



Enseñar la explotación de la
tierra, no la del hombre.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

INTEGRAL DE TEMPERATURA EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE JITOMATE (*Lycopersicon esculentum mill*) EN INVERNADERO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA. ORIENTACIÓN BIOSISTEMAS

PRESENTA:

PÉREZ VEGA CUAUHTÉMOC



DIRECCIÓN GENERAL ACADEMICA
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
DIRECCIÓN DE EXAMENES PROFESIONALES

JULIO DE 2010

Chapingo, Estado de México



**INTEGRAL DE TEMPERATURA EN EL CRECIMIENTO Y
DESARROLLO DE JITOMATE (*Lycopersicum esculentum* Mill)
EN INVERNADERO**

Tesis realizada por **Cuauhtémoc Pérez Vega** bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

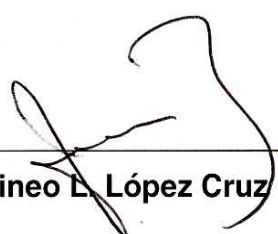
**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL
AGUA, ORIENTACIÓN BIOSISTEMAS**

DIRECTOR:



Dr. J. Armando Ramírez Arias

ASESOR:



Dr. Irineo L. López Cruz

ASESOR:



Dr. Ramón Arteaga Ramírez

DEDICATORIAS

A Dios por prestarme la vida para poder realizar mis estudios de maestría

A mis padres J. Merced Pérez Guerrero y Victoria Vega Rodríguez

A mis hermanos Iván, Pureza, Xóchitl, Juan Manuel,

Ma. Guadalupe, Miguel y Moctezuma

A mis familiares

A Griselda Alcántara S.

A mis compañeros y amigos del IAUIA

José Manuel Vargas S., Daniel Espejel T., Estela Jiménez, Carlos Robles B., Juan Carlos León,
Evaristo Camacho, Osias Ruiz, Juan de Dios Morales, Agustín Ruiz G., Álvaro Morelos M.,
Rosalinda Espinal, Norberto Savala, Pedro Puga, José Luis Miguel Hernández, Benjamín
García, A. Mauricio Santos, Homero Alonso, Víctor Prado, Efrén Pérez, Mario Figueroa,
Cesar Trejo, Nanci Rodríguez, Lidia Ordaz, etc.

A mis compañeros y amigos de Chapingo

Jaime González C., Francisco Bautista R., Hector Reyes R., Araceli Torres, Marisela Contreras,
Ali Cruz R., Leo López, etc.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por el apoyo institucional.

Al programa de posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Al Dr. J. Armando Ramírez Arias, quien con sus conocimientos, observaciones, trabajo y esfuerzo que hicieron posible la culminación de éste trabajo.

Al Dr. Irineo L. López Cruz y Dr. Ramón Arteaga Ramírez, por su valioso trabajo de revisión y sugerencias para la mejora de ésta investigación.

Al Dr. ©. Joel Pineda Pineda por su incondicional ayuda en la realización de los experimentos en invernadero y por compartir sus conocimientos sobre el manejo del cultivo de jitomate.

A todos los profesores del IAUIA que han contribuido con su esfuerzo a mi formación.

A todas aquellas personas que de manera directa o indirecta y desinteresada me brindaron su apoyo en la realización de la presente investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

Nace el 13 de septiembre de 1986 en la comunidad de Casas Viejas, Tolimán, Querétaro. Inicia sus estudios de preparatoria agrícola en el 2001 y de licenciatura en el 2004 en Ingeniería Mecánica Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo, obteniendo el título de Ingeniero Mecánico Agrícola en el año 2008.

Sus áreas son la mecanización agrícola, el manejo de cultivos hidropónicos y control climático en invernadero.

INTEGRAL DE TEMPERATURA EN EL CRECIMIENTO Y DESARROLLO DE JITOMATE (*Lycopersicon esculentum* Mill) EN INVERNADERO

Cuahtémoc Pérez Vega ^a
J. Armando Ramírez Arias ^b

En la actualidad los invernaderos de México dependen principalmente de la ventilación natural para el control climático, lo cual es insuficiente para mantener la temperatura y la humedad ambiental dentro de los valores óptimos para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. El cultivo de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill) en invernadero hace posible ajustar la temperatura y humedad a sus valores óptimos. Sin embargo, el control climático avanzado implica un alto costo de energía, el cual puede ser reducido utilizando la técnica llamada "integral de temperatura". En la presente investigación fue estudiado el efecto de la integral de temperatura en el crecimiento y desarrollo del cultivo de jitomate, mediante experimentación y simulación en dos invernaderos tipo capilla con cubierta de vidrio ubicado en Chapingo, México. El invernadero 1 se equipó con dos calefactores de 1500 W y ventilación natural, y el invernadero 2 con tres calefactores de 1500 W, dos ventiladores de 373 W y ventilación natural. Los resultados mostraron que con la aplicación de la integral de temperatura, manteniendo su valor en 28218.94 °C día⁻¹ y 28916.25 °C día⁻¹ en el invernadero 1 y 2 respectivamente, pero con un diferente ancho de banda de la temperatura, no se encontró diferencia significativa ($p \leq 0.05$) en biomasa de hojas, tallos, frutos e índice de área foliar del cultivo de jitomate, obteniendo el mismo rendimiento pero con un menor costo de energía del 39.52% en el invernadero 1. También se simuló el crecimiento y desarrollo de jitomate usando el modelo Tomgro simplificado con cinco variables de estado (el número de nodos, índice de área foliar, biomasa total, biomasa total de frutos y biomasa total de frutos maduros). Las predicciones del modelo Tomgro se ajustaron adecuadamente a las mediciones obtenidas en ambos invernaderos.

Palabras clave: Invernaderos, simulación, control climático, ahorro de energía.

