

Estimación del ciclo de cultivo de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero, con base en grados días calor (GDC) simulados con CFD

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) crop cycle estimation in greenhouse, based on degree day heat (GDC) simulated in CFD

Cruz Ernesto Aguilar-Rodríguez¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5120-022X>

Jorge Flores-Velázquez², ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0895-4645>

Fernando Rojano-Aguilar³

Waldo Ojeda-Bustamante⁴

Mauro Iñiguez-Covarrubias⁵

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, cruz.aguilar@posgrado.imta.edu.mx

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, jorge_flores@tlaloc.imta.mx

³Gus R. Douglass Institute, West Virginia State University, Institute, West Virginia, USA, fernando.rojano@wvstateu.edu

⁴Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México, w.sincuenta@gmail.com

⁵Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México,
mic@tlaloc.imta.mx

Autor para correspondencia: Cruz Ernesto Aguilar Rodriguez,
cruz.aguilar@posgrado.imta.edu.mx

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 se puedan cultivar dos ciclos.

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

Abstract

The degree days heat (GDC) are an indicator of the growth of a crop, which can be used to infer the duration of the tomato cycle under greenhouse. Inferring the duration of the crop cycle, based on temperature, means the possibility of scheduling sowing dates, managing resources and establishing better agricultural practices. The objective of this work was to simulate the thermal behavior of a greenhouse using CFD, under environmental conditions of Navolato, Sinaloa, and Texcoco, State of Mexico, to estimate the duration of the tomato cycle as a function of the GDC for agronomic purposes. The prediction of temperatures inside the greenhouse was made through of a numerical model based on CFD. The simulation results were used to quantify GDC and estimate the duration of the tomato cycle based on its temperature requirement. In Navolato, Sinaloa, 5 772.01, 6 128.34 and 6 411.93 annual GDC were estimated at the entrance, center and exit of greenhouse, respectively. The increase in annual GDC accumulation favors short cycles and consequently increases the number of cycles per year (more than two

tomato cycles). In Texcoco, state of Mexico, were estimated 2 447.94, 2 803.5 and 3 076.09 GDC annual, in the entry, center and exit of greenhouse, respectively, which limits to cultivate naturally only one cycle. However, if temperatures in the last third of the greenhouse are favored, it is estimated that two cycles can be cultivated.

Keywords: Spatial temperature distribution, computational model, tomato.

Recibido: 09/04/2019

Aceptado: 06/10/2019

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-Straalen, 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 (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 (i), de

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

$$^{\circ}D_i = \bar{T}_i - T_{c-\text{mín}} \text{ si } \bar{T}_i < T_{c-\text{máx}} ; ^{\circ}D_i = T_{c-\text{máx}} - T_{c-\text{mín}} \text{ si } \bar{T}_i \geq T_{c-\text{máx}} ; ^{\circ}D_i = 0 \text{ si } \bar{T}_i \leq T_{c-\text{mín}} \quad (1)$$

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 ($4^{\circ} 38'02, 55''$ N; $74^{\circ} 20'07, 57''$ 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.

Metodología

Sitio experimental

El invernadero prototipo es de tipo cenital con tres capillas, cuenta con sistema de ventilación pasiva que consiste de ventanas cenitales y frontales. La estructura está cubierta de polietileno translúcido y malla antiinsecto 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 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.

