov	24.1	3.0	14.4	3.0
Dic	20.1	3.1	12.9	3.3

2.3.5 Cálculo de GDC y GDE en el invernadero

Las temperaturas de los escenarios simulados se emplearon en el cálculo de los GDC (Ecuación 2.2) mediante la fórmula aplicada por Rodríguez y Flórez (2006).

$$GDC = \left(\frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2} \right) - T_{base} \quad (2.2)$$

Donde el término $(T_{m\acute{a}x}-T_{m\acute{i}n})/2$ es la temperatura media mensual registrada al interior del invernadero, y T_{base} es la temperatura donde el proceso metabólico es mínimo, considerado de 10 °C para el tomate (Zotarelli, Scholberg, Dukes, Muñoz-Carpena, & Icerman, 2009).

La duración del ciclo del tomate bajo invernadero se estimó mediante la equivalencia entre los días después del trasplante y la acumulación de GDC, método utilizado por Ardila *et al.* (2011), donde son necesarios 1 398.5 GDC desde el trasplante hasta el inicio de la cosecha.

El cálculo de GDE (Ecuación 2.3) y el número correspondiente de días con necesidades de refrigeración se realizó mediante la relación entre las temperaturas base y media diarias utilizadas por Yildiz y Sosaoglu (2007), acoplándolas a la temperatura umbral del cultivo de tomate (t_b) y a la temperatura en el interior del invernadero (t_d).

$$GDE = T_d - T_b \quad (2.3)$$

Cuando la t_d está por debajo de la temperatura base no hay acumulación de GDE.

La propuesta para la fecha de trasplante se realizó a partir de la predicción y distribución de temperaturas, y la acumulación de GDC y GDE, estableciendo que la temperatura en el invernadero se encuentra entre 10 y 30 °C, y asumiendo que no existen restricciones hídricas ni nutritivas para el tomate.

2.4 Resultados y discusión

La evaluación del modelo se llevó a cabo mediante la correlación de los valores de temperatura registrados por los sensores y obtenidos de la simulación del municipio de

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Soledad de Graciano Sánchez, en San Luis Potosí (Tabla 2.4 y Tabla 2.5). Los resultados de ANOVA con un nivel de significancia de 0.05 mostraron que el valor de F calculado es menor al valor crítico de F para el periodo cálido ($4.71 < 5.31$) y frío ($2.49 < 5.31$), estableciendo que no existen diferencias significativas entre las temperaturas registradas y simuladas para cada condición.

Tabla 2.4. Datos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para el periodo cálido.

Sensor	Experimentales	Simulados
1	25.5	24.9
2	25.7	25.5
3	28.5	25.1
4	26.3	23.9
5	25.7	26.6

Tabla 2.5. Datos de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para el periodo frío.

Sensor	Experimentales	Simulados
1	16.3	17.1
2	16.7	17.7
3	16.6	17.3
4	16.3	16.1
5	16.2	18.8

Con los datos de temperatura registrados durante el mes de julio en el modelo experimental y el resultado de la evaluación de CFD, se calculó y evaluó la acumulación de los GDC mensuales. En el experimento se obtuvo una acumulación mensual de 328.6 GDC; y en la simulación, 367.3 GDC. Mostrando un error porcentual de 11.79% y la correlación entre la temperatura media mensual como condición inicial de frontera para CFD, y la distribución de temperaturas utilizadas para el cálculo de GDC.

Los escenarios simulados de Texcoco mostraron que la temperatura del invernadero osciló entre 12 y 22 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 2, a y b), y en Navolato de 19 a 33 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 2.2, c y d) durante el año. En Navolato, durante el mes de junio (Figura 2.2, d), la temperatura alcanzó valores de

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

30.7 y 32.7 °C cerca de la zona de entrada y salida del invernadero, respectivamente. Este aumento del gradiente térmico se presentó en todos los escenarios debido a la insuficiencia de la ventilación natural para homogenizar la temperatura. Estos resultados muestran correlación con lo obtenido de manera experimental por Baxevanou, Fidaros, Bartzanas y Kittas (2018); Benni, Tassinari, Bonora, Barbaresi y Torreggiani (2016); Cemek, Atiş y Küçüktopçu (2017); Lee, Lee y Kim (2018), y Santolini *et al.* (2018), sugiriendo que las temperaturas más bajas del invernadero se encuentran en la zona de barlovento.

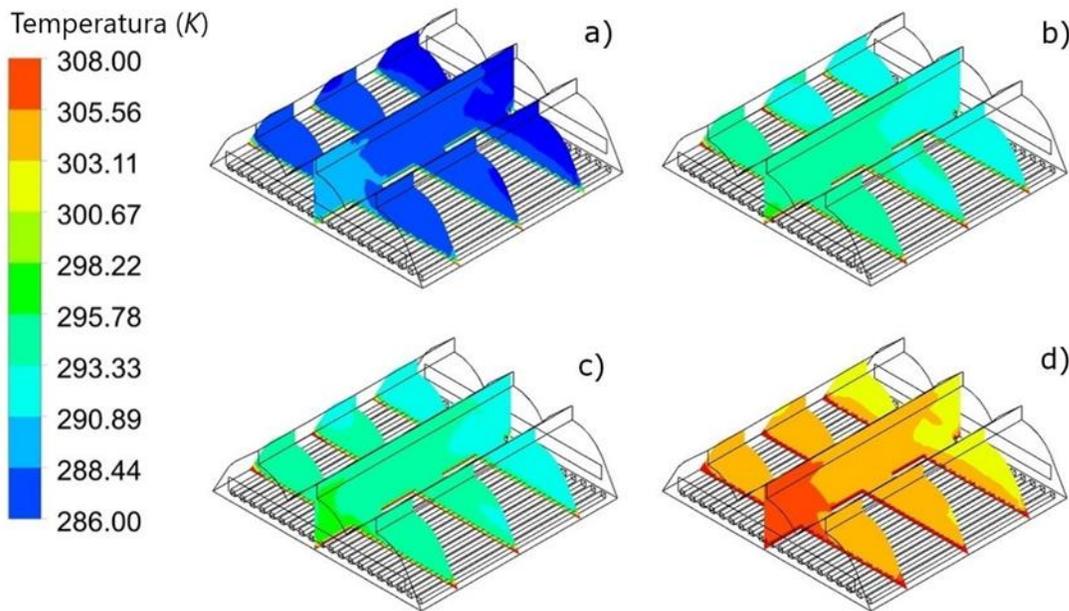


Figura 2.2. Distribución de temperaturas en el invernadero en Texcoco, Estado de México, en los meses de a) enero y b) junio. En Navolato, Sinaloa en c) enero y d) junio.

De junio a octubre, en Navolato, los valores de temperatura simulados superan los 30 °C, siendo necesario un análisis ambiental del invernadero, así como la implementación de equipos auxiliares que coadyuven a atenuar los gradientes térmicos si se desea cultivar durante este periodo.

Debido a que la distribución de los gradientes térmicos en el invernadero no es homogénea (Figura 2.2), se realizó un análisis espacial de temperaturas a 1, 1.5, 2 y 2.5 m del suelo de

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

manera transversal, y a cada 10 m de manera longitudinal. Las primeras líneas se encuentran a 5 m (entrada); las segundas, a 15 m (centro), y las terceras a 25 m (salida) de la zona de barlovento (Figura 2.1).

Los resultados de la Figura 2.3 muestran que existe un gradiente térmico promedio de 1.7 °C de manera longitudinal, además de una variación espacial de temperatura promedio de 0.45 °C a 1 y 2.5 m del piso para la zona de entrada, centro y salida del invernadero. Esta diferencia no es estadísticamente significativa. Por lo cual, se establece una altura de 2 m para el cálculo de GDC.

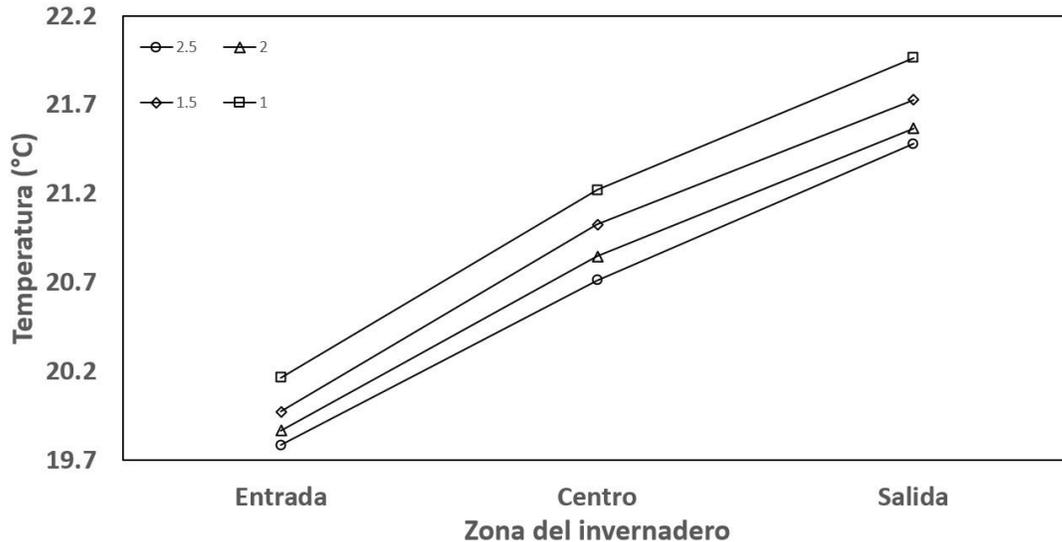


Figura 2.3. Distribución de temperaturas en el invernadero en Navolato, Sinaloa, durante el mes de enero a una altura de 1 m (□), 1.5 m (◇), 2 m (△) y 2.5 m (°).

La acumulación de GDC en el municipio de Texcoco presenta un gradiente del indicador de 20.42% entre la entrada y salida del invernadero (Tabla 2.6). Esta diferencia porcentual significa un ciclo de tomate en la entrada, y dos en el centro y salida, según lo reportado por Ardila *et al.* (2011).

Tabla 2.6. Acumulación mensual de GDC al interior del invernadero en el municipio de Texcoco, Estado de México y Navolato, Sinaloa.

Mes	Texcoco, Estado de México			Navolato, Sinaloa		
	Entrada	Centro	Salida	Entrada	Centro	Salida
Ene	88.9	119.3	136.3	305.9	336.4	358.6
Feb	211.5	269.2	300.2	603.8	661.5	704.1
Mar	417.4	505.3	550.9	984.5	1072.7	1137
Abr	670.3	787.5	849.1	1411.2	1528.8	1613.9
May	959.9	1107.3	1194.4	1930.4	2078.3	2184.5
Jun	1236.7	1413.2	1528.9	2530.9	2708.3	2833.6
Jul	1494.4	1700.9	1844.5	3172.2	3379.6	3531.9
Ago	1752.4	1989.1	2162.6	3816.5	4054	4236.6
Sep	1992.2	2258.1	2459.9	4425.6	4692.3	4903.1
Oct	2198.3	2494.3	2723.4	5007.3	5304.1	5541.7
Nov	2344.0	2669.2	2921.7	5443.5	5769.4	6030.5
Dic	2447.9	2803.5	3076.1	5772	6128.3	6411.9

En Navolato, la acumulación de GDC es mayor que en Texcoco, favoreciendo los ciclos cortos y generando una acumulación de GDC suficiente para cuatro ciclos de tomate al año (Tabla 2.6). Sin embargo, la decisión de cultivar en los meses con temperaturas fuera del umbral (junio a octubre) está condicionada por el incremento del costo de producción, que puede generar el uso de equipos auxiliares para reducir la temperatura (Marín *et al.*, 2016).

Para establecer la propuesta de trasplante fue necesario estimar la acumulación de GDE en el municipio de Navolato. Para ello, se utilizó la metodología planteada por Yildiz et al. (2007) en los meses donde las temperaturas simuladas fueron superiores a 30 °C (junio a octubre). La acumulación de GDE (Figura 2.4) muestra una equivalencia de 122 días con necesidades de refrigeración en la entrada y centro, y 153 en la salida del invernadero. Sin embargo, dado que no es posible establecer un control de temperatura para cada zona, se recomienda que el tiempo de refrigeración se lleve a cabo considerando la acumulación de GDE en la salida.

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

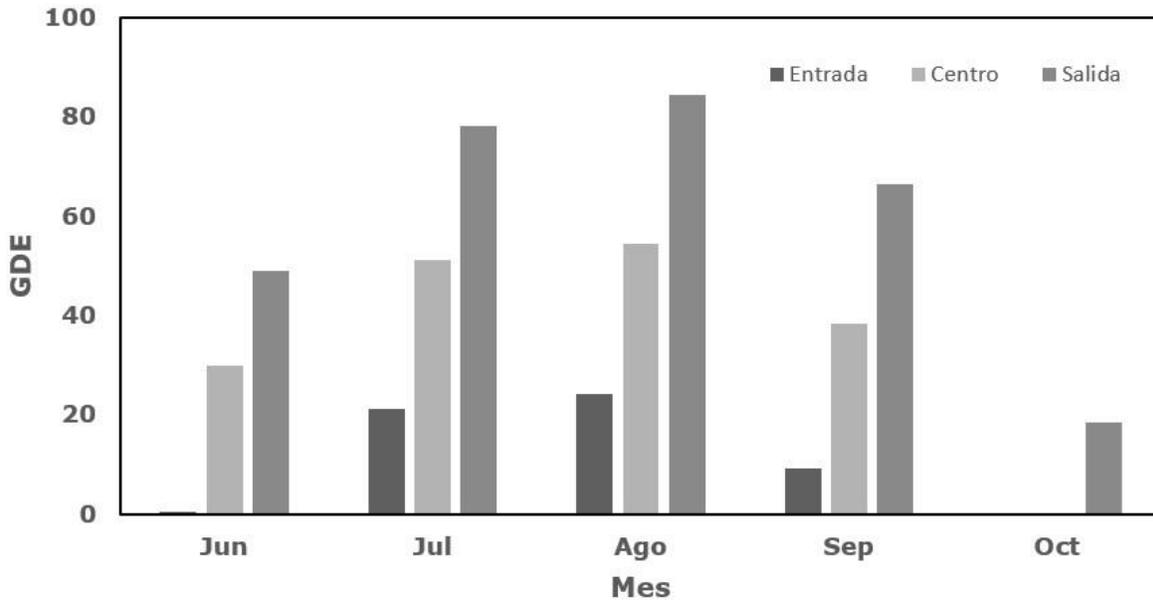


Figura 2.4. Acumulación mensual de GDE al interior del invernadero en el municipio de Navolato, Sinaloa, a temperatura base de 30 °C.

En regiones con inviernos fríos, como en Texcoco, la producción de tomate se da sobre todo durante el periodo primavera-verano, usando el invierno para limpieza del invernadero. Algunos autores recomiendan como inicio de siembra finales de febrero, trasplantando en los últimos días de marzo, con ciertos cuidados durante las primeras y últimas horas del día (Hernández-Leal *et al.*, 2013; Peña-Lomelí, Ponce-Valerio, Sánchez-del-Castillo, & Magaña-Lira, 2014). Aunado a lo anterior, la propuesta de trasplante se realizó considerando la mayor acumulación de GDC y evitando el periodo con necesidades de refrigeración. En el municipio de Texcoco, la acumulación de GDC no permite obtener dos ciclos de tomate en todo el invernadero. Por lo cual, se propuso como fecha para el trasplante el mes de mayo, donde la temperatura media mensual es la más alta del año, incrementando los GDC y evitando las bajas temperaturas durante las primeras y últimas horas del día.

Si el trasplante se realiza el día 1 del mes mayo, se necesitan 165 días en la zona de entrada y 132 en la salida (Tabla 2.7), contando con tiempo suficiente para la cosecha, y evitando problemas que se puedan presentar por las bajas temperaturas nocturnas durante diciembre y enero.

Tabla 2.7. Duración del ciclo del tomate en Texcoco, Estado de México, para la fecha propuesta de trasplante.

Mes	Entrada		Centro		Salida	
	Días	GDC	Días	GDC	Días	GDC
May	31	289.6	31	319.7	31	345.2
Jun	61	566.4	61	625.7	61	679.8
Jul	92	824.1	92	913.5	92	995.4
Ago	123	1082.1	123	1201.6	123	1313.5
Sep	153	1321.9	145	1398.5	132	1398.5
Oct	165	1398.5				

En Navolato (Tabla 2.8), la acumulación de GDC indica que es posible obtener cuatro ciclos de tomate derivado de los ciclos cortos y las temperaturas registradas en el invernadero. Sin embargo, de junio a octubre se presentan en el interior del invernadero gradientes térmicos que afectan el desarrollo e incrementan el riesgo de enfermedades del tomate (Zeidan, 2005). Por tal motivo, se propone como fecha para el trasplante el día 1 del mes de noviembre, siendo necesarios 123 días en barlovento y 106 días en sotavento.

Tabla 2.8. Duración del ciclo del tomate en Navolato, Sinaloa, para la fecha propuesta de trasplante.

Mes	Entrada		Centro		Salida	
	Días	GDC	Días	GDC	Días	GDC
Nov	30	436.2	30	465.4	30	488.8
Dic	61	764.7	61	824.3	61	870.3
Ene	92	1070.7	92	1160.5	92	1228.9
Feb	120	1368.5	113	1398.5	106	1398.5
Mar	123	1398.5				

La fecha propuesta para el trasplante en Navolato concuerda con el periodo de producción de algunas investigaciones previas, tal es el caso de Grijalva y Robles (2003), en donde el periodo de producción abarcó los meses de diciembre a mayo. Núñez, Grijalva, Macias,

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Robles y Ceceña (2012) realizaron el trasplante del tomate tipo bola, variedad Beatrice (Zeraim Gedera®), a principios del mes de octubre, registrando una temperatura promedio diaria al interior del invernadero por debajo de los 30 °C durante el periodo de producción.

Para estudiar el efecto que tiene el tamaño del invernadero en la distribución de temperaturas y la acumulación de GDC, el modelo CFD se extrapoló a un modelo con una longitud de 100 m. Los resultados simulados presentan un gradiente del indicador de hasta 7 °C entre la entrada y salida para ambos municipios (Figura 2.5). Las temperaturas simuladas muestran condiciones favorables en todo el invernadero para el municipio de Texcoco. Sin embargo, para Navolato no ocurre lo mismo, principalmente en la zona de sotavento, donde el incremento de la temperatura es generado por la insuficiencia de la tasa de ventilación para homogenizar el ambiente del invernadero.