^a Tesista

^b Director

TEMPERATURE INTEGRATION ON THE GROWTH AND DEVELOPMENT OF TOMATO (*Lycopersicon esculentum* Mill) IN GREENHOUSE

Cuahtémoc Pérez Vega ^a
J. Armando Ramírez Arias ^b

Nowadays, Mexican greenhouses largely depend on natural ventilation for climate control, which is insufficient to maintain temperature and humidity within the optimal values for crop growth and development. Growing tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) in greenhouse conditions allows adjusting the temperature and humidity to their optimal values. However, advanced climate control demands high energy costs, which can be reduced using the technique called "temperature integration". In this research, the effect of temperature integration on tomato crop growth and development was studied by experimentation and simulation in two chapel-type greenhouses with glass covering located in Chapingo, Mexico. Greenhouse 1 was equipped with two 1500 W heaters and had natural ventilation, and greenhouse 2 used three 1500 W heaters, two 373 W fans and natural ventilation. The results showed that with the application of the temperature integration approach, by keeping the accumulated degree per day in 28218.94 °C day⁻¹ and 28916.25 °C day⁻¹ in greenhouse 1 and 2 respectively, but with a different temperature bandwidth, the difference in biomass production for leaves, stems, fruits and leaf area index of tomato crop was not significant ($p \leq 0.05$). In fact, the same yield was obtained for both treatments, but the energy cost was 39.52% lower in greenhouse 1. Also, both tomato crop growth and development were simulated using the simplified Tomgro model, which has five state variables (the number of nodes, leaf area index, total biomass, total fruit biomass and total biomass of mature fruits). The Tomgro model adequately fitted measurements obtained in both greenhouses.

Keywords: Greenhouses, simulation, climate control, energy saving.

^a Thesis author

^b Thesis adviser

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	V
Índice de contenido	VI
Índice de cuadros	VIII
Índice de figuras	IX
1. Introducción	1
2. Revisión de literatura	4
2.1. Fisiología	4
2.1.1. Fotosíntesis	4
2.1.2. Respiración	6
2.2. Ambiente invernadero	7
2.2.1. Radiación solar	7
2.2.2. Temperatura	8
2.2.3. Humedad relativa	9
2.2.4. Concentración de dióxido de carbono (CO ₂)	9
2.3. Integral de temperatura	10
2.3.1. Efecto de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de cultivos	10
2.3.2. La Integral de Temperatura (IT)	12
2.4. Experiencias con la integral de temperatura	17
3. Materiales y métodos	22
3.1. Localización y descripción de invernaderos	22
3.2. Descripción del experimento con cultivo de jitomate	23
3.3. Registro de datos climáticos y del cultivo	24
3.4. Tratamientos de temperatura	25
3.5. Método de integración de la temperatura	25
3.6. Métodos para calcular la constante térmica	27

ÍNDICE DE CONTENIDO – *Continuación*

3.7. Modelo simplificado Tomgro.....	30
3.8. Simulación del crecimiento de tomate mediante el modelo Tomgro simplificado.....	38
4. Resultados y discusión.....	41
4.1. Manejo de la temperatura en el interior del invernadero.....	41
4.2 Integración de temperatura.....	43
4.3 Acumulación de materia seca en el cultivo de jitomate.....	45
4.4. Grados Días de Desarrollo.....	52
4.5. Consumo de energía.....	53
4.6. Modelo Tomgro simplificado.....	55
5. Conclusiones.....	64
Literatura citada.....	66
Apéndice A. Integración de la temperatura por día.....	75
Apéndice B. Muestreos de plantas de tomate.....	81
Apéndice C. Implementación C-MEX S-function del modelo para simulación del crecimiento de jitomate.....	82
Apéndice D. Programa principal del modelo de crecimiento Tomgro simplificado.....	88
Apéndice E. Archivo Simulink.....	90

ÍNDICE DE CUADROS

4.1. Resultado del comportamiento de la temperatura dentro de dos invernaderos.....	44
4.2. Frecuencias de temperaturas para dos invernaderos.....	45
4.3. Respuesta de materia seca de hoja, tallo y fruto e Índice de Área Foliar.....	47
4.4. Valores de la constante térmica de dos invernaderos.....	52
4.5. Consumo de energía y costo económico para dos invernaderos.....	54
4.6 Condiciones iniciales y densidad de planta de cada variable de estado.	55
4.7. Parámetros para Tomgro modelo reducido.....	56
4.8. Ecuaciones de regresión lineal y resultados de los índices estadísticos en el invernadero 1.....	59
4.9. Ecuaciones de regresión lineal y resultados de los índices estadísticos en el invernadero 2.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Integral de temperatura modificada a corto plazo (ST) y largo plazo (LT) como una función de tiempo, ST tiene una escala en horas (24 horas) y LT en días. Fuente (Körner, 2003d).....	16
2.2. Principio de control de temperatura durante un periodo promedio a corto plazo. Fuente (Körner, 2003d).....	17
3.1. Invernadero tipo capilla donde se realizó el experimento.....	23
3.2. Método de integración del trapecio.....	27
3.3. Variables de estrada de temperatura en el invernadero 1, A) Temperatura del aire, B) Temperatura media diaria y Temperatura media durante el día.....	39
3.4. Variables de entrada de la temperatura en el invernadero 2, A) Temperatura del aire, B) Temperatura media diaria y Temperatura media durante el día.....	39
3.5. Variables de entrada de A) Dióxido de Carbono (CO ₂) y B) Radiación Fotosintética Activa (RFA) para el invernadero 1 y 2.....	40
4.1. La temperatura durante el experimento en el cultivo de jitomate.....	41
4.2. Temperatura en los invernaderos 1 y 2. (a) Día 5 después del trasplante y (b) Día 15 después del trasplante.....	42
4.3. Temperatura de los invernaderos 1 y 2. (a) Día 45 después del trasplante y (b) día 60 después del trasplante.....	43