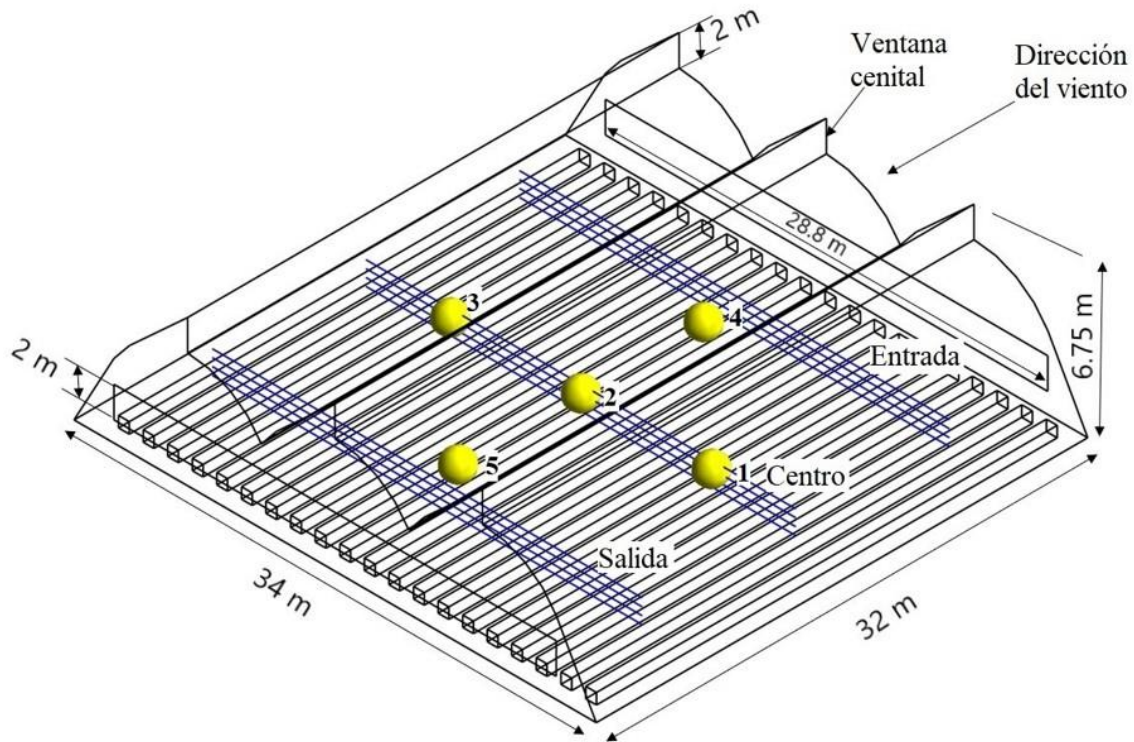


Figura 1. Dimensiones, ubicación de los sensores y las zonas de análisis de temperaturas en el invernadero.

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 1.

Tabla 1. Dimensiones (m) y número de elementos de la malla.

	Invernadero	Dominio exterior	Zona de cultivo
Dimensiones	34 x 32 x 4.75	170 x 192 x 22.35	31 x 30 x 0.7
Número de elementos	32 895	382 818	400

En la fase de proceso se definieron las condiciones del modelo (Tabla 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. Condiciones de frontera del modelo computacional.

Condiciones de frontera	Método
Solucionador	Basado en presión
Estado	Estacionario
Modelo de viscosidad	Estándar $k-\epsilon$ (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
	Coeficiente 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

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

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 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 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)
Enero	19.4	3.1	12.5	3.6
Febrero	20.2	3.1	14.0	3.9
Marzo	21.8	3.1	16.3	4.0
Abril	23.8	3.1	18.0	3.7
Mayo	26.3	3.2	18.9	2.8
Junio	29.6	3.3	18.7	2.5
Julio	30.2	2.7	17.8	2.7
Agosto	30.3	2.5	17.8	2.5
Septiembre	29.8	2.6	17.5	2.6
Octubre	28.3	2.7	16.2	2.7
Noviembre	24.1	3.0	14.4	3.0
Diciembre	20.1	3.1	12.9	3.3

Cálculo de GDC y GDE en el invernadero

Las temperaturas de los escenarios simulados se emplearon en el cálculo de los GDC (Ecuación (2)) mediante la fórmula aplicada por Rodríguez y Flórez (2006):

$$GDC = \left(\frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} \right) - T_{\text{base}} \quad (2)$$

Donde el término $(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})/2$ 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 (3)) y el número correspondiente de días con necesidades de enfriamiento 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).

$$GDE = T_d - T_b \quad (3)$$

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.