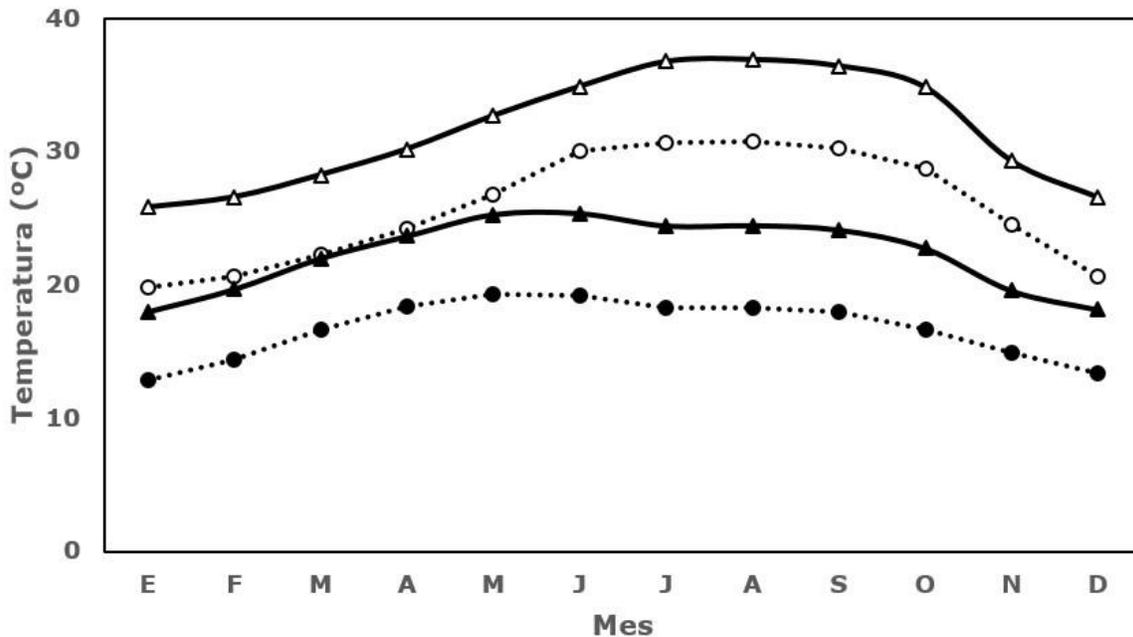


Figura 2.5. Distribución de temperaturas en un invernadero de longitud de 100 m entre la entrada (·●···●·) y salida (-▲-) en Texcoco, Estado de México, y en la entrada (·○···○·) y salida (-Δ-) de Navolato, Sinaloa.

Para Texcoco, la acumulación anual a la salida para un invernadero de 100 m es de 4 492.07 GDC, incrementando el gradiente del indicador hasta un 45.5% entre la entrada y salida, y con una acumulación de GDC suficiente para tres ciclos de cultivo de tomate a la salida. En Navolato, la acumulación anual a la salida es de 7 897.96 GDC, generando un gradiente de 26.9% entre la entrada y salida, con tiempo suficiente para cinco ciclos de cultivo de tomate.

En invernaderos de dimensiones de gran tamaño, como los de 100 m de longitud, el gradiente térmico es proporcional a la longitud, incrementando los GDC. Por lo cual, si se desea cosechar de manera uniforme, es necesario establecer diferentes fechas de trasplante, considerando la acumulación de GDC en cada zona del invernadero. En Texcoco, si se desea cosechar a partir del 12 de octubre, es necesario realizar el trasplante de tomate el 1 de mayo, 16 de junio y 5 de julio en las zonas de entrada, centro y salida, respectivamente. En Navolato, para cosechar el 3 de marzo, el trasplante se tendría que realizar el 1 y 25 de noviembre en la entrada y centro, y el 7 de diciembre en la salida.

2.5 Conclusiones

La acumulación de GDC en invernadero representa el comportamiento térmico espacial y puede usarse para inferir la duración del ciclo del tomate bajo invernadero. Con base en simulaciones en CFD, se visualiza la distribución espacial de los GDC en la zona de cultivo. Los resultados numéricos son un apoyo en factores de manejo, como definir fechas de siembra y cosecha. De las simulaciones realizadas, en Navolato, en un invernadero de 1 000 m², existen temperaturas durante el año que idealmente acumularían GDC hasta para cuatro ciclos de tomate. No obstante, se presentan otras limitantes, como el riesgo de sembrar en los meses de junio a octubre, cuando se registran temperaturas del invernadero por arriba de 30 °C. En Texcoco, por acumulación de GDC, apenas alcanzaría para un ciclo. Se recomienda efectuar el trasplante durante abril y mayo, cuando se registra la mayor temperatura media mensual del año, con tiempo suficiente para completar el ciclo del cultivo de tomate y el periodo de cosecha antes del invierno. Como alternativa económica, si se pretende cosechar en la ventana de máximo valor económico, pueden evaluarse los costos energéticos para completar los GDC.

2.6 Referencias

Ardila, R., Gustavo-Fischer, G., & Balaguera-López, H. E. (2011). Caracterización del crecimiento del fruto y producción de tres híbridos de tomate (*Solanum lycopersicum L.*) en tiempo fisiológico bajo invernadero. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 5(1), 44-56. DOI: <https://doi.org/10.17584/rcch.2011v5i1.1252>

Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2018). Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149(August 2016), 54-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.006>

Benni, S., Tassinari, P., Bonora, F., Barbaresi, A., & Torreggiani, D. (2016). Efficacy of greenhouse natural ventilation: Environmental monitoring and CFD simulations of a study case. *Energy and Buildings*, 125, 276-286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.014>

Bouhoun-Ali, H., Bournet, P. E., Cannavo, P., & Chantoiseau, E. (2017). Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 26-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.021>

Boulard, T., Roy, J. C., Pouillard, J. B., Fatnassi, H., & Grisey, A. (2017). Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 158, 110-133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.001>

Castilla, N. (2004). *Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo* (2a ed.). Madrid, España: Editorial Mundiprensa.

Cemek, B., Atiş, A., & Küçüktopçu, E. (2017). Evaluation of temperature distribution in different greenhouse models using computational fluid dynamics (CFD). *Anadolu Journal of Agricultural Sciences*, 32(1), 54-54. DOI: <https://doi.org/10.7161/omuanajas.289354>

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2018). *Información climatológica*. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=slp>

Coskun, C., Ertürk, M., Oktay, Z., & Hepbasli, A. (2014). A new approach to determine the outdoor temperature distributions for building energy calculations. *Energy Conversion and Management*, 78, 165-172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.052>

Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). *Crop water requirements* (paper 24). Roma, Italia: Food and Agriculture Organization.

Fisher, R. A. (1971). Statistical Methods for Research Workers. *Biometrics*, 27, 1106. DOI: 10.2307/2528855

Gelegenis, J. J. (2009). A simplified quadratic expression for the approximate estimation of heating degree-days to any base temperature. *Applied Energy*, 86(10), 1986-1994.

Grijalva, R. L., & Robles, C. F. (2003). *Avances en la producción de hortalizas en invernadero. Publicación Técnica No. 7* (pp. 14-18). Caborca, México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Centro de Investigaciones Regional del Noroeste, Campo Experimental Caborca.

Grijalva, R. L., Macías, R., & Robles, F. (2011). Behavior of beef tomato hybrids in greenhouse under desertic conditions in the northwest of Sonora. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14(2), 675-682.

Hernández-Leal, E., Lobato-Ortiz, R., García-Zavala, J. J., Reyes-López, D., Méndez-López, A., Bonilla-Barrientos, O., & Hernández-Bautista, A. (2013). Comportamiento agronómico de poblaciones F2 de híbridos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.). *Revista fitotecnia mexicana*, 36(3), 209-215.

Lee, S. Y., Lee, I. B., & Kim R. W. (2018). Evaluation of wind-driven natural ventilation of single-span greenhouses built on reclaimed coastal land. *Biosystems Engineering*, 171, 120-142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.04.015>

Marín, P., Valera, D. L., Molina-Aiz, F. D., López, A., Belmonte, L. J., & Moreno, M. A. (2016). Influencia de diferentes sistemas de calefacción sobre el desarrollo, producción y calidad de un cultivo de tomate en invernadero. *ITEA Información Técnica Económica Agraria*, 112(4), 375-391. DOI: <https://doi.org/10.12706/itea.2016.023>

Mourshed, M. (2012). Relationship between annual mean temperature and degree-days. *Energy and Buildings*, 54, 418-425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.024>

Núñez-Ramírez, F., Grijalva, R. L., Macias, R., Robles, F., & Ceceña, F. (2012). Crecimiento, acumulación y distribución de materia seca en tomate de invernadero. *Biotechnia*, 14(3), 25-31.

Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Slack, D. C., & Carrillo, M. (2004). Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: Application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*, 53(3), 251-261. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.134>

Peña-Lomelí, A., Ponce-Valerio, J. J., Sánchez-del-Castillo, F., & Magaña-Lira, N. (2014). Desempeño agronómico de variedades de tomate de cáscara en invernadero y campo abierto. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(4), 381-391.

Piscia, D., Muñoz, P., Panadès, C., & Montero, J. I. (2015). A method of coupling CFD and energy balance simulations to study humidity control in unheated greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture*, 115, 129-141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.005>

Rodríguez, W., & Flórez, V. (2006). Comportamiento fenológico de tres variedades de rosas rojas en función de la acumulación de la temperatura. *Agronomía Colombiana*. 24(2), 247-257.

Santolini, E., Pulvirenti, B., Benni, S., Barbaresi, L., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2018). Numerical study of wind-driven natural ventilation in a greenhouse with screens. *Computers*

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

and Electronics in Agriculture, 149, 41-53. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.027>

SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2018). *Atlas agroalimentario*. Recuperado de http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2018/Atlas-Agroalimentario-2018

Tesi, R. (2001). *Medios de protección para la hortofloro-fruticultura y el viverismo*. Madrid, España: *Mundi-Prensa*.

Trudgill, D. L., Honek, A., Li, D., & Van-Straalen, N. M. (2005). Thermal time - concepts and utility. *Annals of Applied Biology*, 146(1), 1-14. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.04088.x>

Yildiz, I., & Sosaoglu, B. (2007). Spatial distributions of heating, cooling, and industrial degree-days in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 90(3-4), 249-261. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0281-1>

Zeidan, O. (2005). *Tomato production under protected condition*. Ministry of Agriculture and Rural Development, The Centre for International Agriculture Development, Rishon LeZion, Israel.

Zotarelli, L., Scholberg, J. M., Dukes, M. D., Muñoz-Carpena, R., & Icerman, J. (2009). Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*, 96(1), 23-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.06.007>

3 VALORACIÓN DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DE UN INVERNADERO CON CALENTADOR ELÉCTRICO MEDIANTE SIMULACIONES NUMÉRICAS

El contenido de este capítulo se publicó en *Processes: Valoración del rendimiento energético de un invernadero con calentador eléctrico mediante simulaciones numéricas.*

Volumen 8, núm. 5, Mayo de 2020

DOI: 10.24850/j-tyca-2020-04-02

3.1 Resumen

En México, existen regiones donde la temperatura desciende por debajo del umbral mínimo para el cultivo de tomate (10 °C), lo que requiere la implementación de equipos auxiliares para calentar el aire del invernadero. El objetivo de este trabajo fue estimar el consumo de energía necesario para mantener los requisitos ambientales en el invernadero en Texcoco, Estado de México, mediante un modelo de balance de energía y Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). La predicción de temperaturas se realizó mediante un modelo numérico basado en CFD, proponiendo una evaluación de la posición y dirección del calefactor para estimar su efecto sobre la distribución térmica. Los resultados indicaron que en enero la potencia requerida del calefactor es de 85.56 kW para mantener el invernadero a 12 °C. Además, las simulaciones indicaron que el calentador eléctrico no era suficiente para obtener una temperatura homogénea dentro del invernadero. Para lograr las condiciones térmicas mejor distribuidas, era necesario combinar la dirección y posición de los calefactores. En consecuencia, la dirección del flujo se volvió más importante que la altura del calefactor para homogenizar el área del invernadero, dado que el gradiente térmico se redujo debido a los flujos inversos de calor.

Palabras claves: Calefacción; Estratificación térmica; Impacto energético; CFD.

3.2 Introducción

El crecimiento de las plantas depende en gran medida de la temperatura y humedad. Para la producción invernal, los invernaderos proporcionan mejores condiciones ambientales para el crecimiento de las plantas en comparación con la mayoría de los sistemas de producción agrícola. Dado que un invernadero es una estructura que favorece el ambiente para la producción de cultivos, existen consecuencias tales como que el exceso de calor durante el día es absorbido por el suelo y por la noche se utiliza para satisfacer las necesidades de calefacción en invernaderos cerrados (Fidaros, Baxevanou, Bartzanas, & Kittas, 2010). De esta manera, una de las características de los invernaderos cerrados es el ahorro de energía en comparación de los invernaderos que dependen completamente de la ventilación natural. Sin embargo, la acumulación de energía durante el día puede volverse insuficiente (Roy, Pouillard, Boulard, Fatnassi, & Grisey, 2014) con mayor frecuencia durante el invierno. Por tanto, la temperatura nocturna se convierte en un factor crítico en la eficiencia para cultivar bajo invernadero. La gestión adecuada de la energía del invernadero puede servir para evitar bajas temperaturas nocturnas y reducir los fenómenos de condensación que causa el proceso de goteo en los cultivos (Ali, Bournet, Danjou, Morille, & Migeon, 2014; Salazar-Moreno, Rojano-Aguilar, & López-Cruz, 2014; Salazar-Moreno, Mauricio-Pérez, López-Cruz, & Rojano-Aguilar, 2016; Zeroual, Bougoul, & Benmoussa, 2018).

La solución convencional para los problemas de bajas temperaturas consiste en el uso de sistemas de calefacción dentro del invernadero. Dado que los precios de energía y combustible no son baratos (Tamimi & Kacira, 2013), su uso eficiente impacta directamente en los costos de producción y debe equilibrarse con los riesgos de pérdida de cultivos (Bakker, 1991; Baptista, Bailey, & Meneses, 2012). No obstante, la cantidad de calor agregado al invernadero depende de las condiciones climáticas cambiantes, donde el invierno se convierte en el periodo crítico (Ozgener & Hepbasli, 2005). Investigaciones previas (Ozgener *et al.*, 2005; Couto, Rouboa, Monteiro & Viera, 2012) han encontrado que se debe prestar mayor atención en la noche debido a pérdidas de calor significativas, que se deben compensar mediante una entrada de calor artificial

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Además de los sistemas de calefacción convencionales (combustibles fósiles), existen sistemas alternativos utilizados para calentar el interior del invernadero entre los que destacan los sistemas de fuentes de energías renovables. Estos sistemas permiten el uso de fuentes de energía de biomasa, solares y geotérmicas (Du, Bansal & Huang, 2012; Zhou, Zhao, & Tian, 2012; Tian & Zhao, 2013; Joudi & Farhan, 2014; Zhang, Jiachen, Tang, & Jianguo, 2015; Gourdo *et al.*, 2018a), siendo la energía solar la más recomendable, dado que es una fuente limpia, abundante y segura. Uno de los sistemas de calefacción de invernaderos que utilizan energía solar como fuente y han sido estudiados por gran cantidad de investigadores, son almacenamiento de lecho rocoso. Este tipo de sistema utiliza rocas subterráneas para almacenar calor durante el día y liberarlo por la noche, generando un incremento de la temperatura del aire de hasta 3 °C, mejorando la calidad de la fruta hasta en 29% (Bazgaou *et al.*, 2018; Gourdo *et al.*, 2018b).

En algunos sistemas de producción en invernadero, el consumo de energía del invernadero representa más del 50% del costo total de producción, y es necesario calcular su consumo. El enfoque más preciso es emplear modelos matemáticos basados en el principio de conservación de calor y masa para estimar la viabilidad de la implementación de sistemas de control durante el invierno. Los modelos numéricos también se utilizan para mejorar la comprensión de los fenómenos convectivos, radioactivos y conductivos y la iteración ambiente planta dentro del invernadero (Albright, 1991; Kumari, Tiwari, & Sodha, 2006; Shukla, Tiwari, & Sodha, 2006; Rico-García, López-Cruz, & Herrera-Ruiz, 2008). Estos hallazgos nos han permitido profundizar en el desarrollo del microclima y la energía necesaria para mantener un confort ambiental, logrando una producción de alto rendimiento y mejorando la calidad y la eficiencia de los sistemas de calefacción (Chen *et al.*, 2015; Ahamed, Guo, & Tanino, 2018a; Shen, Wei, & Xu, 2018).

El modelado por medio de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), ha logrado un enfoque para simular el movimiento de aire, la variación de temperatura dentro del invernadero y el efecto de los sistemas de calefacción en el gradiente térmico (Amanowicz & Wojtkowiak, 2017; Tadj, Nahal, Draoui, & Constantinos, 2017; Lekka, Kefalas, &

Logiakakis, 2018; Guo, Liu, & Lü, 2019; li *et al.*, 2019; Akrami *et al.*, 2020). Junto con esto, nos ha permitido refinar subsistemas del invernadero como el sistema de calefacción para aumentar su efectividad y eficiencia. Algunos estudios realizados en CFD nos han permitido establecer que, mediante el uso de tuberías de calefacción, era posible incrementar la temperatura al interior del invernadero hasta en 4.5 °C (Couto *et al.*, 2012). En 2018, Yilmaz y Selbas investigaron el rendimiento térmico de un colector solar, una bomba de calor y una caldera para la calentar un invernadero. Los resultados mostraron que el colector solar tuvo un mayor impacto sobre el gradiente térmico del invernadero con un rendimiento térmico del 33.11%. Otro trabajo en el 2017, Tadj *et al.* demostraron que los sistemas de calefacción de conductos de polietileno perforados generaban una temperatura uniforme en comparación con otros sistemas de calefacción (tuberías con agua caliente y calefactores aéreos). Estos resultados coincidieron con lo establecido en la literatura en el cual, la distribución de temperatura fue más homogénea en un plano vertical que en un plano horizontal (Dhiman, Sethi, Singh, & Sharma, 2019).