ÍNDICE DE FIGURAS – *Continuación*

4.4. Comparación de la acumulación de materia seca de fruto de dos invernaderos.....	48
4.5. Comparación de la acumulación de materia seca de tallo de dos invernaderos.....	49
4.6. Comparación de la acumulación de materia seca de hoja de dos invernaderos.....	49
4.7. Curva de crecimiento del Índice de Área Foliar de dos invernaderos....	50
4.8. Curva de crecimiento de materia seca de hojas, tallo y fruto del invernadero 1.....	51
4.9. Curva de crecimiento de materia seca de hojas, tallo y fruto del invernadero 2.....	51
4.10. Simulación y datos medidos de cantidad de nodos en el invernadero 1.....	57
4.11. Simulación y datos medidos de Índice de Área Foliar en el invernadero 1.....	57
4.12. Simulación y datos medidos de peso seco total en el invernadero 1...	58
4.13. Simulación y datos medidos de peso seco de frutos en el invernadero 1.....	58
4.14. Simulación y datos medidos de peso seco fruto maduros en el invernadero 1.....	59
4.15. Simulación y datos medidos del número nodos en el invernadero 2...	61

ÍNDICE DE FIGURAS – *Continuación*

4.16. Simulación y datos medidos del Índice de Área Foliar en el invernadero 2.....	61
4.17. Simulación y datos medidos de peso seco total en el invernadero 2.	62
4.18. Simulación y datos medidos de peso seco de frutos en el invernadero 2.....	62
4.19. Simulación y datos medidos de peso seco de frutos maduros en el invernadero 2.....	63

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la agricultura protegida está creciendo en México a una tasa del 15 al 20% anual (AMPHI, 2010). Sin embargo, más del 60% de los invernaderos mexicanos tienen condiciones de medio y bajo nivel tecnológico, que se caracterizan por el uso de ventilación natural (Romero *et al.*, 2006). Los invernaderos son ambientes de agricultura controlada que superan las adversidades climáticas, utilizando como fuente de energía el sol. Pero la estructura también depende del clima. Es decir, en ciertas partes del mundo, la calefacción no es requerida, pero en otras la calefacción y ventilación son necesarias (Hanan, 1998).

Los invernaderos mexicanos dependen principalmente de la ventilación natural como mecanismos de control climático, aunque son insuficientes para mitigar los efectos negativos de la temperatura y la humedad ambiental generadas en su interior, en un intervalo fuera de los valores óptimos para el desarrollo de los cultivos (López *et al.*, 2007). El área total de ventilación no debe ser menor del 30% del área cubierta (Hanan, 1998).

El jitomate al igual que muchos cultivos hortícolas, es originado en zonas subtropicales. En países ubicados en latitudes más altas, este cultivo se establece en invernaderos donde la temperatura puede ser superior a la

ambiental. En estos países, los altos costos de energía se encuentran en el control climático (Van der Ploeg y Heuvelink, 2005), lo mismo ocurre en regiones de nuestro país en las que durante el invierno se presentan temperaturas mínimas cercanas a 0°C. Para mejorar el manejo del ambiente de los invernaderos mexicanos con ventilación natural se requieren sistemas de control que demandan energía (fósil). Por lo tanto, la reducción del uso de energía en ambientes de agricultura controlada es relevante porque representa disminución de costos. Parte de la reducción del uso de energía en los invernaderos, puede ser alcanzado por medio de la técnica *“integral de temperatura”*, utilizando la respuesta del cultivo de jitomate para integrar la temperatura (De Koning, 1990), el cual tolera desviaciones de temperatura, compensando cambios dentro de un determinado tiempo (Körner, 2003a). Las plantas pueden tolerar desviaciones temporales de la óptima temperatura, siempre y cuando ésta no difiera demasiado (Seginer, 2009). Por ejemplo, una temperatura alta durante el día puede compensar una temperatura baja durante la noche, y viceversa; otra opción es simplemente la disminución de la temperatura en el invernadero (Van der Ploeg y Heuvelink, 2005).

En el presente trabajo se estudió el efecto en el crecimiento y desarrollo del cultivo de jitomate, implementando la técnica de la integral de temperatura, a lo largo de un ciclo de cultivo de 106 días, manteniendo condiciones de temperaturas diferentes, pero buscando la misma integral de temperatura para cada día en dos invernaderos.

OBJETIVOS

Objetivo general

- ❖ Evaluar mediante experimentación y simulación el efecto de la integral de temperatura en el crecimiento y desarrollo en el cultivo de jitomate, en dos invernaderos.

Objetivos específicos

- ❖ Mantener diferentes condiciones de temperatura, buscando la misma integral de temperatura para cada día en dos invernaderos, en un cultivo de jitomate.
- ❖ Evaluar el efecto del uso de la técnica integral de temperatura sobre el cultivo de jitomate en dos invernaderos con cubierta de vidrio.
- ❖ Simular el crecimiento y desarrollo de jitomate mediante el modelo *tomato growth simulator*.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

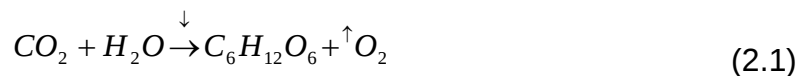
2.1. Fisiología

El crecimiento de plantas en un invernadero es un proceso regido por interacciones entre procesos fisiológicos y condiciones ambientales (Zekki *et al.*, 1999; Challa, 2003; Langton, 2003). Dependiendo de la intensidad y duración de la temperatura; la fotosíntesis, la respiración, las membranas, la relación de agua y el balance hormonal pueden ser afectadas (Van der Ploeg y Heuvelink, 2005). La temperatura óptima incrementa la fotosíntesis del dosel de las plantas (Körner y Challa, 2003a).