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 Soledad de Graciano Sánchez, en San Luis Potosí (Tabla 4 y Tabla 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 4. Datos de temperatura (°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 5. Datos de temperatura (°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 °C (Figura 2, a y b), y en Navolato de 19 a 33 °C (Figura 2, c y d) durante el año. En Navolato, durante el mes de junio (Figura 2, d), la temperatura alcanzó valores de 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.

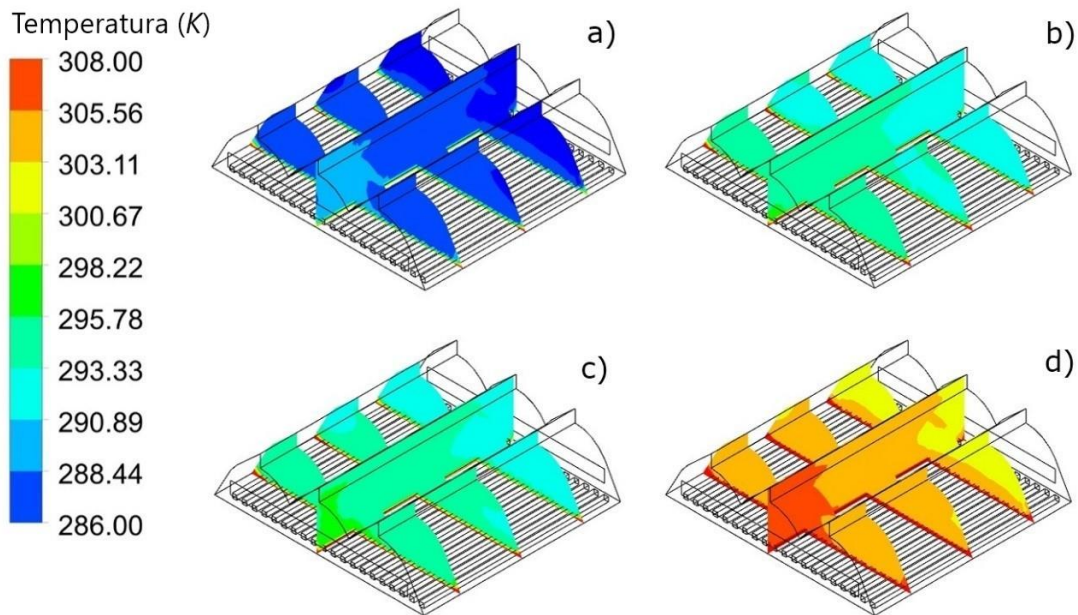


Figura 2. Distribución de temperaturas en el invernadero en Texcoco, Estado de México, en los meses de a) enero y b) junio. En Navolato, Sinaloa, en c) enero y d) junio.

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), se realizó un análisis espacial de temperaturas a 1, 1.5, 2 y 2.5 m del suelo de 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 1).

Los resultados de la Figura 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.