En regiones con inviernos suaves y en periodos específicos del año, se necesita un sistema de calefacción emergente para mitigar las heladas ocasionales. En el centro de México, es común colocar calentadores emergentes para ayudar a estabilizar la temperatura interna cuando la temperatura exterior cae abruptamente en horas específicas antes del amanecer. Aunque se ha adquirido experiencia empírica, todavía hay poca investigación sobre el uso óptimo de los sistemas de calefacción eléctrica. Por ejemplo, recomendaciones sobre la posición y dirección de los calefactores para optimizar las cantidades de calor que garanticen homogeneidad térmica durante estos periodos críticos. Tampoco se encuentran investigaciones relacionadas sobre los costos energéticos y económicos de este sistema de calefacción emergente.

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue estimar el consumo de energía necesario para mantener la homogeneidad térmica, utilizando un calefactor eléctrico en el invernadero bajo condiciones invernales del centro de México, utilizando un modelo de balance de energía y CFD para predecir la distribución térmica en diferentes escenarios de calefacción.

3.3 Materiales y Métodos

3.3.1 Descripción del sitio experimental

El sitio del invernadero experimental está localizado en el Colegio de Postgraduados, Estado de México (19°27'45.5" N, 98°54'12.2" W) a 2239 msnm, situado en una llanura, sin estructuras a su alrededor. En la región, las temperaturas mínimas mensuales en el año oscilan entre los 2.49 °C y los 11.24 °C durante todo el año.

El invernadero prototipo tiene un área de 1050 m². Era de tipo cenital con tres naves cubiertas de polietileno translucido en el suelo y los costados, policarbonato en el techo y malla anti-insecto en las ventanas. El invernadero tiene un sistema de ventilación natural basado en cierre y apertura de ventanas cenitales, frontales y un sistema de calefacción mediante un calefactor eléctrico (CM-VAX, Calelec, MTY, MX) recomendado para espacios cerrados con un área de 96 m². El calefactor eléctrico estaba ubicado a 3 m sobre el nivel del suelo en la nave 2 en la zona de barlovento, tiene una potencia de 15 kW, sus características eléctricas son 230/3/60 (Voltios / Fases / Ciclos), un ventilador tipo axial con un motor de 1/8 H.P. que funciona con 120 V.

Para la adquisición de datos, se dispuso al interior del invernadero de un sistema Eddy Covarianza a 2.4 m de distancia de barlovento con un anemómetro sónico (CSAT 3D, Campbell Scientific Ltd, Antony, France), un analizador de gases EC150 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA), un sensor de temperatura y humedad (HMP155A, Campbell Scientific Inc., MA, USA), y cuatro sensores para el registro de temperatura del suelo (TCAV thermocouple Campbell Scientific Inc, MA, USA). Se instalaron 7 sensores de temperatura (DS18B20, Maxim Integrated, SJCA, USA) y tres sensores de humedad relativa (DHT22, Zhengxinyuan Electronics Co., Ltd, GD, CHN) distribuidos en las tres naves a una altura de 3 m (Figura 3.1).

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

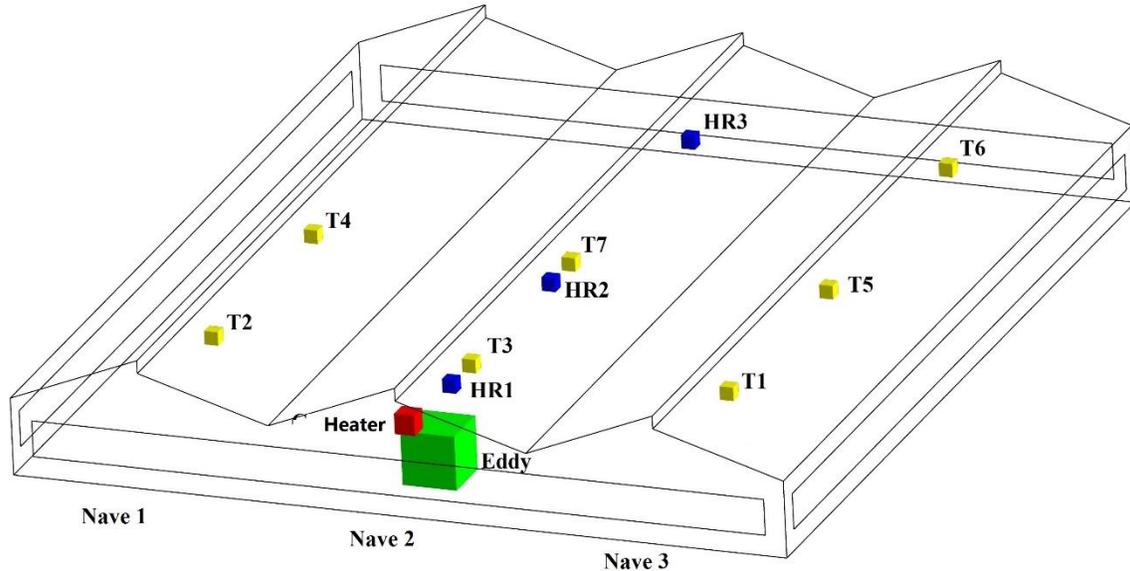


Figura 3.1. Distribución de los sensores de temperatura (■), y humedad (■), del calefactor (■) y el sistema Eddy Covarianza (■) en las tres naves del invernadero experimental; condiciones iniciales del modelo computacional.

El registro y almacenamiento de datos se realizó cada 5 s para la temperatura y humedad, y cada 100 ms para el anemómetro. El periodo de monitoreo fue del 03 de febrero al 24 de febrero del 2019, tiempo suficiente para evaluar el calefactor emergente, dado que los datos meteorológicos registraron temperaturas mínimas por debajo de los 12 °C. El almacenamiento de información se llevó a cabo con un sistema de registro de datos (CR3000 Micrologger, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) para el sistema Eddy Covarianza, y un Arduino Data Logger Shield para los sensores DS18B20 Y DHT22. Al exterior del invernadero se contaba con una estación meteorológica (Vantage Pro2 Plus, Davis Instruments, Hayward CA), utilizada para el registro de datos de temperatura, humedad, dirección y velocidad del viento, valores que fueron utilizados como condición inicial de frontera del modelo computacional. La información almacenada fue descargada y procesada en Microsoft Excel para determinar las condiciones ambientales de entrada del modelo computacional.

3.3.2 Cálculo de climatización

El modelo de temperatura del invernadero se desarrolló en base a los equilibrios de energía y masa (Nisen & Coutisse, 1981; Chen *et al.*, 2015; Ahamed, Guo, & Tanino, 2018b; Shen *et al.*, 2018) en un invernadero completamente cerrado sin iteración ambiente-planta debido a que en el momento del registro de datos no se contaba con cultivo. El cálculo de Q_h se estimó estableciendo el consumo de energía necesaria transferida por el calefactor eléctrico para atenuar el gradiente térmico, expresado de la siguiente manera:

$$Q_h = Q_t + Q_i + Q_g - Q_l \quad (\text{W}) \quad (3.1)$$

La radiación térmica transferida desde el interior hacia el exterior del invernadero (Q_l) depende de la emisión de energía a la atmosfera y de los materiales de cubierta.

$$Q_l = S_{sc} \cdot \sigma \cdot \tau_{ter} \cdot (\varepsilon_{atm} \cdot T_{atm}^4 - \varepsilon_{ter} \cdot T_c^4) \quad (\text{W}) \quad (3.2)$$

Donde, S_{sc} es la superficie de suelo cubierta (m^2), σ constante de Stefan-Boltzman ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$), τ_{ter} coeficiente de transmisibilidad del material de cubierta para la radiación térmica, ε_{atm} emisividad de la atmosfera, T_{atm} temperatura de emisión de energía a la atmosfera (K), ε_{ter} emisividad del material de cubierta para la radiación térmica y T_c la temperatura absoluta de la cubierta (K).

La transferencia de calor por conducción y convección (Q_t) se estimó por la diferencia de temperatura entre el interior y exterior del invernadero

$$Q_t = S_{dc} \cdot K_{cc}(t_i - t_e) \quad (\text{W}) \quad (3.3)$$

Donde, S_{dc} es la superficie desarrollada de la cubierta del invernadero (m^2), t_i temperatura interior del invernadero (K), t_e temperatura exterior del invernadero (K) y k_{cc} coeficiente global de pérdidas de calor por conducción y convección ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$).

El calor sensible y latente perdido por la renovación de aire interior (Q_i) se consideró mínimo al establecer como condición inicial el cierre de ventanas laterales y cenitales. Sin embargo,

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

existe infiltración de aire a través de la estructura al ser una construcción antigua y un invernadero parcialmente hermético.

$$Q_i = V_{gh} \cdot \frac{R}{3600} \cdot \rho \cdot [c_{pa} \cdot (t_i - t_e) + \lambda_0 \cdot (x_i - x_e) + c_{pv} \cdot (x_i t_i - x_e t_e)] \quad (\text{W}) \quad (3.4)$$

Donde, V_{gh} es el volumen del invernadero (m^3), c_{pa} calor específico del aire ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), ρ densidad del aire (kg m^{-3}), c_{pv} calor específico del vapor recalentado ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), x_i x_e humedad absoluta interior y exterior (kg kg^{-1}), λ_0 calor latente de vaporización (J kg^{-1}) y R tasa de renovación del aire (h^{-1}).

La transferencia de calor a través del suelo (Q_g) está en función de la diferencia de temperatura interior y del suelo.

$$Q_g = K_{ts} \cdot S_{sc} \frac{(t_i - t_s)}{p} \quad (\text{W}) \quad (3.5)$$

Donde, K_{ts} es el coeficiente de intercambio térmico a través del suelo ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$), t_s temperatura del suelo (K), p profundidad a la que se estima la temperatura (m),

Los parámetros del modelo de balance de energía se analizaron en función del medio ambiente del invernadero, sus características y los materiales de cubierta (Tabla 3.1 y 3.2).

El cálculo de climatización se realizó utilizando datos de normales climatológicas de temperatura mínima diaria. La temperatura interior del invernadero se estableció en $12 \text{ }^\circ\text{C}$ basado en el requerimiento térmico del tomate (*Solanum lycopersicum L.*) en el cual, para su apropiado crecimiento, la temperatura debe ser superior a los $10 \text{ }^\circ\text{C}$ por la noche (Castilla, 2004; Flores-Velázquez, Villarreal-Guerrero, Rojano-Aguilar, & Schdmith, 2019).

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Tabla 3.1. Variables para el cálculo de calefacción obtenidas de la literatura.

Símbolo	Variable	Valor	Unidad	Bibliografía
σ	Constante de Stefan Boltzmann	5.67e ⁻⁰⁸	W m ⁻² K ⁻⁴	(Nijskens, Deltour, Coutisse, & Nisen, 1984)
α	Absortividad del policarbonato	0.09		(Nijskens <i>et al.</i> , 1984; ASAE, 1999)
τ_{ter}	Transmisividad térmica del policarbonato	0.025		(Nijskens <i>et al.</i> , 1984; ASAE, 1999)
ϵ_{ter}	Emisividad del policarbonato	0.935		(Nijskens <i>et al.</i> , 1984; ASAE, 1999)
C_{pa}	Calor específico del aire	1008	J kg ⁻¹ K ⁻¹	(Chen <i>et al.</i> , 2015; Shen <i>et al.</i> , 2018)
R	Tasa de renovación del aire	0.45	h ⁻¹	(Tesi, 2001)

Tabla 3.2. Características del invernadero y sus materiales

Símbolo	Variable	Valor	Unidad
S_{dc}	superficie captadora de radiación solar	1113	m ²
S_{sc}	superficie del suelo cubierta	1050	m ²
e_{c1}	espesor del policarbonato	0.06	M
e_{c2}	espesor del polietileno	0.000018	M
V_{gh}	volumen del invernadero	4068076	m ³

3.3.3 Modelo computacional

La construcción y simulación del modelo computacional se llevó a cabo en ANSYS® *Fluent*®. La geometría se elaboró en ANSYS® *Workbench* mediante la herramienta *Design Modeler*. El mallado se realizó en *Meshing* y el invernadero contaba con unas dimensiones

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

de 30×35×5 m y con 490000 elementos estructurados en promedio, con una calidad ortogonal de 0.98 y una distorsión de $1.935e^{-002}$.

Las condiciones y variables del modelo aplicadas al flujo de aire para resolver las ecuaciones de transporte, discretizadas en ecuaciones algebraicas y calculadas por métodos numéricos se definieron en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Condiciones de frontera del modelo computacional.

Condiciones de frontera	Método
Solver	Basado en presión (Pressure-Based)
Estado	Estacionario (Steady)
Modelo de viscosidad	Estándar k-ε (2 ecuaciones)
Ecuación de energía	Activada
Dominio de entrada	Velocidad de entrada (Velocity inlet)
Dominio de salida	Presión de salida (Pressure outlet)
Temperatura del aire	Constante (12.73°C)
Velocidad del viento	Constante (0.513 m s ⁻¹)
Fuente de calor	Constante desde el suelo, hipótesis de Boussinesq
Condición térmica del suelo	Temperatura (4.7°C)
Suelo	Pared (ρ :1300, Cp:800, λ :1)
Paredes y acolchado del invernadero (Polietileno PE)	Pared (ρ :925.5, Cp:1900, λ :0.3)
Techo (Policarbonato PC)	Pared (ρ :1200, Cp:1200, λ :0.19)

La simulación del calefactor incluyó un salto de presión y una velocidad angular. El cálculo del salto de presión se estimó considerando la ecuación 3.6 :

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho_{aire} v^2 \text{ (Pa)} \tag{3.6}$$

Donde, ρ_{aire} es la densidad del aire (kg m⁻³), v velocidad del ventilador (m s⁻¹)

3.3.4 Evaluación del modelo computacional

Para obtener un modelo computacional confiable, se evaluaron dos escenarios: I) Sin calefacción y II) Con calefacción. La evaluación se llevó a cabo mediante un análisis estadístico entre los datos de temperatura y velocidad del viento simulados y experimentales. El estudio estadístico, fue realizado por medio de un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 0.05, utilizado para contrastar paramétricamente la diferencia de las variables en diferentes factores.

3.3.5 Escenarios de simulación

El análisis de la distribución del flujo de calor en el invernadero se realizó comparando el efecto de la posición y dirección de los calefactores; se incluyeron dos calefactores más al modelo computacional, buscando la mejora del sistema con una temperatura uniforme (Tabla 3.4). Las simulaciones se llevaron a cabo en estado estacionario y la energía suministrada por el calefactor fue modificada en función de los resultados del modelo computacional evaluado. El origen de las coordenadas (X, Y, Z) está en el centro del invernadero, y la dirección del flujo del calentador evaluado está en Z.

Tabla 3.4. Escenarios de simulación (X transversal, Z longitudinal, Y altura).

Escenarios	Calefactor	Ubicación en el invernadero (coordenadas locales)	Dirección del flujo de calor
a	0		
b	1	Nave 2 (X: 0 m, Y: 3 m, Z: -16.5 m)	Z
c	1	Nave 2 (X: 0 m, Y: 0.5 m, Z: -16.5 m)	Z
d	3	Nave 1 (X: -10 m, Y: 3 m, Z: -16.5 m)	Z
		Nave 2 (X: 0 m, Y: 3 m, Z: -16.5 m)	Z
		Nave 3 (X: 10 m, Y: 3 m, Z: -16.5 m)	Z
e	3	Nave 1 (X: -10 m, Y: 0.5 m, Z: -16.5 m)	Z
		Nave 2(X: 0 m, Y: 0.5 m, Z: -16.5 m)	Z
		Nave 3 (X: 10 m, Y: 0.5 m, Z: -16.5 m)	Z
f	3	Nave 1 (X: -10 m, Y: 3 m, Z: -16.5 m)	Z
		Nave 2 (X: 0 m, Y: 3 m, Z: 16.5 m)	-Z
		Nave 3(X: 10 m, Y: 3 m, Z: -16.5 m)	Z
g	3	Nave 1 (X: -10 m, Y: 0.5 m, Z: -16.5 m)	Z
		Nave 2 (X: 0 m, Y: 0.5 m, Z: 16.5 m)	-Z
		Nave 3 (X: 10 m, Y: 0.5 m, Z: -16.5 m)	Z

3.4 Resultados

3.4.1 Consumo de energía

La figura 3.2 muestra la estimación de los días necesarios de calefacción y su requerimiento energético promedio, para su cálculo, fueron utilizados los resultados obtenidos de la ecuación 3.1, teniendo en cuenta que un día con requerimiento energético, es aquel con una temperatura inferior a los 12 °C dentro el invernadero. El requerimiento energético, se evaluó como el promedio aritmético de la energía requerida durante los días con necesidades de calefacción durante el año.

Los resultados de la figura 3.2 muestran que, durante ciertas horas de la noche, es necesario calentar el aire del invernadero durante un periodo de 206 días. Enero, fue el mes con mayor

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

requerimiento energético, necesitando una implementación de cinco calefactores más con las mismas especificaciones para cubrir las necesidades energéticas y mantener una temperatura de 12 °C. Esto significa que, para la comodidad térmica del microclima del invernadero, se requiere de un dispositivo que proporcione 85.56 kW.

En la figura 3.3 se realizó una comparación entre la normal de temperatura mínima mensual en la zona de estudio y la energía necesaria para mantener el invernadero a 12 °C (Ecuación 3.1). El cálculo de requerimiento energético mensual se llevó a cabo asumiendo que el periodo en el que la temperatura cae por debajo de los 12 °C durante los días con necesidades de calefacción es durante un promedio de tres horas por día. El pico de las necesidades se produjo en enero y es un 13.94% mayor que el valor de diciembre. Durante los meses de junio a septiembre, no existe demanda energética. Para cubrir la demanda anual, se necesitan 32228.76 kWh, lo que representa un costo de MX \$ 20,626.40 según la tarifa agrícola 9 en México.