2.1.1. Fotosíntesis

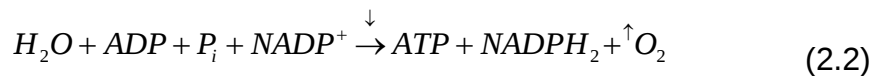
La vida en la tierra depende de la energía derivada del sol. La fotosíntesis es el único proceso de importancia biológica que puede cosechar esta energía.

El término fotosíntesis significa literalmente “síntesis usando luz”. Los organismos fotosintéticos usan energía solar para sintetizar compuestos de carbono que no pueden ser formados sin la entrada de energía. Más específicamente, la energía luminosa maneja la síntesis de carbohidratos de dióxido de carbono y agua con la generación de oxígeno (Taiz y Zeiger, 1991).

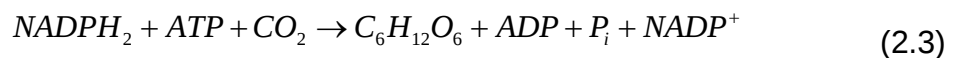


La fotosíntesis se divide en dos tipos de reacciones:

Reacción luminosa de la fotosíntesis: El objetivo de la reacción luminosa es sintetizar ATP y NADPH₂ es decir, producir energía química. El ATP y NADPH₂ se consideran moléculas de alta energía porque absorben y liberan con mucha facilidad el P y H₂. Se realiza en las membranas del tilacoide. Sólo se lleva a cabo en presencia de pigmentos fotosintéticos (Clorofila a, Clorofila b, Carotenos, Xantofilas, Ficobilinas) y luz. A medida que un elemento sea más mineral o metal, tiene mayor capacidad de transporte de energía; sólo la clorofila a y b son los únicos que tienen N y Mg respectivamente, por lo que los carotenos, xantofilas y ficobilinas se consideran ineficientes en la transferencia de energía (Azcon-Bieto y Talón, 1993).



Reacción oscura de la fotosíntesis. Es dependiente de la reacción luminosa, porque requiere de su producto final (ATP y NADPH₂) como materia prima. La función del ATP es descomponer el NADPH₂, quitando los iones H y cederlos al CO₂ para formar la glucosa (C₆H₁₂O₆). La reacción oscura se realiza en el estroma del cloroplasto en presencia de CO₂, ATP y NADPH₂ (Azcon-Bieto y Talón, 1993).



2.1.2. Respiración

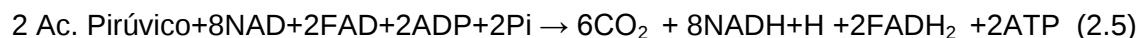
Es el principal proceso para la degradación de carbohidratos con la finalidad de liberar la energía química (ATP) almacenada y utilizarla en los procesos de crecimiento, diferenciación, absorción y transporte de compuestos. La respiración libera la energía almacenada en compuestos de carbono en un modo controlado de células (Taiz y Zeiger, 1991).

La respiración tiene tres fases:

Glicolisis: Se realiza en el citoplasma de la célula, está considerada la fase anaeróbica de la respiración (No le importa si hay O₂) y se inicia a partir de glucosa (C₆H₁₂O₆). En este proceso se lleva a cabo una degradación parcial de los carbohidratos, liberando un poco de energía química (Azcon-Bieto y Talón, 1993). Se resume en la expresión 2.4:



Ciclo de Krebs. En donde el ácido pirúvico se oxida hasta CO₂ liberando una mayor cantidad de energía química. Se lleva a cabo en la matriz de la mitocondria y es un proceso aerobio (Taiz y Zeiger, 1991). Se puede resumir de la siguiente manera:



Transporte de electrones y formación de ATP (fosforilación oxidativa). En esta fase los NADH⁺H⁺ de glicolisis y ciclo de Krebs más los FADH₂ de ciclo de Krebs entran a un transporte de electrones con el propósito de obtener ATP. En

esta fase se consume O_2 el cuál se reduce a H_2O . Se lleva a cabo en las membranas internas (crestas) de la mitocondria (Taiz y Zeiger, 1991). Se puede resumir de la siguiente manera:



2.2. Ambiente invernadero

En un invernadero los principales componentes son el cultivo, las variables climáticas internas y el clima externo. Así se pueden identificar varias variables de estado tales como la temperatura del aire, la humedad del aire y la concentración dióxido de carbono (CO_2), también la biomasa total y biomasa de frutos o tallos del cultivo. El comportamiento del cultivo y del clima dentro del invernadero es afectado tanto por las variables climáticas externas como también por las acciones de control. Las perturbaciones que más afectan el ambiente invernadero son la radiación solar, temperatura, velocidad del viento, concentración de CO_2 y humedad fuera del invernadero. Las variables de control, son variables manipulables que permiten modificar el ambiente del invernadero tales como: la apertura de las ventanas, el sistema de calefacción, el sistema de nebulización, el sistema de ventilación, refrigeración o el flujo de CO_2 aplicado (López, 2005).