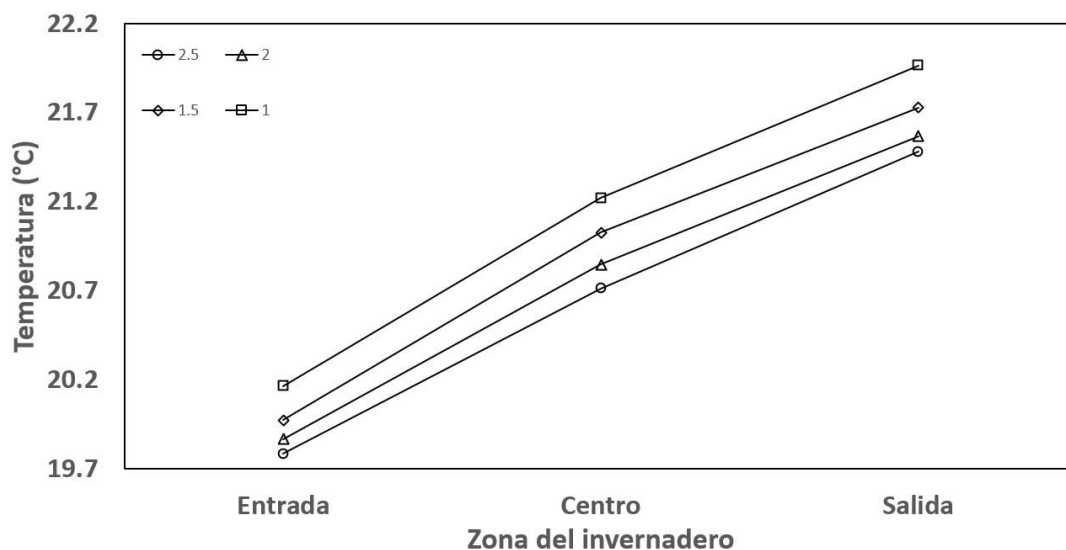


Figura 3. Distribución de temperaturas en el invernadero en Navolato, Sinaloa, durante el mes de enero, a una altura de 1 m (□), 1.5 m (◇), 2 m (Δ) y 2.5 m (°).

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 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 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
Enero	88.9	119.3	136.3	305.9	336.4	358.6
Febrero	211.5	269.2	300.2	603.8	661.5	704.1
Marzo	417.4	505.3	550.9	984.5	1 072.7	1 137
Abril	670.3	787.5	849.1	1 411.2	1 528.8	1 613.9
Mayo	959.9	1 107.3	1 194.4	1 930.4	2 078.3	2 184.5
Junio	1 236.7	1 413.2	1 528.9	2 530.9	2 708.3	2 833.6
Julio	1 494.4	1 700.9	1 844.5	3 172.2	3 379.6	3 531.9
Agosto	1 752.4	1 989.1	2 162.6	3 816.5	4 054	4 236.6
Sep.	1 992.2	2 258.1	2 459.9	4 425.6	4 692.3	4 903.1

Oct.	2 198.3	2 494.3	2 723.4	5 007.3	5 304.1	5 541.7
Nov.	2 344.0	2 669.2	2 921.7	5 443.5	5 769.4	6 030.5
Dic.	2 447.9	2 803.5	3 076.1	5 772	6 128.3	6 411.9

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 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 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.

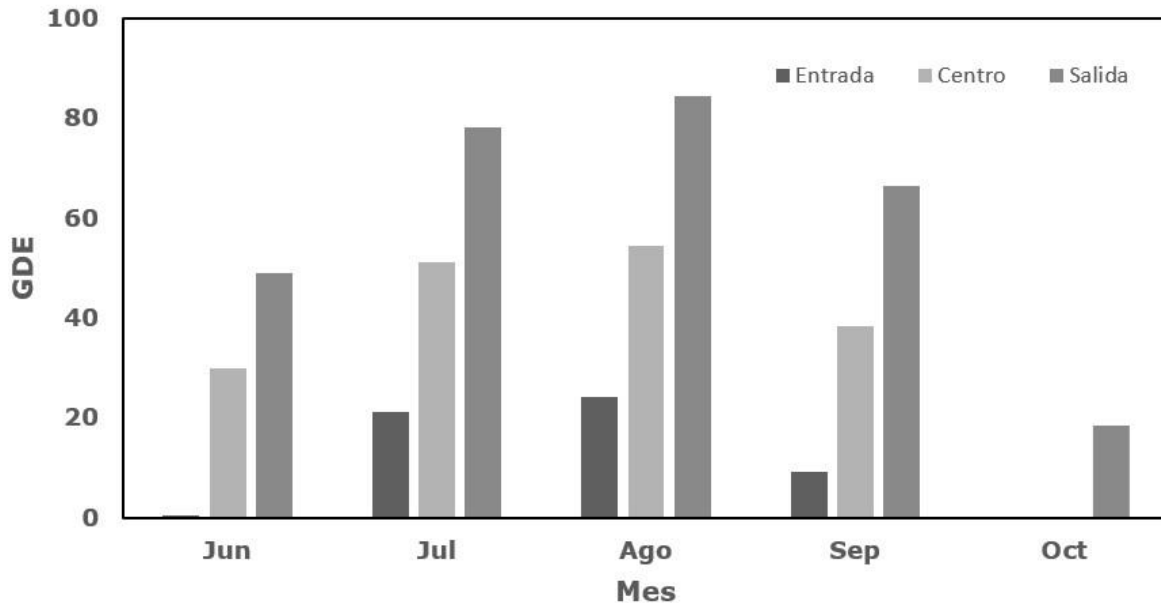


Figura 4. Acumulación mensual de GDE al interior del invernadero en el municipio de Navolato, Sinaloa, a temperatura base de 30 °C.