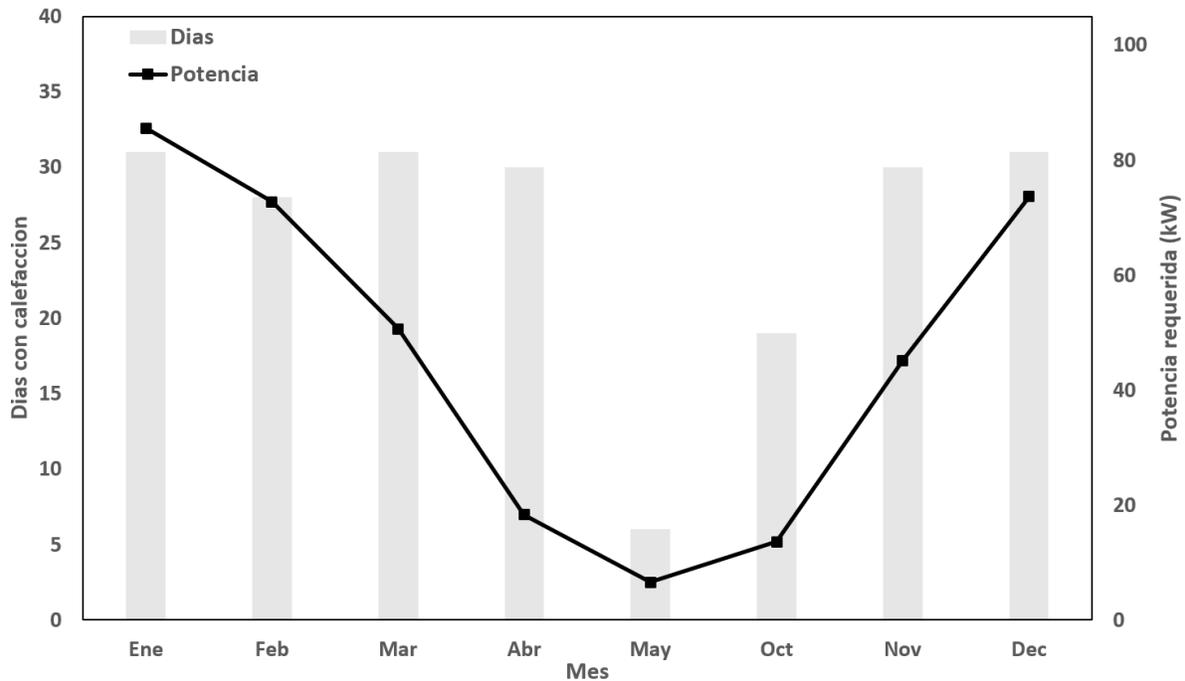


Figura 3.2. Variación anual de la potencia requerida para mantener el invernadero a 12 °C durante los días con necesidades de calefacción.

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

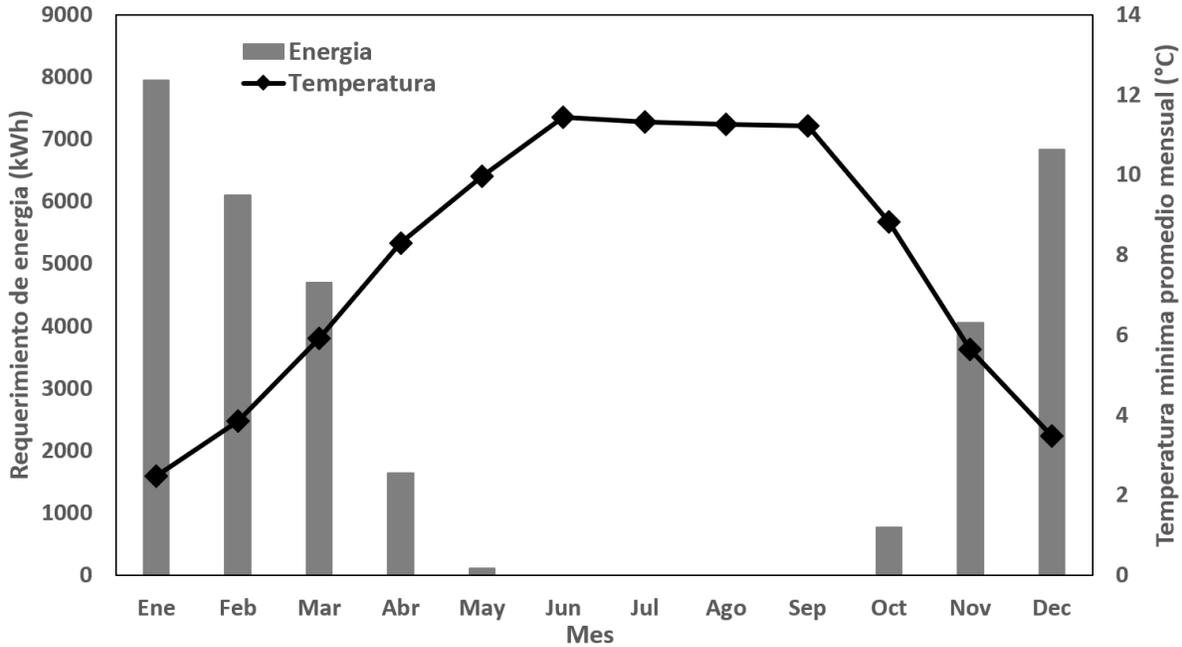


Figura 3.3. Variación anual de las necesidades de energía para tres horas diarias

3.4.2 Análisis de sensibilidad de malla del modelo computacional

Se realizó un análisis de sensibilidad de malla en el invernadero, mediante el registro de 100 puntos de temperatura a 2 m del suelo de manera longitudinal. Se realizaron 4 escenarios modificando el número de elementos de malla al interior del invernadero. Los resultados mostraron que no existe diferencia significativa entre los resultados de temperatura simulados con una malla promedio de 490,000 elementos.

3.4.3 Validación

La evaluación del modelo computacional con y sin calefacción se llevó a cabo estadísticamente mediante la correlación de los valores de temperatura y velocidad del viento simulados y registrados por los sensores durante la noche del 06 de febrero y 07 de febrero del 2019, respectivamente. En la tabla 3.5 se puede observar que los valores de temperaturas registrados y simulados se aproximaron. Para medir esta correlación se utilizó un análisis estadístico ANOVA con un nivel de significancia del 0.05, considerando que si el estadístico

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

de prueba F es menor que el valor crítico F (estadístico de prueba $F < \text{valor crítico de } F$), no hay diferencia significativa entre las variables registradas y simuladas (Tabla 3.6). Por lo tanto, el modelo evaluado puede ser usado en las simulaciones.

Tabla 3.5. Datos de temperatura (°C) en los modelos evaluados.

Modelo sin calefacción			Modelo con calefacción		
Sensor	Experimental	Simulado	Sensor	Experimental	Simulado
T1	11.28	11.42	T1	10.96	11.03
T2	10.28	11.43	T2	10.43	11.05
T3	10.95	11.3	T3	10.94	11.06
T4	10.93	11.33	T4	10.79	10.89
T5	11.52	11.31	T5	10.93	10.86
T6	11.5	11.4	T6	10.86	10.82
T7	11.31	11.29	T7	11.07	10.82
Eddy	11.76	11.85	Eddy	11.08	10.91

Tabla 3.6. Comparativa entre el estadístico de prueba F y su valor crítico

	Con calefacción	Sin calefacción
Temperatura	0.3 < 4.6	1.62 < 4.6
velocidad del viento	0.005 < 7.7	3.25 < 7.7

3.4.4 Análisis ambiental de los modelos evaluados

Se válido un invernadero vacío para dar estabilidad a las variables analizadas. Una vez que el modelo fue validado, se puede modelar el cultivo, ya que se conocen sus requisitos térmicos y de humedad relativa. En algunos casos, el cultivo podría modelarse como una fuente y sumidero de momento, masa y energía. El modelo sin calefacción presentó una homogenización térmica a 2 m de altura al interior de las tres naves del invernadero. La velocidad no superó los 0.018 m s^{-1} y el número de Rayleigh (Ra) oscilo entre los 2.8×10^8 para las tres naves del invernadero, con flujos laminares inducidos por las fuerzas térmicas flotantes.

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

El modelo computacional con calefacción muestra que para la nave 2, existió un incremento en la velocidad del viento generado por efecto del ventilador (Figura 3.4). Este aumento en la velocidad ocasiono una baja de temperatura en la nave 2 cerca de barlovento. Sin embargo, en el centro de la nave 2, se generó un aumento de hasta 0.15 °C derivado del suministro de energía por parte del calefactor.

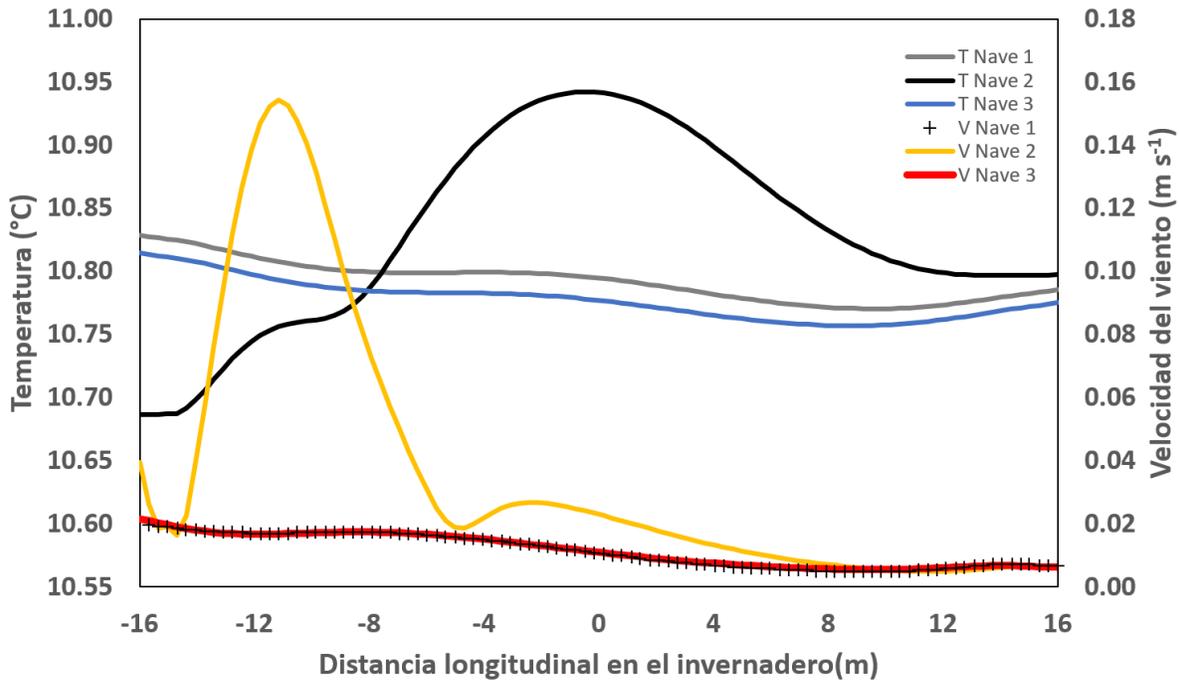


Figura 3.4. Distribución de temperaturas (°C) y velocidad del viento (m s⁻¹) a 2 m de altura.

En la nave 1 y 3 del modelo con calefacción, predominaron los flujos laminares inducidos por las fuerzas térmicas flotantes con números de Ra entre los 4.09×10^8 y 5.98×10^8 . En la nave 2 cerca al ventilador, la distribución térmica está en función de la temperatura y velocidad suministrada por el calefactor ocasionando una zona de transición a flujo turbulento (10×10^8 a 10×10^{10}) con valores de Ra 2.42×10^9 .

Estas simulaciones presentaron un comportamiento térmico similar al obtenido por Chen *et al.*, (2015), en donde en el invernadero sin calefacción, predominaron los flujos laminares

inducidos por las fuerzas térmicas flotantes. Y en el invernadero con calefacción hubo una transición a flujo turbulento.

3.4.5 Distribución espacial de temperatura de los escenarios de simulación

La figura 3.5 muestra una vista superior de las temperaturas a 2 m sobre el suelo de los escenarios simulados con datos iniciales del modelo computacional con y sin calefacción. Los resultados de las simulaciones presentaron un incremento en la temperatura de 0.8 °C entre el escenario a y b; y de 2 °C entre los escenarios a, d y e.

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

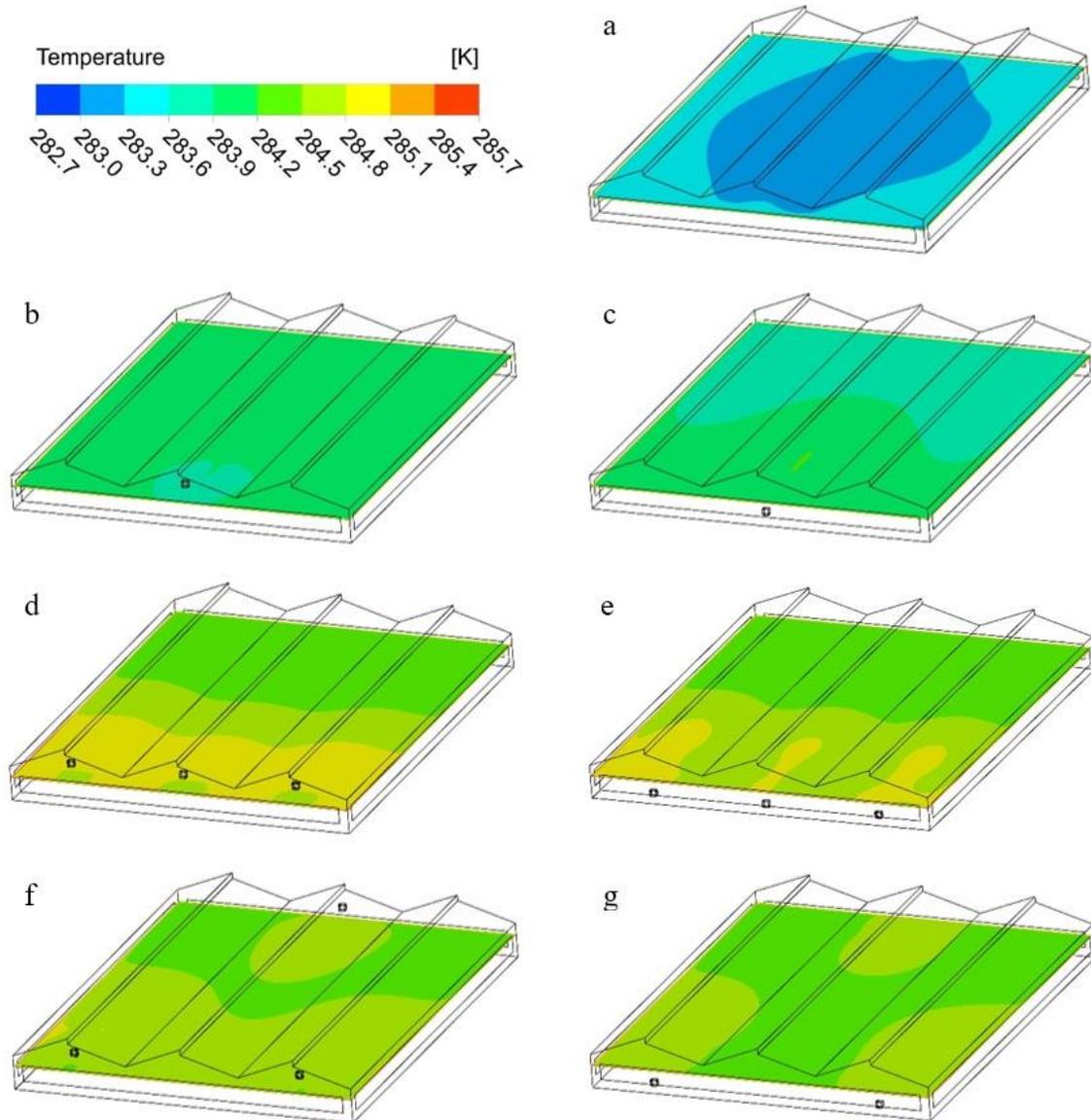


Figura 3.5. Distribución de temperatura (K) a 2 m sobre el suelo en el invernadero bajo condiciones iniciales del modelo computacional con calefacción en los escenarios simulados (a-g).

Dado que el gradiente térmico máximo era de 0.2 °C al modificar la altura del calefactor (Figura 3.5b-g), se estableció que, si la dirección del flujo de calor es la misma, la altura no tiene efecto significativo sobre la distribución de temperaturas a 2 m del suelo bajo las condiciones originales del calefactor. A menos que se cambie la dirección del flujo de calor

(escenario f y g), en este caso, la homogeneidad mejoró y las fuerzas de flotación tuvieron una importancia crucial en la distribución del calor. Los resultados de las simulaciones coincidieron con Dhiman *et al.* (2017) y Tadj *et al.*, (2018) en donde los sistemas de calefacción aéreos no son los más eficientes para homogenizar la temperatura del invernadero en un plano horizontal.

Para evaluar los resultados de la figura 3.5, y analizar el comportamiento de la temperatura a 2 m del suelo y su influencia con la altura, y dirección del flujo del calefactor bajo diferentes suministros de energía, se simularon 4 escenarios (d, e, f y g), considerando un suministro constante de temperatura de 30 °C por el calefactor.

La figura 3.6 muestra la relación de temperatura longitudinal a 2 m de altura en la nave 2 entre los escenarios d y e (Δ) con un suministro de temperatura constante de 30 °C. La figura muestra que, si la dirección del flujo de calor permanece constante, no existe diferencia significativa en la temperatura del invernadero a 2 m del suelo ($R^2 = 0.996$) entre el calentador a 0.5 y 3 m. Sin embargo, esta posición del calentador no era la adecuada para homogenizar las temperaturas verticales longitudinales a 2 m del suelo, ya que, a medida que la energía suministrada por el calefactor aumenta, el gradiente térmico es más significativo entre el área cercana al calefactor y su lado opuesto. Los escenarios d y f (o) mostraron que en la nave 2, la dirección del flujo de calor tiene un impacto más significativo en la distribución de temperaturas horizontales a 2 m de altura, mejorando la homogenización y reduciendo el gradiente térmico cuando se presentan flujos de calor mezclados (escenario f).