2.2.1. Radiación solar

La cantidad de luz incidente en un invernadero cultivado es afectada por algunas medidas como el aumento de su transmisión, asimilación de luz o pantallas térmicas. Para juzgar si estas medidas son aprovechables, los

productores necesitan estimar sus efectos en la producción (Dieleman, *et al.* 2006). La luz en la región PAR (Radiación Fotosintética Activa) es la fuente de energía que determina la fotosíntesis y el crecimiento; y por consiguiente la temperatura y la inyección de CO₂ del invernadero, debe ser balanceada para asegurar un uso eficiente de los recursos (Aaslyng, *et al.* 2006). Se puede realizar una transmisión de luz más alta con la limpieza regular de la cobertura del invernadero o por nuevos materiales de cubierta (Dieleman, *et al.* 2006). Los niveles de luz son también un factor limitante en el crecimiento durante el invierno en latitudes nórdicas, es más importante utilizar la luz natural cuando está disponible (Aaslyng, *et al.* 2006). Para hacer uso eficiente de la energía en invernaderos se requiere aumentar al máximo el uso de la radiación natural por su impacto positivo en la producción y la reducción del poder calorífico adicional (Bakker, *et al.*, 2008). Para un cultivo de jitomate, creciendo bajo las condiciones Holandesas, una transmisión de luz 10% más alta, mejoró en 8% la eficiencia (Elings *et al.*, 2005).

2.2.2. Temperatura

La temperatura requerida por una planta depende de muchos factores: especies, variedad, la etapa de la planta, estación del año y el nivel de luz. Algunas especies requieren altas temperaturas, por ejemplo el pepino, considerando que otras crecen a bajas temperaturas por ejemplo la lechuga (Nederhoff y Schreuder, 2004). Los efectos de la temperatura no sólo son en el tiempo de maduración de frutos, sino también en la tasa de crecimiento de los frutos (Adams *et al.*, 2001). Según Rijdsdijk y Vogelezang (2000) experimentos

con cultivos vegetales y ornamentales señalan que depende su crecimiento y desarrollo de un nivel de temperatura media.

2.2.3. Humedad relativa

La humedad en un invernadero es el resultado del balance entre la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo, condensación en la cubierta del invernadero y la pérdida de vapor durante la ventilación (Heuvelink, 2005). Las plantas saludables pueden transpirar mucha agua, resultan del incremento de la humedad del aire en el interior del invernadero (Both, 2009). Una alta humedad relativa (aproximadamente de 80-85%) debe ser evitada porque ésta, puede incrementar la incidencia de enfermedades fungosas y desordenes fisiológicos por ejemplo reducir la transpiración de la planta (Dieleman, *et al.* 2006; Both, 2009). Incrementando los puntos establecidos de la humedad relativa de 85% a 90% en jitomate reduce el consumo de energía en 4% (Elings *et al.*, 2005; Bakker *et al.*, 2008). Suficiente ventilación o consecuentemente calefacción y ventilación puede prevenir la condensación en la superficie del cultivo y la estructura del invernadero (Both, 2009). En general, una planta de jitomate usa el 10% del agua que recibe para su peso fresco, el 90% restante es transpirado (Dieleman, *et al.* 2006).

2.2.4. Concentración de dióxido de carbono (CO₂)

El dióxido de carbono es la materia prima más importante para el crecimiento de las plantas, a pesar de que sus niveles en la atmósfera son muy bajos (Azcon-Bieto y Talón, 1993). El aire se constituye de nitrógeno 78%, oxígeno

21% y 0.034% de CO₂, que se indica como 340 ppm (partes por millón) (Estrela, 1994). La concentración de CO₂ de un invernadero cuando las ventanas están cerradas se incrementa hasta 1000 ppm y 350 ppm cuando éstas se abren (Körner y Challa, 2004b). La obtención de CO₂ en cantidad suficiente para el crecimiento representa un problema fundamental para las plantas. La mayoría de las plantas dependen de la difusión del CO₂ desde la atmósfera al interior de las hojas, y posteriormente de ahí a los cloroplastos, donde el CO₂ queda fijado (Azcon-Bieto y Talón, 1993). El 40% de la materia seca de las plantas es carbono y éste proviene del CO₂ absorbido durante la fotosíntesis (Lambers *et al.*, 1998). El aumento de las concentraciones de CO₂, hasta un nivel de alrededor de 1000 ppm puede mejorar la fotosíntesis y por lo tanto, el crecimiento del cultivo y producción (Dieleman *et al.*, 2006). Según Dieleman *et al.* (2006) se incrementa en un 75% la producción de frutos de pimientos considerando que el crecimiento vegetativo no ha sido afectado por las altas concentración de CO₂.

2.3. Integral de temperatura

2.3.1. Efecto de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de cultivos

Los principales factores ambientales que controlan el crecimiento y desarrollo de plantas son la temperatura, humedad relativa, concentración de dióxido de carbono (CO₂) y luz (Runkle, 2008). La principal influencia de la temperatura es en el desarrollo de los cultivos según Van der Berg, (2001), así mismo ésta controla la velocidad de desarrollo de una planta (Runkle, 2006). Esto es por ejemplo en la iniciación de hojas y su crecimiento completo, así también sobre

la tasa de floración y el tiempo entre la madurez de frutos y la cosecha (Van der Berg, 2001). Las temperaturas extremas pueden inducir estrés y daños asociados a la estructura plasmática o aparatos fotosintéticos de la planta (Körner y Challa, 2003a). La temperatura tiene un gran efecto sobre los procesos básicos de la planta. A mayor temperatura el proceso de respiración es más rápido también. La respiración es la combustión interna de los asimilados (azúcares) (Nederhoff y Schreuder, 2004).

Efecto de la temperatura en el crecimiento y desarrollo de jitomate

Por debajo de 12 °C casi no se espera un crecimiento en jitomate (Criddle *et al.*, 1997). Se producen daños por frío cuando las plantas de jitomate están expuestas a bajas temperaturas durante un largo período de tiempo. Dependiendo de la intensidad y la duración de la exposición a las temperaturas de refrigeración, la fotosíntesis, respiración, la integridad de las membranas, la relación de agua y el equilibrio hormonal de las plantas puede verse afectada (Van der Ploeg y Heuvelink, 2005).

Por muchos años se había creído que cada cultivo tiene una temperatura óptima durante el día donde crecen mejor y una temperatura óptima por la noche. Pero combinando estas dos condiciones se cree que se podría crear un ambiente ideal para el cultivo (Cockshull y Adams, 1997).