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 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 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
Mayo	31	289.6	31	319.7	31	345.2
Junio	61	566.4	61	625.7	61	679.8
Julio	92	824.1	92	913.5	92	995.4
Agosto	123	1 082.1	123	1 201.6	123	1 313.5
Sep.	153	1 321.9	145	1 398.5	132	1 398.5
Oct.	165	1 398.5				

En Navolato (Tabla 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 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
Enero	92	1 070.7	92	1 160.5	92	1228.9
Febrero	120	1 368.5	113	1 398.5	106	1398.5
Marzo	123	1 398.5				

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, 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 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.

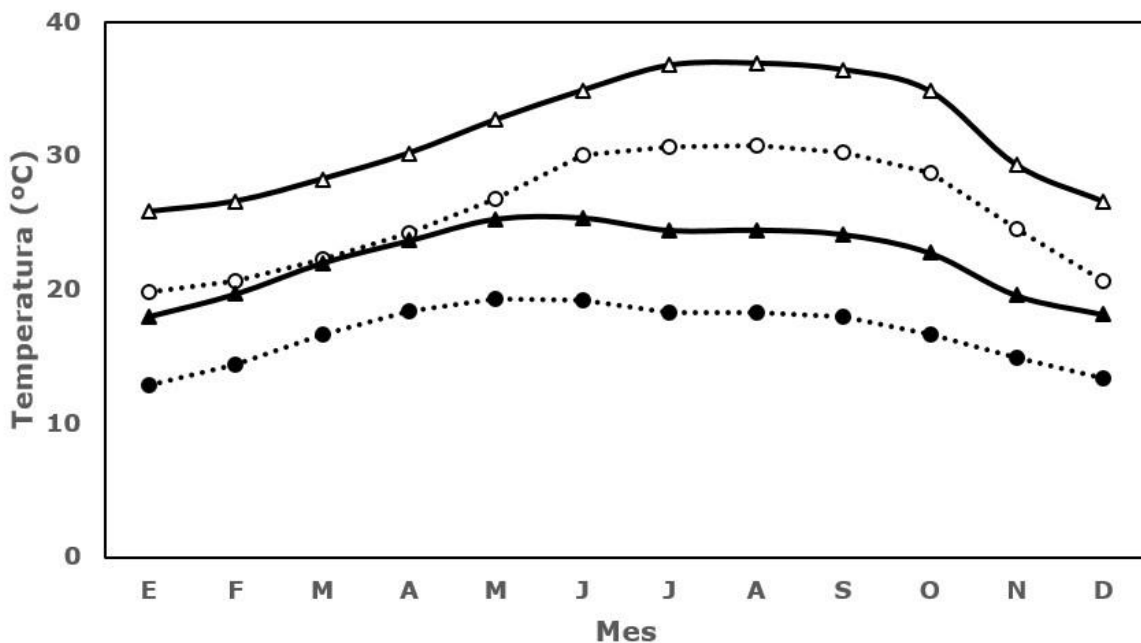


Figura 5. Distribución de temperaturas en un invernadero de longitud de 100 m entre la entrada (··●··●··) y salida (-▲-) en Texcoco, Estado de México, y en la entrada (··○··○··) y salida (-Δ-) de Navolato, Sinaloa.

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.

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.

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. *Biotecnia*, 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 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-Straaalen, 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*. Rishon LeZion, Israel: Ministry of Agriculture and Rural Development, The Centre for International Agriculture Development.
- 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>