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

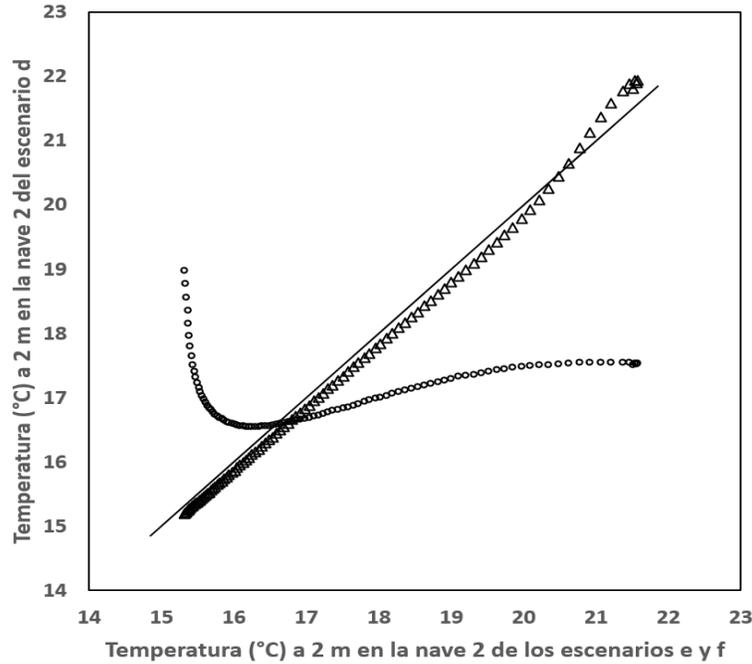


Figura 3.6. Relación de temperaturas (°C) a 2 m de altura en la nave 2 del invernadero con calefacción constante en 4 escenarios d y e (Δ), d y f (o).

Mediante los resultados de las simulaciones de este trabajo, fue posible deducir que la dirección del flujo de calor tuvo un impacto significativo en la homogenización térmica (escenario d y g), reafirmando el trabajo de Constantinos *et al.*, (2017), donde la distribución del flujo de calor fue causada por la posición de los sistemas de calefacción y el efecto de las fuerzas térmicas flotantes creadas por el gradiente térmico entre la temperatura del invernadero y la energía suministrado por el sistema de calefacción.

Al seleccionar la ubicación del calefactor, era necesario tener en cuenta que la temperatura es más alta en la zona cercana al calefactor, como se muestra en la figura 3.7. Por lo tanto, para evitar daños a los cultivos, el calentador debe instalarse a una altura superior a la cosecha actual. En el caso del tomate, la altura recomendada es de 3 m.

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

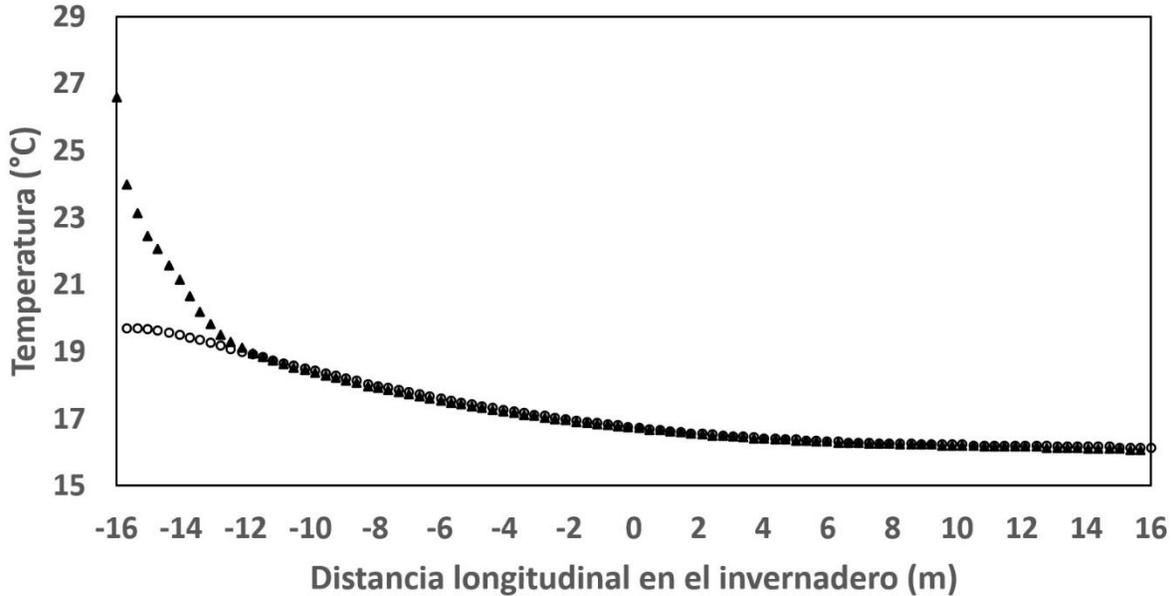


Figura 3.7. Distribución de temperaturas (°C) a 0.7 m de altura en la nave 1 del invernadero en los escenarios f (○) y g (▲) con una temperatura constante suministrada por el calefactor de 30 °C.

La potencia suministrada por el calefactor del invernadero empleado en esta investigación es insuficiente para atenuar la caída de temperatura que ocurre durante el periodo invernal. Además de la potencia, era necesario considerar la distribución de los calefactores eléctricos, dado que este tipo de sistemas en comparación con los sistemas de calefacción que utilizan redes de tuberías (Esen & Yuksel, 2013; Benli, 2016; Dhiman *et al.*, 2019), no era la mejor opción para homogenizar la temperatura en el invernadero. Actualmente, existen una gran cantidad de técnicas usadas para calentar el aire del invernadero (Esen *et al.*, 2013; Ozgener *et al.*, 2005; Tadj *et al.*, 2017; Dhiman *et al.*, 2019). No obstante, debido al alto costo de inversión que representan estos sistemas en ocasiones llegan a ser poco viables.

3.5 Conclusiones

Durante el invierno en el centro de México (21 de diciembre a 21 de marzo), el consumo de energía es alrededor del 63% de la energía total anual para mantener una temperatura de 12 °C al interior del invernadero durante el periodo nocturno. Dichas condiciones climáticas

causan un costo aproximado de MX \$12949.7 (US \$540.0), de acuerdo con la tarifa agrícola en México. La distribución térmica se produce de acuerdo con la velocidad y temperatura proporcionada por el calefactor, lo que provoca una zona de transición a flujo turbulento y una diferencia de densidades entre el aire cerca del calefactor y el aire del invernadero. La homogenización térmica, ocurre cuando hay flujos de calor opuestos (mezclados), lo que causa una mejora en el ambiente del invernadero mediante la distribución de los calentadores y reduce el gradiente de temperatura entre el área cerca del calefactor y su lado opuesto. Este tipo de sistemas de calefacción, conocidos como aéreos, no son ideales para homogenizar la temperatura del invernadero debido al efecto de las fuerzas térmicas flotantes que pueden superarse agregando ventiladores en las zonas estancadas y ayuda a distribuir el calor en todas las zonas del invernadero.

3.6 Referencias

Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2018a). A quasi-steady-state model for predicting the heating requirements of conventional greenhouses in cold regions. *Inf. Process. Agric.*, 5, 3–46, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2017.12.003>

Ahamed, M. S., Guo, H., & Tanino, K. (2018b). Development of a thermal model for simulation of supplemental heating requirements in Chinese-style solar greenhouses. *Comput. Electron. Agric.*, 150, 235–244, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.04.025>

Akrami, M., Javadi, A. A., Hassanein, M. J., Farmani, R., Dibaj, M., Tabor, G. R., & Negm, A. (2020). Study of the Effects of Vent Configuration on Mono-Span Greenhouse Ventilation Using Computational Fluid Dynamics. *Sustainability*, 12, 986, DOI: <https://doi.org/10.3390/su12030986>

Albright, L. D. (1991). Production Solar Greenhouse. *Energy World Agric.*, 4, 213–232.

Ali, H. B., Bournet, P. E., Danjou, V., Morille, B., & Migeon, C. (2014). CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: Sensitivity analysis to outside

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

external conditions, heating and glass properties. *Biosyst. Eng.*, 127, 159–175, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.08.017>

Amanowicz, Ł., & Wojtkowiak, J. (2017). Validation of CFD model for simulation of multi-pipe earth-to-air heat exchangers (EAHEs) flow performance. *Therm. Sci. Eng. Prog.*, 5, 44–49, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2017.10.018>

ASAE. ASAE D271.2 DEC99 (1999). *Psychrometric Data*, 1st ed.; American Society of Agricultural Engineers: St. Joseph, MI, USA, p. 9.

Bakker, J. C. (1991). Analysis of Humidity Effects on Growth and Production of Glasshouse Fruit Vegetables. Ph.D. Thesis, Agricultural University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands,

Baptista, F. J., Bailey, B. J., & Meneses, J. F. (2012) Effect of nocturnal ventilation on the occurrence of Botrytis cinerea in Mediterranean unheated tomato greenhouses. *Crop. Prot.*, 32, 144–149, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.11.005>

Bazgaou, A., Fatnassi, H., Bouhroud, R., Gourdo, L., Ezzaeri, K., Tiskatine, R., & Demrati, H. (2018). An experimental study on the effect of a rock-bed heating system on the microclimate and the crop development under Canarian greenhouse. *Sol. Energy*, 176, 42–50, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.027>

Benli, H. (2016). Performance prediction between horizontal and vertical source heat pump systems for greenhouse heating with the use of artificial neural networks. *Heat Mass Transf. /Waerme-Und Stoffuebertragung*, 52, 1707–1724, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1723-z>

Castilla, N. (2004). *Invernaderos De Plástico. Tecnología Y Manejo*, 2nd ed.; Editorial Mundiprensa: Madrid, Spain, p. 462.

Chen, J., Xu, F., Tan, D., Shen, Z., Zhang, L., & Ai, Q. (2015). A control method for agricultural greenhouses heating based on computational fluid dynamics and energy

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

prediction model. *Appl. Energy*, 141, 106–118, DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.026>

Couto, N., Rouboa, A., Monteiro, E., & Viera, J. (2012). Computational Fluid Dynamics Analysis of Greenhouses with Artificial Heat Tube. *World J. Mech.*, 2, 181–187, DOI:
<https://doi.org/10.4236/wjm.2012.24022>

Dhiman, M., Sethi, V. P., Singh, B., & Sharma, A. (2019). CFD analysis of greenhouse heating using flue gas and hot water heat sink pipe networks. *Comput. Electron. Agric.*, 163, 104853, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104853>

Du, J., Bansal, P., & Huang, B. (2012). Simulation model of a greenhouse with a heat-pipe heating system. *Appl. Energy*, 93, 268–276, DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.069>

Esen, M., & Yuksel, T. (2013). Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *Energy Build*, 65, 340–351, DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.018>

Fidaros, D. K., Baxevanou, C. A., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2010). Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Renew. Energy*, 35, 1380–1386, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.013>

Flores-Velázquez, J., Villarreal-Guerrero, F., Rojano-Aguilar, A., & Schdmith, U. (2019). CFD to analyze energy exchange by convection in a closed greenhouse with a pipe heating system. *Acta Univ.*, 29, e2112, DOI: <https://doi.org/10.15174/au.2019.2112>

Gourdo, L., Bazgaou, A., Ezzaeri, K., Tiskatine, R., Wifaya, A., Demrati, H., Aharoune, A., & Bouirden, L. (2018a). Heating of an agricultural greenhouse by a reservoir filled with rocks. *J. Mater. Environ. Sci.*, 9, 1193–1199, DOI:
<https://doi.org/10.26872/jmes.2017.9.4.131>

Gourdo, L., Fatnassi, H., Tiskatine, R., Wifaya, A., Demrati, H., Aharoune, A., & Bouirden, L. (2018b). Solar energy-storing rock-bed to heat an agricultural greenhouse. *Energy*, 169, 206–212, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.036>

Guo, J., Liu, Y., & Lü, E. (2019) Numerical Simulation of Temperature Decrease in Greenhouses with Summer Water-Sprinkling Roof. *Energies*, 12, 2435, DOI: <https://doi.org/10.3390/en12122435>

Joudi, K. A., & Farhan, A. A. (2014). Greenhouse heating by solar air heaters on the roof. *Renew. Energy* 2014, 72, 406–414, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.025>

Kumari, N., Tiwari, G. N., & Sodha, M. S. (2006) Thermal Modelling for Greenhouse Heating by Using Packed Bed. *Int. J. Agric. Res.*, 1, 373–383, DOI: <https://doi.org/10.3923/ijar.2006.373.383>

Lekka, T., Kefalas, P., & Logiakakis, M. (2018). Energy efficiency analysis in a small greenhouse using computational fluid dynamics. In Proceedings of the 8th International Conference from “Scientific Computing to Computational Engineering” Glyfada, Athens, Greece, 4–7.

Li, K., Xue, W., Mao, H., Chen, X., Jiang, H., & Tan, G. (2019). Optimizing the 3D Distributed Climate inside Greenhouses Using Multi-Objective Optimization Algorithms and Computer Fluid Dynamics. *Energies*, 12, 2873, DOI: <https://doi.org/10.3390/en12152873>

Nijskens, J., Deltour, J., Coutisse, S., & Nisen, A. (1984). Heat transfer through covering materials of greenhouses. *Agric. For. Meteorol.*, 33, 193–214.

Nisen, A., & Coutisse, S. (1981). Modern concept of greenhouse shading. *Plasticulture*, 49, 9–26.

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Ozgener, O., & Hepbasli, A. (2005). Performance analysis of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating: An experimental study. *Build. Environ.*, 40, 1040–1050, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.08.030>

Reyes-Rosas, A., Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., López, A., & Khamkure, S. (2017). Development of a single energy balance model for prediction of temperatures inside a naturally ventilated greenhouse with polypropylene soil mulch. *Comput. Electron. Agric.*, 142, 9–28, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.020>

Rico-Garcia, E., Lopez-Cruz, I. L., & Herrera-Ruiz, G. (2008). Effect of Temperature on Greenhouse Natural Ventilation under Hot Conditions: Computational Fluid Dynamics Simulations. *J. Appl. Sci.*, 8, 4543–4551, DOI: <https://doi.org/10.3923/jas.2008.4543.4551>

Roy, J. C., Pouillard, J. B., Boulard, T., Fatnassi, H., & Grisey, A. (2014). Experimental and CFD results on the CO₂ distribution in a semi-closed greenhouse. *Acta Hortic.* 2014, 1037, 993–1000, DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037.131>

Salazar-Moreno, R., Mauricio-Pérez, A. M., López-Cruz, I. L., & Rojano-Aguilar, A. (2016). A model of humidity within a semi-closed greenhouse. *Rev. Chapingo Ser. Hortic.*, 22, 27–43, DOI: <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2015.06.011>

Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., & López-Cruz, I. L. (2014). La eficiencia en el uso del agua en la agricultura controlada. *Tecnol. Y Cienc. Del Agua*, 5, 177–183.

Shen, Y., Wei, R., & Xu, L. (2018). Energy consumption prediction of a greenhouse and optimization of daily average temperature. *Energies*, 11, 65, DOI: <https://doi.org/10.3390/en11010065>

Shukla, A., Tiwari, G. N., & Sodha, M. S. (2006). Energy Conservation Potential of Inner Thermal Curtain in an Even Span Greenhouse. *Trends Appl. Sci. Res.*, 1, 542–552, DOI: <https://doi.org/10.3923/tasr.2006.542.552>

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Tadj, N., Nahal, M. A., Draoui, B., & Constantinos, K. (2017). CFD simulation of heating greenhouse using a perforated polyethylene ducts. *Int. J. Eng. Syst. Model. Simul.*, 9, 3, DOI: <https://doi.org/10.1504/IJESMS.2017.10002559>

Tamimi, E., & Kacira, M. (2013). Analysis of climate uniformity in a naturally ventilated greenhouse equipped with high-pressure fogging system using computational fluid dynamics. *Acta Hortic.*, 1008, 177–184, DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1008.23>

Tesi, R. *Medios De Protección Para La Hortoflorofruticultura Y El Viverismo*, 1st ed.; Editorial MundiPrensa: Madrid, Spain, 2001; p. 288.

Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Appl. Energy*, 104, 538–553, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.051>

Yilmaz, F., & Selbas, R. (2018). Performance assessment of various greenhouse heating systems; a case study in Antalya. *Exergetic Energetic Environ. Dimens.*, 421–433, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813734-5.00024-X>

Zeroual, S., Bougoul, S., & Benmoussa, H. (2018). Effect of Radiative Heat Transfer and Boundary Conditions on the Airflow and Temperature Distribution Inside a Heated Tunnel Greenhouse. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 59, 1008–1014, DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894418060068>

Zhang, L., Jiachen, P. X., Tang, M. X., & Jianguo, Z. L. (2015). A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study. *Appl. Energy*, 156, 213–222, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.036>

Zhou, D., Zhao, C. Y., & Tian, Y. (2012). Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Appl. Energy*, 92, 593–605, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>

4 IMPACTO AGRONÓMICO DEL VAPOR DE AGUA E INFRARROJO CERCANO SOBRE LA EFICIENCIA AMBIENTAL DEL INVERNADERO

4.1 Resumen

El efecto convectivo y radioactivo entre el aire y las superficies del invernadero es esencial para la comprensión de fenómenos naturales como evaporación, transpiración y el manejo de subsistemas para el control del clima como el riego y calefacción. El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de la fracción de masa de vapor de agua y concentración del infrarrojo cercano (NIR) sobre la distribución espacial del ambiente del invernadero. La fase experimental consistió en instalar sensores en un invernadero para medir temperatura, humedad, radiación y velocidad del viento. El estudio fue llevado a cabo en un invernadero con ventilación natural y sin cultivo, con la finalidad de estimar el efecto de la distribución de fracción de masa de vapor de agua y el NIR sobre la temperatura del invernadero. La predicción ambiental fue basada en un modelo numérico desarrollado en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), considerando un cambio en la fracción de masa de vapor de agua y en la intensidad de NIR. El gradiente térmico generado en las simulaciones por el cambio en la fracción de masa de vapor de agua y la intensidad de NIR oscila entre los 0.02-0.46 °C siendo la zona de barlovento la que presenta mayor humedad ocasionado por el intercambio de calor y masa entre el exterior e interior. El modelo simulado con la velocidad del viento media mensual (1.59 m s^{-1}) no presentó cambios suficientes para estabilizar la temperatura y HR en un rango de 25-30 °C y 50-60%, respectivamente. En consecuencia, el déficit de presión de vapor superó el valor recomendado de 0.2-1 kPa con valores que oscilan entre los 1.12-2.93 kPa.

Palabras claves: Déficit de presión de vapor; Gestión ambiental; Homogenización térmica.