El rendimiento del jitomate no es una característica aislada y depende del crecimiento de la planta. Si la planta de jitomate no crece bien, entonces nunca dará un alto rendimiento. Por lo tanto, el rendimiento está determinado por la

interacción entre la morfología, fisiología y las condiciones de crecimiento de la planta. La disminución de la temperatura en invernadero tiene una influencia en diferentes aspectos del crecimiento (producción de biomasa) y el desarrollo (hojas y racimos, periodo de crecimiento de frutos) (Van der Ploeg y Heuvelink, 2005).

Respuestas de las plantas a la temperatura

La mayoría de las plantas responden a un cambio en la temperatura mediante la alteración de su ritmo de desarrollo en proporción directa. La temperatura puede variar a lo largo del día y noche sin afectar necesariamente el desarrollo de la planta (Cockshull y Adams, 1997). Varios autores han mostrado que el crecimiento y desarrollo de cultivos responden a la integral de temperatura por periodos cortos y largos.

2.3.2. La Integral de Temperatura (IT)

En la década de los 80's, evidencias experimentales muestran que la mayoría de especies cultivadas en invernaderos son capaces de integrar la temperatura por periodos de 24 horas o más largos. En otras palabras, el cambio en la temperatura durante ciclos de 24 horas puede causar la misma tasa de desarrollo siempre y cuando la media sea la misma dentro de un rango restringido de 10 a 25 °C (Hanan, 1998). Si las temperaturas durante el día son cálidas, las temperaturas nocturnas se pueden disminuir para conservar mayor cantidad de energía, siempre y cuando las medias permanezcan en el rango óptimo (Heuvelink, 2005).

El control climático es necesario para alcanzar alto crecimiento, rendimiento y calidad en cultivos, son los objetivos principales de los agricultores. Las temperaturas extremas pueden provocar estrés y daños asociados a las estructuras plasmáticas o los aparatos fotosintéticos de la planta (Körner, 2003d). La fotosíntesis es un proceso casi instantáneo, mientras que el proceso de asimilación es un proceso dinámico más lento (Seginer *et al.*, 1994). Las temperaturas extremas pueden retrasar el desarrollo de la planta y afectar otras características como el desarrollo del área foliar, los días de trasplante a la primera cosecha, el rendimiento de frutos, el rendimiento final, el número de hojas, la distribución de materia seca varía según la parte específica de la planta (raíces, tallos, hojas, flores y frutos) y el estado de crecimiento (Hanan, 1998, Adams *et al.*, 2001; Körner, 2003d; Van Ooteghem, 2007).

Los regímenes climáticos basados en la integral de temperatura que permiten fluctuaciones de temperatura aunque respetando el adecuado crecimiento y desarrollo de cultivos (Körner, 2003d). Investigaciones hortícolas y principalmente en observaciones empíricas, donde indica que el crecimiento del cultivo responde a una temperatura media a largo plazo en lugar de la temperatura constante del día y noche (Sigrimis, *et al.*, 2000; Van Ooteghem, 2007). Usando la integral de temperatura manteniendo una temperatura media dentro de cierto límite superior e inferior en intervalos de tiempo especificados (Körner, 2003d; Dieleman y Meinen, 2007). La temperatura máxima, mínima y media; y un periodo de tiempo, son los parámetros clave de la integral de temperatura (Van der Berg, 2001; Adams *et al.*, 2009). Intervalos tales como

nocturnos, ciclos completos de 24 horas, y periodos de varios días han sido aplicados satisfactoriamente a gran variedad de cultivos en invernadero por ejemplo en jitomate por De Koning, (1990), Adams *et al.*, (2001) y Heuvelink, (2005); pimienta y flores por Rijdsdijk y Vogelezang, (2000); rosa por Dieleman y Meinen, (2007); y crisantemo por Körner, (2003d) y Adams *et al.*, (2009).

El intervalo de integración y ancho de banda máximo de temperatura para cultivos de alta calidad aun son desconocidos. El concepto de hecho se basa en empirismo y carece de fundamentos fisiológicos. El ancho de banda y los intervalos de integración fijos son usados comúnmente (Rijdsdijk y Vogelezang, 2000; Körner, 2003d; Van Ooteghem, 2007). En regímenes de integración de temperatura regular, los procesos de la planta rápidos (minutos) y lentos (días) no son motivo de preocupación. Teniendo en cuenta estos factores probablemente podría aumentar el ahorro de energía, manteniendo el rendimiento y calidad del cultivo (Sigrimis *et al.*, 2000; Elings, *et al.*, 2005; Körner y Van Straten, 2008). Los procesos con un tiempo de respuesta lento (desarrollo de las plantas) probablemente responden ante todo a temperaturas promedio a través de periodos prolongados, y procesos con una respuesta rápida (fotosíntesis) puede permitir desviaciones de temperatura más extremas sin pérdidas de calidad y crecimiento (Adams *et al.*, 2001; Körner, 2003d; Runkle, 2006; Dieleman y Meinen, 2007).

Cálculos y experimentos con la integral de temperatura muestran que hay un ahorro de energía del 5 a 15% sin afectar el crecimiento y producción de cultivos (Körner y Challa, 2003a; Elings *et al.*, 2005; Dieleman *et al.*, 2005). Un

ahorro de energía de más de 20% ha sido obtenido bajo condiciones climáticas templadas (Sigrimis *et al.*, 2000). Heuvelink, (2005) menciona se puede realizar un ahorro de energía del 10-15% manteniendo regímenes de temperatura alta en el día y baja en la noche independientemente de la temperatura promedio en 24 horas. Durante días soleados y noches frías los invernaderos se calientan durante el día y se enfría en la noche. En las condiciones más favorables, la temperatura del invernadero se mantiene por encima del punto de ajuste de la calefacción y la energía de calefacción no será necesaria. Con los días fríos, la calefacción puede ser desplazada a la noche con pantallas térmicas, lo que ahorran grandes cantidades de energía (Rijsdijk y Vogelezang, 2000). Sin compensar la temperatura durante la noche es posible cuando la temperatura media diurna en el invernadero es la misma que la temperatura promedio deseada en 24 horas (Körner, 2003d).