4.2 Introducción

En los invernaderos, el sistema de ventilación favorece la distribución de temperatura al interior. En la ventilación natural, el intercambio de aire en ocasiones llega a ser insuficiente debido a velocidades de viento exterior igual o menores a 1 m s^{-1} incrementando la temperatura y reduciendo la concentración de CO_2 y HR (Liu, Yin, & Zhao, 2003; Molina-Aiz, Valera, Peña, Gil, & López, 2009; Sun, Luo, Feng, Xiang, & Fu, 2014). En el 2017 Cemek *et al.*, concluyeron que la eficiencia de ventilación debe ser analizada con profundidad para establecer los mejores parámetros de crecimiento de las plantas. La velocidad y dirección del viento son un factor que impacta en el confort ambiental de un invernadero, directamente en el transporte de calor y masa entre el exterior y el interior (Teitel, Liran, Tanny, & Barak, 2008; Rico-Garcia, Soto-Zarazua, Alatorre-Jacome, De la Torre-Gea, & Gomez-Melendez, 2011; Zeroual, Bougoul, & Benmoussa, 2018). El sistema de ventilación de un invernadero tiene como objetivo eliminar el exceso de calor y mantener niveles aceptables para el cultivo de CO_2 y vapor de agua (Fidaros, Baxevanou, & Kittas, 2010; Teitel & Wenger, 2014). La gestión del aire se diversifica según la estación del año, en invierno permite eliminar el exceso de humedad mientras que en verano en ocasiones llega a ser insuficiente para enfriarlo siendo necesario el uso de sistemas auxiliares (Bournet & Boulard, 2010).

Uno de los parámetros para el manejo climático de invernaderos que integra la temperatura y humedad ambiental en un solo valor, usado para conocer el estado de sanidad y desarrollo de un cultivo es el déficit de presión de vapor (DPV). Fernández *et al.*, (2001); Prenger y Ling (2001); Dik y Wubben (2007), mencionan que el DPV es una herramienta que puede ser usada para el manejo climático, hídrico y de enfermedades dentro del invernadero. López (2005) y Shtienberg (2007), señalan que un DPV superior a los 1.25 kPa en el invernadero genera una alta tasa de transpiración de los cultivos ocasionando una predisposición ambiental para infecciones de las plantas. Cartagena (2004), menciona que la pérdida de agua por parte de la planta es dependiente del DPV, al aumentar el DPV la planta comienza a transpirar y al llegar a los 2 kPa se genera el cierre de estomas infiriendo en su crecimiento.

Grange y Hand (1987), reportaron un crecimiento significativo en 26 cultivos al disminuir el DPV de 1.8 a 1 kPa. Sin embargo, valores inferiores a 0.3 kPa demostraron no tener beneficio sobre los cultivos evaluados. En el tomate valores inferiores a los 0.2 kPa promueven que no exista desprendimiento del polen de las antenas de las flores, en cambio cuando este valor supera 1 kPa el polen no logra adherirse al estigma de la flor (Grange *et al.*, 1987). En el 2003 Körner & Challa reportaron valores de referencia del DPV entre 0.3-1 kPa para mantener los cultivos sin problemas de enfermedad y con una adecuada transpiración.

De manera similar la distribución de radiación en un invernadero es importante, debido a que es un insumo y la fuerza motriz de las funciones fisiológicas de las plantas. La radiación solar es el principal factor para el crecimiento del cultivo dentro de los invernaderos teniendo un impacto indirecto sobre la temperatura del aire y regulando dos fenómenos fisiológicos de las plantas: i) transpiración y ii) fotosíntesis (Baxevanou, Fidaros, Bartzanas, Kittas, 2010). El consumo de energía de un invernadero depende de la radiación solar entrante (Sethi & Sharma, 2007) que está influenciada por el diseño del invernadero (orientación y forma del techo), las propiedades termo-físicas y ópticas de la cubierta, y el clima (Mesmoudi, Meguallati, & Bournet, 2017). Por lo tanto, la orientación y forma del techo pasan a ser los elementos físicos más importante en la distribución de radiación solar (Kendirli, 2006; Camelia, 2016; Mobtaker, Ajabshirchi, Ranjbar, & Matloobi, 2018).

La radiación solar es un factor utilizado para determinar el balance energético de los invernaderos. Los modelos numéricos permiten estimar la transmisión de radiación solar enfatizando en las propiedades de los materiales de revestimiento (Geoola, Kashti, & Peiper, 1998). En la década de los 80 se desarrollaron modelos dinámicos del clima del invernadero con la intención de calcular el efecto de radiación solar sobre la calidad y producción de los cultivos (Kindelan, 1980; Bot, 1983). La modelación de radiación solar se abordó inicialmente de forma indirecta utilizando modelos analíticos para calcular las temperaturas superficiales que se desarrollaban debido a la radiación de onda corta y larga (Molina-Aiz, Valera, & Álvarez, 2004). Así mismo, se estimó el efecto radioactivo como fuente de calor

en la ecuación de energía atribuida a la radiación solar de onda corta y térmica emitida por las superficies calentadas (Campen & Bot, 2003).

En años más recientes se utilizaron modelos para resolver el transporte de radiación siendo el más popular el modelo de Ordenadas Discretas (DO) utilizado por *ANSYS FLUENT* (Bournet, Ould-Khaoua, & Boulard, 2007; Kim *et al.*, 2008; Fidaros *et al.*, 2010; Wang, Luo, & Li, 2013; Chen *et al.*, 2015). El modelo DO basa su cálculo resolviendo las ecuaciones de transferencia radiactiva (RTE) de onda corta y onda larga (Bournet *et al.*, 2007; Kichah, Bournet, Migeon, & Boulard, 2012; Nebbali, Roy, & Boulard, 2012; Morille, Migeon, & Bournet, 2013; Roy, Pouillard, Boulard, Fatnassi, & Grisey, 2014). Su uso es útil para calcular los intercambios de radiación de superficie a superficie, pero no para las transferencias dentro del dosel (Boulard, Roy, Pouillard, Fatnassi, & Grisey, 2017).

La simulación a escala real mediante modelos CFD en 2D y 3D ha sido utilizada para estudiar la distribución del microclima en invernaderos a través de la incorporación de modelos de radiación solar y submodelos de intercambio de calor sensible y latente (Majdoubi, Boulard, Fatnassi, & Bouirden, 2009). Así mismo, estos modelos fueron usados para evaluar el efecto ambiental en el invernadero causado por su diseño (Sethi, 2009), material de cubierta (Baxevanou, Fidaros, Bartzanas, & Kittas, 2018), la hora del día, estación del año (Muñoz, Montero, Anton, & Iglesias, 2004; Tong, Christopher, Li, & Wang, 2013), el tipo de ventilación y su configuración (Bartzanas, Boulard, & Kittas, 2004). Sin embargo, es poca o nula la información que se tiene para analizar el efecto que tiene la NIR y la concentración de vapor de agua en el aire sobre la temperatura en el invernadero.

El objetivo de este trabajo fue analizar el efecto de la concentración de vapor de agua como fracción de masa y la NIR sobre la gestión ambiental para el manejo agronómico del invernadero con fines de producción hortícola.

4.3 Metodología y materiales

4.3.1 Descripción del sitio experimental

El invernadero prototipo está localizado en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo en el Estado de México ($19^{\circ}27'45.5''$ N, $98^{\circ}54'12.2''$ W) a 2239 msnm, orientado de norte a sur en un llano en donde las temperaturas medias mensuales oscilan entre 5 a 25 °C durante el año. Tiene un área de 1050 m², es de tipo cenital con tres naves cubiertas de polietileno translucido en el suelo y los costados, policarbonato en el techo y malla anti-insecto en tres ventanas laterales y tres cenitales. El invernadero cuenta con un sistema de ventilación natural que mantiene completamente abiertas las ventanas cenitales y laterales, en él se cultiva de manera hidropónica dado las condiciones salinas del suelo, y su sistema de riego es por goteo.

Para la adquisición de datos se instaló un sistema Eddy covarianza a 2.4 m de distancia de barlovento con un anemómetro sónico (3D, Campbell Scientific Ltd., Antony, France), un analizador de gases EC150 (Campbell Scientific Inc., Logan, UT, USA), un radiómetro neto (NR-LITE2 Kipp and Zone B.V., Delft, The Netherlands), un sensor de temperatura y humedad (HMP155A, Campbell Scientific Logan, UT, USA), y cuatro sensores para el registro de temperatura del suelo (TCAV thermocouple Campbell Scientific Inc, MA, USA). Se instalaron siete sensores de temperatura (DS18B20, Maxim Integrated, San Jose, CA, USA) y tres sensores de humedad (DHT22, Zhengxinyuan Electronics Co., Ltd., Shenzhen, Chin) distribuidos en las tres naves a una altura de 3 m (Figura 4.1).

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

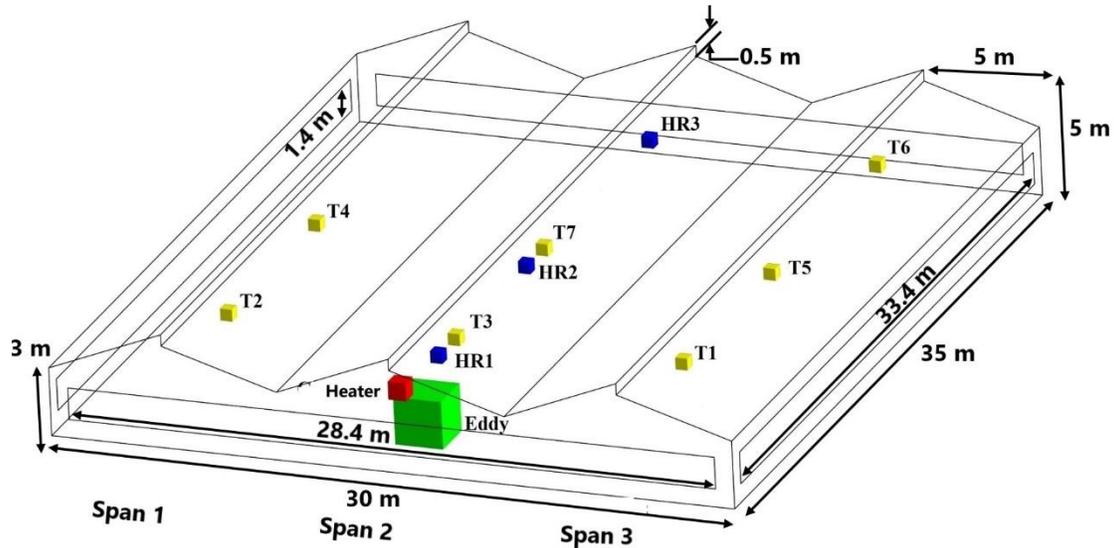


Figura 4.1. Dimensiones y Distribución del calefactor (■) y los sensores de temperatura (■), humedad (■) y sistema Eddy Covarianza (■) en las tres naves del invernadero experimental.

El registro y almacenamiento de datos se realizó cada 5 s para temperatura y humedad, 100 ms para el anemómetro y 20 s para el radiómetro neto. El periodo de monitoreo fue durante el mes de febrero del 2019, mes donde existe un gradiente de HR que oscila entre los 30-100% dentro del invernadero entre el periodo diurno y nocturno, respectivamente. Durante el registro de datos no se contaba con cultivo alguno, por lo que la humedad dentro del invernadero provenía del exterior. El almacenamiento de información se llevó a cabo con un sistema de registro de datos (CR3000 Micrologger, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) para el sistema Eddy Covarianza, y un Arduino Data Logger Shield para los sensores DS18B20 Y DHT22. Al exterior del invernadero se contaba con una estación meteorológica (Vantage Pro2 Plus, Davis Instruments, Hayward CA) utilizada para el registro de datos de temperatura, humedad, dirección, radiación y velocidad del viento, valores que fueron utilizados como condición inicial de frontera del modelo computacional. La información almacenada fue descargada y procesada en Microsoft Excel para determinar las condiciones ambientales de entrada del modelo computacional.

4.3.2 Modelo computacional

La construcción y simulación del modelo computacional se llevó a cabo en *ANSYS® Fluent®*. La geometría se elaboró en *ANSYS® Workbench* mediante la herramienta *SpaceClaim*. La malla se realizó en *Meshing*. Las propiedades de los materiales del invernadero se definieron en las tablas 4.1 y 4.2 (Fidaro *et al.*, 2010; Mesmoudi *et al.*, 2017; Senhaji, Majdoubi, Mouqalid, De, & Meknès, 2017; Baxevanou *et al.*, 2018).

Tabla 4.1. Propiedades de los materiales de cubierta

Material	ρ (kg m ⁻³)	CP (J kg ⁻³ °C ⁻¹)	k (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Espesor (mm)
Suelo	1300	800	1	
Paredes y acolchado (Polietileno PE)	925.5	1900	0.3	0.18
Techo (Policarbonato PC)	1200	1200	0.19	6

Tabla 4.2. Propiedades ópticas de los materiales a la radiación térmica

Material	emisividad (ϵ)	transmisividad (τ)	reflectividad (δ)
Policarbonato	0.935	0.25	0.09
Polietileno	0.8	0.1	0.03
Suelo	0.95		1.92
Aire	0.0015		1.009

Las condiciones del modelo y de las variables aplicadas al flujo de aire para resolver las ecuaciones de transporte discretizadas en ecuaciones algebraicas y calculadas mediante métodos numéricos se definieron en la tabla 4.3. Para el modelo de especies se utilizó la fracción de masa de vapor de agua para calcular la distribución de humedad relativa (HR).

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Tabla 4.3. Condiciones de frontera del modelo computacional.

Condiciones de frontera	Método
Solver	Basado en presión (Pressure-Based)
Estado	Estacionario (Steady)
Modelo de viscosidad	Estándar k-ε (2 ecuaciones)
Ecuación de energía	Activada
Modelo de radiación	Ordenadas Discretas (DO), Solar Ray Tracing
Modelo de banda no gris	NIR 0.76-1.1 μm
Especies	Fracción de masa constante
Temperatura del aire	Constante (22 °C)
Velocidad del viento	Constante (0.64 m s ⁻¹)
Salto poroso	Permeabilidad de cara Espesor del medio poroso Coeficiente de salto de presión
Fuente de calor	Constante desde el suelo (44.1 °C)

4.3.3 Ecuaciones fundamentales del flujo modelado

La ecuación general de transporte que se puede resolver numéricamente mediante CFD para calcular explícitamente el campo de velocidad y temperatura asociado a un flujo en tres dimensiones en estado estacionario puede ser descrita en los siguientes términos generales (Bouhoun, Bournet, Cannavo, & Chantoiseau, 2017; Mesmoudi *et al.*, 2017; Senhaji *et al.*, 2017):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial(U\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(V\Phi)}{\partial y} + \frac{\partial(W\Phi)}{\partial z} = -\Gamma \Delta \Phi^2 + S_{\Phi} \quad (4.1)$$

Donde, Φ representa la concentración del término adimensional, es decir, momento, masa (aire y fracción de masa de vapor de agua) y energía. U , V y W son las componentes del vector de velocidad en las tres dimensiones (m s⁻¹), Γ es el coeficiente difusivo (kg m⁻¹ s⁻¹), y S_{Φ} es el término fuente.

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Al interior del invernadero la turbulencia se consideró utilizando el modelo *k-e* (Launder & Spalding, 1972; Launder & Spalding, 1974) que dio origen a dos ecuaciones suplementarias y especies. La elección del modelo resultó entre la comparación de diferentes modelos de turbulencia en invernaderos (Nebbali *et al.*, 2012).

Para la energía, el término fuente está en función de la absorción de NIR. Por lo cual, la ecuación puede ser descrita en términos generales de la siguiente manera (Nebbali *et al.*, 2012; Boulard *et al.*, 2017):

$$c_p \left(\frac{\partial(\bar{\rho}\bar{T})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho}(\bar{u}_j\bar{T})) \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_f + \frac{\mu_t c_p}{Pr_t} \right) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} + S_r \quad (4.2)$$

Donde, c_p calor específico del aire ($J\ kg^{-1}\ K^{-1}$), ρ densidad del aire ($Kg\ m^{-3}$), T temperatura del aire (K o $^{\circ}C$), u_i componente de velocidad ($m\ s^{-1}$), λ_f conductividad térmica del aire ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$), μ_t viscosidad turbulenta del aire ($kg\ m^{-1}\ s^{-1}$), Pr_t número de Prandtl turbulento, S_r término fuente.

4.3.4 Ecuación de modelación radioactiva

El modelo de ordenadas discretas (DO) resuelve la ecuación RTE para un numero finito de ángulos cada uno asociado a una dirección vectorial \vec{s} en el sistema cartesiano global (Bournet *et al.*, 2007; Baxevanou *et al.*, 2010; Nebbali *et al.*, 2012; Bouhoun *et al.*, 2017; Mesmoudi *et al.*, 2017). La distribución de la luminancia $I_\lambda(\vec{r}, \vec{s})$ se obtuvo a través de la solución de la ecuación de transferencia radioactiva (RTE), la activación del submodelo RTE fue utilizado para acoplar el modelo DO y dividir la región espectral del infrarrojo cercano NIR (0.76-1.1 μm) (Bournet *et al.*, 2007; Kichah *et al.*, 2012; Bouhoun, Bournet, Danjou, Morille, & Migeon, 2014).

$$\frac{dI_\lambda(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a_\lambda + \sigma_s)I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) = a_\lambda n^2 I_{b\lambda} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}^1) \phi(\vec{s}, \vec{s}^1) d\Omega \quad (43)$$

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Donde, I_λ es la intensidad de radiación para la longitud de onda ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$), ϕ es la función de fase de dispersión, Ω ángulo sólido, \vec{r} vector de posición (m), \vec{s} vector unitario a lo largo de la dirección de propagación de la radiación, \vec{s}^l dirección del vector de dispersión, σ_s coeficiente de dispersión (m^{-1}), a_λ coeficiente de absorción espectral (m^{-1}), $I_{b\lambda}$ luminancia monocromática de un cuerpo negro ($\text{W m}^{-3} \text{sr}^{-1}$) y n índice de refracción.

El parámetro de radiación se consideró como constante en la longitud de banda. El flujo neto de radiación absorbido por un volumen de control fue entonces definido por la expresión descrita por Nebbali *et al.*, (2012) en donde:

$$S_r = -\overrightarrow{\text{div}} \left[\int_0^\infty \left(\int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{r}, \vec{s}) \vec{s} \, d\Omega \right) d\lambda \right] \quad (4.4)$$

Donde S_r es el término fuente de la ecuación de energía (Ec 1), permitiendo un acoplamiento entre las ecuaciones de transferencia de energía y radiación.

4.3.5 Evaluación del modelo computacional

La evaluación del modelo computacional se llevó a cabo mediante un análisis estadístico entre los datos de temperatura, velocidad del viento, HR y radiación, simulados, y experimentales. Se utilizó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de 0.05 utilizado para contrastar paramétricamente la diferencia de las variables. Los datos del modelo experimental usados para la evaluación se obtuvieron durante el 09 de febrero del 2019 de 14:30 a 15:00.