El concepto de la IT fue modificado para un sistema de dos regímenes de integración de temperatura con periodos diferentes, un corto plazo (ST) (dedicado a procesos rápidos de la planta) y un largo plazo (LT) (dedicado a procesos lentos de la planta). LT corresponde al periodo medio de varios días de una integral de temperatura regular; ST corresponde al periodo de 24 horas (Figura 2.1). La temperatura puede fluctuar dentro de sus márgenes, pero la temperatura media debe cumplir con los requisitos del régimen de LT (Figura 2.2). El curso de la temperatura *a* es con una integral de temperatura normal; en *b* los límites de temperatura son limites a corto plazo mientras que la temperatura media es mantenida. Los casos de *c* y *d* tienen diferente

temperaturas medias pero ambos están dentro de rangos aceptables. Los límites ST son ajustados si la temperatura media de 24 horas excede los límites de integral de temperatura LT. Las temperaturas extremas se evitan mediante el establecimiento de dos umbrales a ambos lados del rango aceptable. Uno de los umbrales representa el límite absoluto de temperatura (Körner, 2003d).

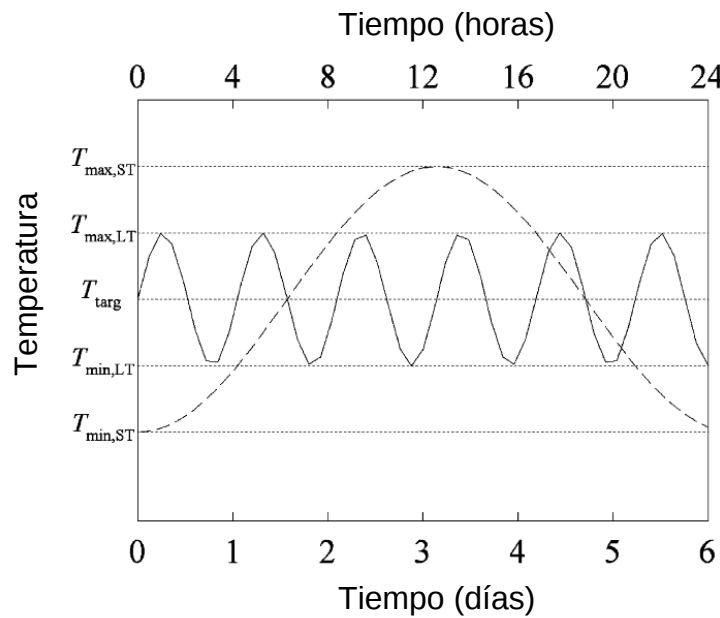


Figura 2.1. Integral de temperatura modificada a corto plazo (ST) y largo plazo (LT) como una función de tiempo, ST tiene una escala en horas (24 horas) y LT en días. Fuente (Körner, 2003d).

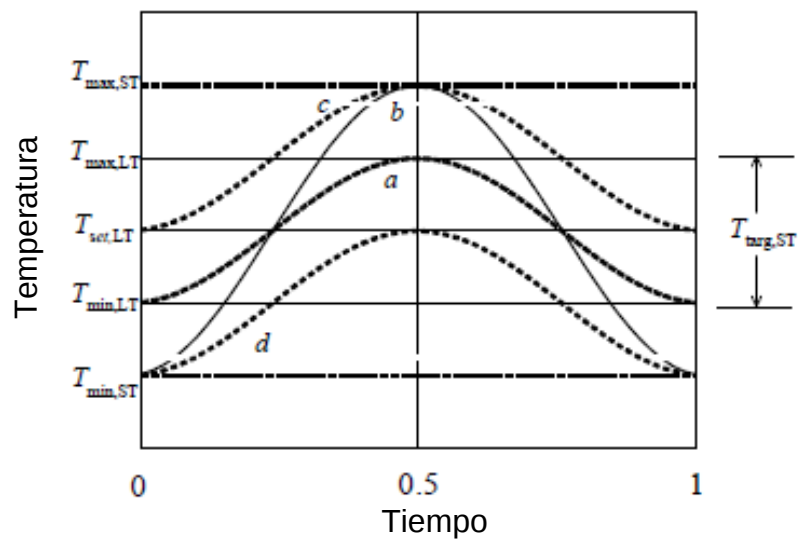


Figura 2.2. Principio de control de temperatura durante un periodo promedio a corto plazo. Fuente (Körner, 2003d).

2.4. Experiencias con la integral de temperatura

En los experimentos realizados por De Koning (1990) sobre el efecto de la integral de temperatura, del crecimiento y desarrollo de jitomate. Las plantas recibieron temperaturas altas y bajas, por 3, 6 y 12 días. Durante ciclos de cada 6, 12 y 24 días respectivamente con amplitudes de 3 y 6 °C. La temperatura media en 24 horas fue controlada por computadora, variando el control entre 17.5 y 21°C, dependiendo de la edad del cultivo y la cantidad de luz del día. Sólo la alteración de temperatura con amplitud de 6°C combinada con un periodo de integración de 12 días redujo ligeramente el crecimiento total con respecto al control, esto en plantas jóvenes. Para las plantas viejas, ningún de los tratamientos redujo el crecimiento (incremento de peso fresco). Donde la integral de temperatura fue la misma para todos los tratamientos. En general, el

incremento de la longitud en plantas semanalmente fue el mismo para todos los tratamientos.