4.3.6 Escenarios de simulación

Los escenarios simulados fueron planteados a partir de la hipótesis sobre la variación de concentración de fracción de masa de vapor de agua en el aire derivado de las variaciones climáticas temporales. El cambio en la concentración de fracción de masa de vapor de agua en el modelo computacional se realizó con base en el rango de HR registrada en el aire durante el mes de febrero, seleccionando cuatro valores para la simulación: a) 25, b) 38, c)

50 y d) 75 que equivalen a una fracción de masa de vapor de agua de 0.07, 0.010, 0.013 y 0.020, respectivamente. Los resultados obtenidos de las simulaciones permitirán estimar el gradiente térmico generado por los cambios de HR asumiendo que existe un incremento de temperatura al aumentar la concentración de fracción de masa de vapor de agua en el aire del invernadero.

4.4 Resultados

4.4.1 Evaluación del modelo

Para evaluar la viabilidad de uso del modelo computacional se usó un indicador estadístico que mide la correlación entre los valores de temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación simulados, y registrados por los sensores durante el día 09 de febrero del 2019. En la tabla 4.4 se observa que los valores de temperatura y velocidad del viento registrados y simulados son valores próximos entre sí. Para medir esta correlación se utilizó un análisis estadístico ANOVA con un nivel de significancia del 0.05, considerando que si el nivel de significancia es menor al valor de probabilidad p (nivel de significancia < valor p) no hay diferencia significativa entre las variables registradas y simuladas (tabla 4.5). Por lo tanto, el modelo evaluado puede ser usado en las simulaciones.

Tabla 4.4. Datos de temperatura y velocidad del viento en los modelos evaluados.

Sensor	Temperatura (°C)		Velocidad (m s ⁻¹)	
	Experimental	Simulado	Experimental	Simulado
T1	33.83	29.78	0.01	0.01
T2	31.55	29.62	0.05	0.01
T3	33.10	34.13	0.02	0.03
T4	32.32	32.78		
T5	32.67	33.75		
T6	33.81	31.49		
T7	32.97	34.89		
Eddy	31.09	28.96		

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Tabla 4.5. Comparación entre el nivel de significancia y el valor p

Temperatura	0.05 < 0.41
Humedad	0.05 < 0.08
Velocidad del viento	0.05 < 0.50
Radiación	0.05 < 0.99

4.4.2 Análisis de resultados de escenarios simulados

El análisis ambiental de los escenarios simulados se realizó con base en la concentración de vapor de agua en el aire, temperatura, NIR y déficit de presión de vapor (DPV). Indicadores usados para gestionar el ambiente del invernadero y mantener condiciones aptas para cultivar tomate dentro de él. El análisis de la influencia de la concentración de fracción de masa de vapor de agua sobre la temperatura se realizó en la nave central a 8.75, 17.5 y 26.25 m (A) entrada, B) centro, C) salida) de distancia de la entrada de aire predominante del invernadero (Figura 4.2). Se registraron 80 puntos en vertical de temperatura desde una altura de 1 m a 3.5 m del invernadero en cada zona y para cada escenario. Se seleccionaron estas distancias para el análisis, dado que en la nave central es donde existe un mayor gradiente térmico y de humedad en el aire entre la zona de barlovento y sotavento.

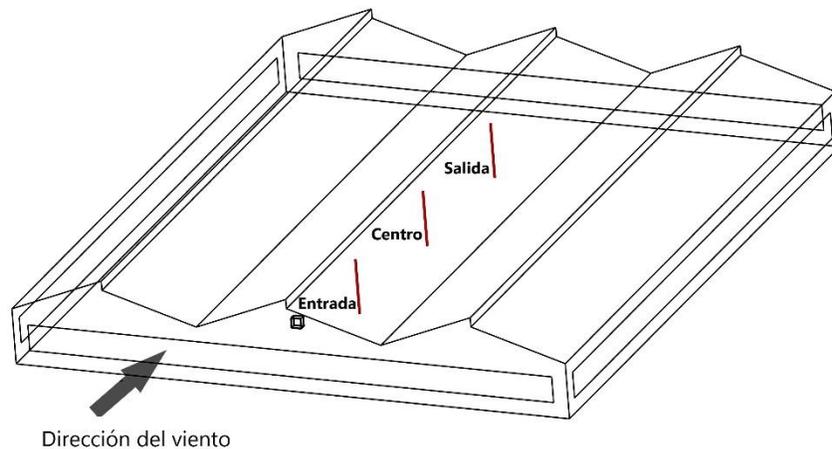


Figura 4.2. Toma de datos de los escenarios simulados para el análisis ambiental en la nave central del invernadero, en la zona de entrada centro y salida.

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Los resultados de la figura 4.3 entrada y centro mostraron un incremento de temperatura con relación al aumento de fracción de masa de vapor de agua en los escenarios simulados. Sin embargo, en la zona cercana a la salida el gradiente térmico no es significativo ($0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$) entre los escenarios a, b y c. Concluyendo que en la zona cercana a la salida el incremento en la fracción de masa de vapor de agua no influye sobre el aumento de temperatura.

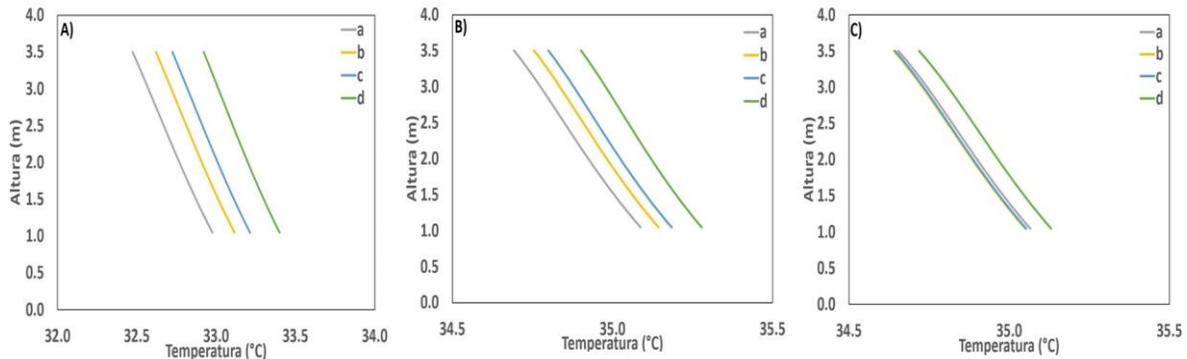


Figura 4.3. Distribución de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) para todos los escenarios simulados a una altura desde 1-3.5 m en la A) entrada, B) centro, C) salida de la nave central del invernadero.

Para calcular el DPV en el invernadero se programó la ecuación con una función definida por el usuario (UDF). El valor de DPV se estimó como la diferencia entre el valor de presión de vapor de saturación y la presión de vapor real del aire, método recomendado por Howell y Dusek (1995), y FAO (2006). El análisis del invernadero se realizó en todos los escenarios simulados como un promedio de diez datos de los resultados obtenidos a una altura de 1.9-2 m en la entrada, centro y salida de la nave central. Los resultados de la tabla 4.6 mostraron que bajo las condiciones ambientales del modelo evaluado y un cambio en la fracción de masa de vapor de agua existe un gradiente térmico en la entrada de $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$, en el centro de $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la salida de $0.07\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El aumento de temperatura se genera debido a la absorción de NIR por el vapor de agua. Sin embargo, cuando la fracción de masa de vapor de agua permanece constante en el aire en la zona centro y salida del invernadero, el gradiente de HR es mínimo (0.3%). Por lo cual, el efecto térmico generado por el intercambio de energía entre el vapor de agua y el NIR es

despreciable. En todos los escenarios existe una reducción entre la HR exterior y la del invernadero con un gradiente que oscila entre los 45 a 55% originado por la baja velocidad del viento exterior (0.64 m s^{-1}) y la malla anti-insectos en las ventanas.

Tabla 4.6. Promedio de diez datos de las variables de T, HR y DPV simuladas a una altura de 1.9 a 2 m en la zona de entrada, centro y salida de la nave central del invernadero.

Lugar	Escenario	T (°C)	HR (%)	DPV (kPa)
Entrada	a	32.78	13.31	4.31
	b	32.92	20.42	3.98
	c	33.02	26.26	3.71
	d	33.21	38.97	3.11
Centro	a	34.93	11.80	4.94
	b	34.99	18.20	4.60
	c	35.03	23.47	4.31
	d	35.13	35.02	3.68
Salida	a	34.91	11.82	4.93
	b	34.89	18.30	4.57
	c	34.90	23.65	4.27
	d	34.97	35.32	3.63

El aumento de temperatura al interior del invernadero dado el aumento en la fracción de masa de vapor de agua en el aire no es significativo con incrementos de temperatura que oscilan entre los 0.02 a 0.43 °C (Tabla 4.7). Por tal motivo, se infiere que la temperatura permanece constante bajo las condiciones simuladas y no es influenciada por la variación de fracción de masa de vapor de agua.

Se realizó la simulación del escenario b y d con un cambio en la intensidad emitida por el NIR (50 y 130 W m^{-2}) para analizar el efecto que tiene sobre la temperatura. Los resultados de las simulaciones (Tabla 4.7 y 4.8) muestran que cuando existe un cambio en la intensidad de NIR, el mayor gradiente térmico (0.23 °C) se presenta en la zona centro y salida de la nave 2 del invernadero, lugar donde las velocidades del viento se encuentran por debajo de los 0.02 m s^{-1} y donde el movimiento de aire es generado por el efecto convectivo provocado por

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

las diferencias de temperatura, tal y como lo demuestran Sun *et al.*, 2014 y Zeroual *et al.*, (2018) en donde velocidades del viento cercanas a 1 m s^{-1} son insuficientes para renovar el aire dentro del invernadero afectando el transporte de calor y masa entre el exterior e interior.

Derivado del cambio de concentración de fracción de masa de vapor de agua y la intensidad de NIR en los escenarios simulados, el mayor gradiente térmico se presenta en la zona de entrada ($0.46 \text{ }^\circ\text{C}$), lugar donde la HR del invernadero es mayor debido al intercambio de aire entre el exterior e interior. Por lo cual, se puede asumir que el gradiente de temperatura generado es despreciable, dado que en la mayor parte del invernadero oscila entre los $0.1\text{-}0.25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tabla 4.7. Análisis ambiental en el invernadero con un cambio en la intensidad de NIR para el escenario b

Lugar	T ($^\circ\text{C}$)	HR (%)	NIR (W/m^2)	DPV (kPa)
Entrada	32.75	20.61	60.46	3.94
	32.83	20.52	157.18	3.96
	32.92	20.42	263.13	3.98
Centro	34.78	18.41	66.33	4.53
	34.88	18.31	172.47	4.56
	34.99	18.20	288.72	4.60
Salida	34.66	18.53	68.45	4.50
	34.77	18.42	177.98	4.53
	34.89	18.30	297.94	4.57

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Tabla 4.8. Análisis ambiental en el invernadero con un cambio en la intensidad de NIR para el escenario d

Lugar	T (°C)	HR (%)	NIR (W/m²)	DPV (kPa)
Entrada	33.04	39.34	60.46	3.06
	33.12	39.16	157.18	3.08
	33.21	38.97	263.13	3.11
Centro	34.91	35.44	66.33	3.61
	35.02	35.24	172.47	3.64
	35.13	35.02	288.72	3.68
Salida	34.74	35.78	68.45	3.56
	34.85	35.56	177.98	3.59
	34.97	35.32	297.94	3.63

En la figura 4.4 se muestra la distribución de HR y el DPV al interior del invernadero en los escenarios simulados a una altura de 1.5 m. Los resultados indican que el escenario d presenta mejores condiciones ambientales para el tomate. No obstante, se tiene una reducción de HR entre el exterior e interior del invernadero del 53% ocasionando que se encuentre fuera del óptimo deseable (50-60%) para el tomate (Huerres & Caraballo, 1988). El déficit de HR dentro del invernadero provocó un aumento del DPV con valores superiores a los 1.3 kPa para todos los escenarios simulados, valores fuera del rango para el tomate (0.3-1.25 kPa) según Grange *et al.*, (1987); Körner *et al.*, (2003); Shtienberg (2007). Los valores del DPV de la figura 4.4 muestran que bajo las condiciones de los escenarios simulados, el cultivo dentro del invernadero presentaría una alta tasa de transpiración causando el cierre de sus estomas e infiriendo en su crecimiento (López, 2005).

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

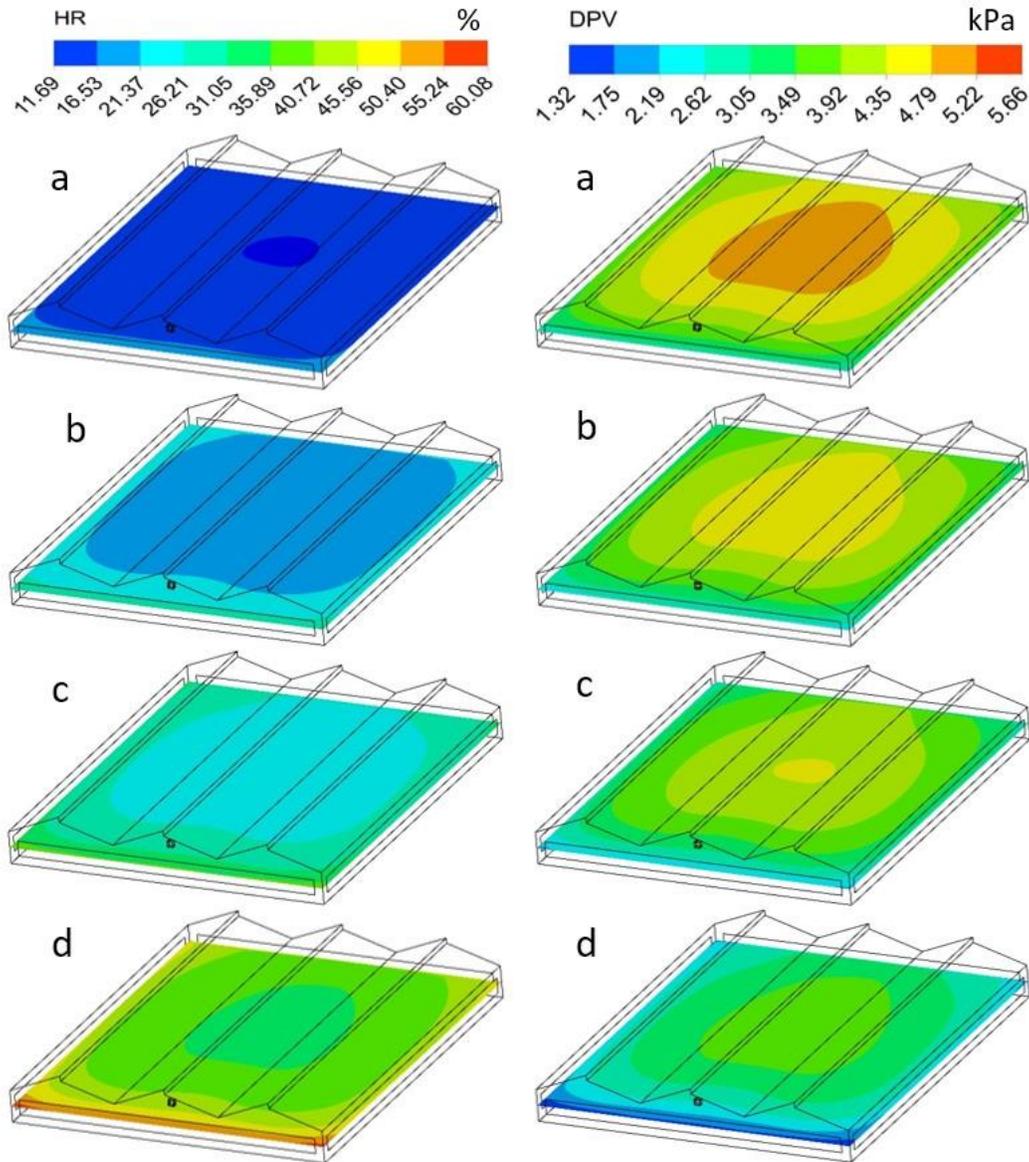


Figura 4.4. Distribución de HR (%) y DPV (kPa) en el invernadero a 1.5 m de altura en los escenarios de simulación.

Se simuló el escenario d considerando la velocidad del viento media mensual (1.59 m s^{-1}) durante el mes de febrero en Texcoco según datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). La finalidad de simular bajo estas condiciones es predecir el comportamiento ambiental que se puede presentar al incrementar la velocidad. Los resultados de la figura 4.5 muestran mejores condiciones ambientales para el cultivo de tomate en comparación del

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

escenario d de la figura 4.4 con un descenso de temperatura y DPV que oscila entre los 4-6 °C y 1.15-1.5 kPa, respectivamente. Así mismo, presenta un incremento de HR entre 9.2-16% en todo el invernadero. No obstante, estos cambios generados no son suficientes para mantener una HR entre 50-60%, temperatura por debajo de los 30 °C y un DPV entre 0.3-1.25 kPa.

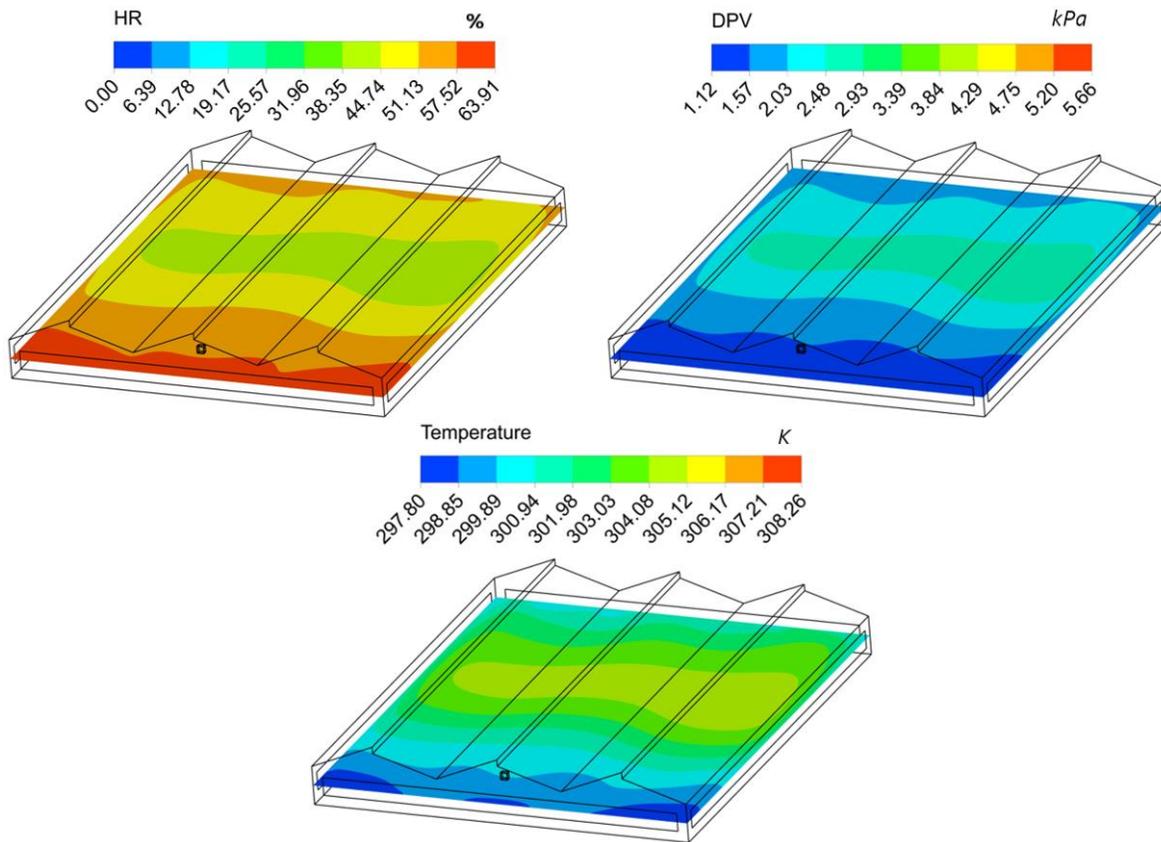


Figura 4.5. Distribución de HR (%), DPV (kPa) y temperatura (K) en el invernadero a 1.5 m de altura en el escenario d con una velocidad del viento de 1.59 m s⁻¹.

Los resultados de las simulaciones realizadas en este trabajo ratifican lo descrito por Chu, Lan, Tasi, Wu y Yang (2017); Tong *et al.*, (2018) en donde longitudes superiores a seis veces la altura del invernadero presentan problemas en la tasa de ventilación derivado de la obstrucción generada por la malla anti-insectos y la longitud del invernadero. Por lo que se recomienda el uso ventiladores y extractores para evitar zonas estancadas en el centro de las

naves del invernadero cuando la ventilación natural es insuficiente para mejorar la tasa de ventilación (Bournet *et al.*, 2010; Teitel *et al.*, 2014).

4.5 Conclusiones

La zona de entrada de aire del invernadero es la que presenta mayor intercambio de energía en todos los escenarios simulados con un incremento de temperatura de 0.46 °C generado por la absorción de NIR y por el intercambio de aire entre el exterior e interior. Los escenarios del invernadero no presentaron condiciones ambientales favorables para el cultivo de tomate. La temperatura superó los 30 °C con un gradiente térmico promedio entre el exterior e interior de hasta 9 °C originando un déficit de HR e incremento del DPV a valores superiores de 2 kPa que, en consecuencia, provocarían en el tomate un exceso de transpiración y un esperado cierre de estomas. El gradiente de temperatura entre el exterior e interior del invernadero es resultado de la baja velocidad del viento (0.64 m s⁻¹) y la malla anti-insectos ocasionando que dentro del invernadero el movimiento de aire sea generado por la diferencia de temperaturas del suelo y aire. Las condiciones ambientales mejoraron cuando se simuló el escenario con la velocidad del viento media mensual del mes de febrero (1.59 m s⁻¹) en Texcoco. Sin embargo, no fue suficiente para mantener condiciones ambientales favorables. De aquí se infiere que la ventilación natural es insuficiente para reducir el gradiente térmico e incrementar la HR a valores aceptables para el tomate. Por lo tanto, se recomienda el uso de ventiladores y extractores para aumentar el transporte de calor y masa entre el exterior e interior, y ayudar a distribuir homogéneamente la HR y temperatura en la zona estancada del invernadero (en el centro de las naves).

4.6 Referencias

Bartzanas, T., Boulard, T., & Kittas, C. (2004). Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering*, 88(4).

Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2010). Numerical simulation of solar radiation, air flow and temperature distribution in a naturally ventilated tunnel greenhouse. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 12(3–4), 48–67.

Baxevanou, C., Fidaros, D., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2018). Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 54–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.006>

Bot, G. P. A. (1983). Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model, Ph. D Thesis, Agricultural University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands.

Bouhoun, Ali, H., Bournet, P. E., Cannavo, P., & Chantoiseau, E. (2017). Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction. *Computers and Electronics in Agriculture*, 149, 26-40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.06.021>

Bouhoun, Ali, H., Bournet, P. E., Danjou, V., Morille, B., & Migeon, C. (2014). CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: Sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties. *Biosystems Engineering*, 127(0), 159–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.08.017>

Boulard, T., Roy, J. C., Pouillard, J. B., Fatnassi, H., & Grisey, A. (2017). Modelling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 158, 110–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.001>

Bournet, P., & Boulard, T. (2010). Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: a review of experimental and CFD studies. *Comput. Electron. Agric.*, 74, 195–217.

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Bournet, P. E., Ould-Khaoua, S. A., & Boulard, T. (2007). Numerical prediction of the effect of vents arrangement on the ventilation and energy transfer in a multispans glasshouse using a bi-band radiation model. *Biosystems Engineering*, 98, 224-234.

Camelia, S., Dorin, S., & Alexandru, D. (2016). Effect of greenhouse orientation with respect to E-W axis on its required heating and cooling loads. *Energy Procedia*, 85, 498-504.

Campen, J. B., & Bot, G. P. A. (2003). Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics. *Biosyst. Eng.*, 84(1), 69–77.

Cartagena, J. (2004). *El agua en las plantas*. Bogotá, Colombia, 9.

Cemek, B., Atiş, A., & Küçüktopçu, E. (2017). Evaluation of temperature distribution in different greenhouse models using computational fluid dynamics (CFD). *Anadolu Journal of Agricultural Sciences*, 32(1), 54–54. DOI: <https://doi.org/10.7161/omuanajas.289354>

Chen, J., Xu, F., Tan, D., Shen, Z., Zhang, L., & Ai, Q. (2015). A control method for agricultural greenhouses heating based on computational fluid dynamics and energy prediction model. *Appl. Energy*, 141, 106–118.

Chu, C. R., Lan, T. W., Tasi, R. K., Wu, T. R., & Yang, C. K. (2017). Wind-driven natural ventilation of greenhouses with vegetation. *Biosystems Engineering*, 164, 221–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.008>

Dik, A., & Wubben, J. (2007). Epidemiology of Botrytis cinerea diseases in greenhouses. In: Elad, Y., Williamson, B., Tudzynsky, P., & Delen, N. (eds). *Botrytis: Biology, Pathology and Control*. Dordrecht. Holanda, 319-331.

Fernandez, M., Orgaz, F., Fereres, E., Lopez, J., Cespedes, A., Perez, J., Bonachela, S., & Gallardo, M. (2001). *Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español*. Caja Mar. Barcelona, España, 71.

“Desarrollo de un modelo numérico para evaluar el ambiente de invernaderos dedicados a la producción intensiva de tomate”

Food Agricultural Organization (FAO). (2006). *Evapotranspiración del cultivo*. Roma, Italia, 298.

Fidaros, D., Baxevanou, C. A. B. T., & Kittas, C. (2010). Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Renew. Energy*, 35, 1380–1386.

Geoola, F., Kashti, Y., & Peiper, U. M. (1998). A model greenhouse for testing the role of condensation, dust and dirt on the solar radiation. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 71(4), 339-346.

Grange, R., & Hand, D. (1987). A review of the effects of atmospheric humidity on the growth of horticultural crops. *Journal of Horticultural Science*, 62(2), 125-134.

Howell, T., & Dusek, D. (1995). Comparison of vapor pressure deficit calculation methods, southern high plains. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121(2), 191-198.

Huerres, P. C., & Caraballo, N. (1988). *Horticultura*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, Cuba, 193.

Kendirli, B. (2006). Structural analysis of greenhouses: a case study in Turkey. *Building and Environment*, 41(7), 864-871.

Kindelan, M. (1980). Dynamic modelling of greenhouse environment. *Transactions of the Asae*, 23(5), 1232-1239.

Kim, K., Yoon, J., Kwon, H., Han, J., Son, J. E., Nam, S., Giacomelli, G., & Lee, I. (2008). 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosystems Eng.*, 100(2), 245- 255.

Kichah, A., Bournet, P. E., Migeon, C., & Boulard, T. (2012). Measurements and CFD simulations of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse. *Biosystems Engineering*, 112, 22-34.

Körner, O., Challa, H. (2003) Process-Based Humidity Control Regime for Greenhouse Crops. *Comp. and Electr. in Agric.*, 39, 173-192.

Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). Lectures in Mathematical Models of Turbulence. *Academic Press*, London.

Launder, B. E., Spalding, D. B., (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269-289.

Liu, J. Q., Yin, C., & Zhao, H. D. (2003). Ventilation management of solar greenhouse. *Vegetables*, 2, 33–34.

Lopez, J. (2005). *Control climático en invernaderos*. Novedades agrícolas. Murcia, España, 4.

Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., & Bourden, L. (2009). Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(6-7), 1050-1062.

Mesmoudi, K., Meguallati, K. H., & Bournet, P. E. (2017). Effect of the greenhouse design on the thermal behavior and microclimate distribution in greenhouses installed under semi-arid climate. *Heat Transfer - Asian Research*, 46(8), 1294–1311. DOI: <https://doi.org/10.1002/htj.21274>

Mobtaker, H. G., Ajabshirchi, Y., Ranjbar, S. F., & Matloobi, M. (2018). Simulation of thermal performance of solar greenhouse in north-west of Iran: an experimental validation. *Renewable Energy*, 135, 88-97. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.10.003>

Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., & Álvarez, A. J. (2004). Measurement and simulation of climate inside Almeria-type greenhouses using computational fluid dynamics. *Agric. For. Meteorol.*, 125, 33–51.

Molina-Aiz, F. D., Valera, D. L., Peña, A. A., Gil, J. A., & López, A. (2009). A study of natural ventilation in an Almería-type greenhouse with insect screens by means of tri sonic anemometry. *Biosys. Eng.*, 104, 224–242.

Morille, B., Migeon, C., & Bournet, P. E. (2013). Is the PenmanMonteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. *Scientia Horticulturae*, 152, 80-91.

Muñoz, P., Montero, J., Anton, A., & Iglesias, N. (2004). Computational fluid dynamic modelling of night-time energy fluxes in unheated greenhouses. *Acta Horticulturae*, 691, 403-410.

Nebbali, R., Roy, J. C., & Boulard, T. (2012). Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse. *Renew Ener.*, 43, 111–129.

Prenger, J., & Ling, P. (2001). *Greenhouse condensation control, understanding and using vapor pressure deficit (VPD)*. Extension Factsheet. The Ohio State University. Estados Unidos, 4.

Rico-Garcia, E., Soto-Zarazua, G., Alatorre-Jacome, O., De la Torre-Gea, G. A., & Gomez-Melendez, D. J. (2011). Aerodynamic study of greenhouses using computational fluid dynamics. *Int. J. Phys. Sci.*, 6, 6541–6547.

Roy, J. C., Pouillard, J. B., Boulard, T., Fatnassi, H., & Grisey, A. (2014). Experimental and CFD results on the CO₂ distribution in a semi-closed greenhouse. *Acta Horticulturae (ISHS)*, 1037, 993-1000.

Senhaji, A., Majdoubi, H., Mouqalid, M., De, E., & Meknès, E. (2017). Solar Distribution in a Greenhouse at Different Crops Orientation during Production Season. *13ème Congrès de Mécanique*, 13–15.

Sethi, V. P., & Sharma, S. K. (2007). Thermal modeling of a greenhouse integrated to an aquifer coupled cavity flow heat exchanger system, *Sol. Energy*, 81, 723–741.

Sethi, V. P. (2009). On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation, *Sol. Energy*, 83, 21–38.

Shtienberg, D. (2007). Rational management of Botrytis-incited diseases: integration of control measures and use of warning systems. In: Elad, Y., Williamson, B., Tudzynsky, P., & Delen, N. (eds). *Botrytis: Biology, Pathology and Control*. Dordrecht. Holanda, 335-346.

Sun, M., Luo, W. H., Feng, W. L., Xiang, L., & Fu, X. G. (2014). A web-based expert system for diagnosis and control management of diseases in vegetable crops cultivated under protected conditions. *J. f Nanjing Agric. Univ.*, 37, 7–14.

Teitel, M., & Wenger, E. (2014). Air exchange and ventilation efficiencies of a monospan greenhouse with one inflow and one outflow through longitudinal side openings. *Biosyst. Eng.*, 119, 98–107.

Teitel, M., Liran, O., Tanny, J., & Barak, M. (2008). Wind driven ventilation of a mono-span greenhouse with a rose crop and continuous screened side vents and its effect on flow patterns and microclimate. *Biosyst. Eng.*, 101, 111–122.

Tong, G., Christopher, D., Li, T., & Wang, T. (2013). Passive solar energy utilization: a review of cross-section building parameter selection for Chinese solar greenhouses. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 540-548.

Wang, X. W., Luo, J. Y., & Li, X. P. (2013). CFD based study of heterogeneous microclimate in a typical Chinese Greenhouse in Central China. *J. Integr. Agric.*, 12(5), 914–923.

Zeroual, S., Bougoul, S., & Benmoussa, H. (2018). Effect of Radiative Heat Transfer and Boundary Conditions on the Airflow and Temperature Distribution Inside a Heated Tunnel Greenhouse. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 59(6), 1008–1014. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021894418060068>

5 CONCLUSIONES GENERALES

CFD fue utilizado para el análisis de variables ambientales de impacto en producción de tomate en invernaderos. Los planteamientos de este trabajo de investigación fueron: i) el desarrollo de una metodología para estimar la acumulación de GDC dentro del invernadero calculados con CFD, ii) la modelación del ambiente del invernadero para analizar el efecto de la configuración de los calefactores eléctricos sobre la temperatura y iii) el efecto de la distribución de humedad relativa y la intensidad de NIR sobre el gradiente térmico y el déficit de presión de vapor.

La herramienta numérica CFD fue útil en el análisis de variables climáticas, en particular, los patrones de distribución de temperatura simulados en un invernadero de baja tecnología. Los estudios mostraron la repercusión a causa de la longitud del invernadero afectando la homogeneidad espacial, y ocasionando que predominen las fuerzas convectivas en la mayor parte del invernadero.

Basado en simulaciones de un modelo CFD para un invernadero en el municipio de Texcoco fue posible obtener un ciclo de cultivo de tomate dadas las condiciones ambientales presentes y en Navolato hasta cuatro. No obstante, bajo las condiciones simuladas en los meses de junio a octubre dentro del invernadero de Navolato se presentan temperaturas superiores a los 30°C. Por lo cual, este estudio recomienda limitar el periodo del ciclo del tomate a los meses donde las temperaturas no superen el umbral máximo de temperatura del tomate 30°C. En Texcoco dada la baja acumulación de GDC, la recomendación para el ciclo del cultivo se sugiere que sea durante los meses con temperaturas más altas del año (marzo-septiembre).

La diversidad de climas segmenta México en diferentes regiones con inviernos suaves y cortos, en cuyo caso la exigencia de calefacción es temporal en función del descenso de las temperaturas. Del análisis climático bajo esas condiciones se estudió el efecto de la posición y dirección de los calefactores eléctricos en la generación de gradientes térmicos. Los resultados de las simulaciones mostraron que la dirección del flujo de calor tiene mayor influencia sobre la homogenización térmica en el invernadero. No obstante, los sistemas

conocidos como aéreos mostraron no ser la mejor opción para homogenizar la temperatura, dado que la distribución en la zona cercana al calefactor ocurre por la transición a flujo turbulento y en la zona más alejada la distribución es ocasionada por efecto de las fuerzas flotantes térmicas asociadas a un régimen de flujo laminar.

Con el creciente interés en el cambio climático, sus orígenes, evolución y mitigación, la producción agrícola puede enfrentar escenarios de incertidumbre para garantizar abastecimiento de alimentos. La simulación del clima en invernaderos usando un modelo CFD permite evaluar el intercambio de energía y masa entre el exterior e interior. De estos estudios fue encontrado que el mayor gradiente térmico ocurre con un aumento en la intensidad de NIR y en la concentración de fracción de masa de vapor de agua en el aire. Sin embargo, este gradiente de temperatura en la zona cercana sotavento fue menor a 0.2 °C.

Aunque los métodos y herramientas presentados en este estudio son recomendados para establecer fechas de siembra, optimizar el manejo del invernadero y mejorar las prácticas agrícolas. Derivado de este estudio se aconseja realizar la experimentación física junto con la modelación numérica para tener una validación efectiva de la gestión ambiental del invernadero.

6 RECOMENDACIONES PARA FUTUROS ESTUDIOS

Con los resultados logrados en esta investigación es posible plantear futuras investigaciones que permitan afianzar y complementar, lo que esta tesis documentó, entre las más importantes son:

- En el objetivo específico 1 es importante analizar el ambiente del invernadero considerando datos de las normales climatológicas de temperatura mínima y máxima mensual como condición de entrada para el modelo computacional, con la finalidad de cumplir las exigencias ambientales del cultivo de tomate durante el día y la noche en las fechas propuestas de siembra. Debido a que, es necesario evaluar si efectivamente se puede obtener un ciclo del cultivo de tomate durante las fechas propuestas.
- La investigación del objetivo específico 2 se centró en el efecto que tiene la posición y dirección del calefactor sobre el ambiente del invernadero. Sin embargo, es necesario considerar la influencia que puede tener el cultivo de tomate sobre la distribución de temperaturas generadas por el calefactor al interior del invernadero.
- Para el objetivo 3 es necesario estimar el impacto térmico que podría tener la aportación de vapor de agua y CO₂ generados por el cultivo al interior del invernadero. El vapor de agua y CO₂ presentan mayor absorción de NIR y que están relacionados con el confort de los cultivos dentro del invernadero.