Rijsdijk y Vogelezang (2000) experimentó la posibilidad de aplicar un control con la integral de temperatura en los cultivos de rosal y pimiento morrón, basados en 24 horas con un ancho de banda de 4 y 8°C comparado con el control tradicional, y fueron hechas mediciones del efecto en ahorro de energía, crecimiento y desarrollo de plantas. El control de la integral de temperatura se le dio tanta libertad como fue posible, para establecer la calefacción mínima y máxima en los mismos niveles durante todo el periodo de 24 horas, de manera que no hubo diferencias entre el día y la noche. El punto establecido para la calefacción hasta la semana 10 se fijó en 22°C, posteriormente la temperatura se redujo a 20°C durante 24 horas. Cuando los brotes fueron de 10 cm, la temperatura se redujo hasta los 19°C durante 24 horas.

Ahorro de energía. A lo largo de un año el ahorro de energía fue de 8% con un ancho de banda de 4°C, mientras que un ancho de banda de 8°C el ahorro fue de 18%. Con el ancho de banda de 4°C y menor no muestra algún efecto del control de la integración en el rendimiento y calidad del producto.

Producción y calidad de cultivos. En el experimento de rosa tanto en la producción y floración, no se encontraron efectos del control de integración. En el experimento con plantas en macetas, el efecto fue observado sólo en el ancho de banda de 8°C. En el invierno *Ficus* tuvo una planta ligeramente más corta. Las plantas de *Dieffenbachia* eran de color más claro. El Crisantemo

produjo flores menos abiertas y el *Kalanchoe* mostró floración temprana y plantas más altas. Durante la finalización de la floración no se observaron efectos. En el experimento de pimiento en un ancho de banda de 8°C las plantas fueron de un color ligeramente más claro en invierno.

Sigrimis, *et al.*, (2000) utilizaron la integral de temperatura como método para controlar la temperatura del aire en el invernadero con el propósito de ahorro de energía. Implemento diez estrategias de control. Si los cultivos puede tolerar temperaturas promedio de 18.5, 19.0 y 19.5 °C durante 30 días se pueden alcanzar ahorros de energía de calefacción de hasta 23%, 9% y consumo de energía de 5% respectivamente para condiciones de clima frio. Para el caso de climas templados con temperaturas promedio de 19.5, 19.6 y 19.8 se pueden lograr hasta un ahorro de energía de 22%, 19% y 17% respectivamente. La temperatura mínima fue de 15 °C y la máxima de 22°C.

Langton *et al.*, (2003) realizaron experimentos en cultivos ornamentales implementando la integral de temperatura donde obtuvieron un ahorro de energía de alrededor de 25%, sin disminución de calidad y con un retraso de floración escasa o nula.

Los estudios realizados por Körner y Challa (2004b) han mostrado que las modificaciones a la integral de temperatura con periodos promedios de seis días e incrementando flexiblemente los puntos establecidos, es capaz de reducir anualmente un consumo de energía de hasta 9% comparado con un régimen de integración de temperatura regular. La combinación de regímenes

fue aplicado en dos experimentos con cultivo de flores de corte de crisantemo, investigando el efecto en el crecimiento y desarrollo de la planta. Los diferentes anchos de banda de integral de temperatura fue de ± 2 , ± 4 , ± 6 y $\pm 8^{\circ}\text{C}$. Los puntos extremos máximo establecidos de temperatura son 10 y 34°C . El control del clima fue establecido en 18.5 y 19.5 durante el día y durante la noche 19.5 y 20.5. Cada 24 horas fueron tratados independientemente con el periodo promedio de 6 días. El desarrollo del cultivo fue retrasado solamente con el ancho de banda de temperatura de $\pm 8^{\circ}\text{C}$. El mejor régimen con respecto al crecimiento, desarrollo, calidad y ahorro de energía fue el $\pm 6^{\circ}\text{C}$.

Dieleman y Meinen (2007) experimentaron en el cultivo de rosal el efecto de la integral de temperatura en el crecimiento y desarrollo a los tallos con periodos de integración de 2 días (1 día temperatura alta, 1 día temperatura baja) y 14 días (1 semana de temperatura alta, 1 semana de temperatura baja) con intensidades de luz altas ($300\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$) y baja ($150\ \mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$). Con un ancho de banda de integral de temperatura de 0°C (20°C continuamente), 6°C ($17 - 23^{\circ}\text{C}$) y 10°C ($15 - 25^{\circ}\text{C}$). Con el periodo de integración de 2 días el número promedio de hojas en el tallo disminuyeron de 19.3 a 19.0 y 17.4; y la longitud de los entrenudos cortos de 3.5, 3.3 y 3.1 cm respectivamente con el ancho de banda de 0, 6 y 10°C . Con el periodo de integración de 14 días el número promedio de hojas en el tallo es de 17.6, 16.5 y 15.0; y una reducción de la longitud promedio entrenudos 3.8, 3.7 y 3.4 cm respectivamente con el ancho de banda de 0, 6 y 10°C . Con el periodo de integración de 14 días el número promedio de hojas en el tallo es de 17.6, 16.5 y 15.0; y una reducción

de la longitud promedio entrenudos 3.8, 3.7 y 3.4 cm respectivamente con el ancho de banda de 0, 6 y 10 °C.

Xiuming *et al.*, (2008) investigaron el efecto de dos manejos de la integral de temperatura con temperatura baja durante la noche, en el microclima, consumo de energía, rendimiento y calidad de frutos en un cultivo de jitomate durante el invierno para desarrollar nuevas estrategias de control de la temperatura. La temperatura por la noche de 17°C y 13°C para cada régimen de integración de temperatura se estableció en seis compartimientos. Las temperaturas durante la noche fueron aplicadas por 3 horas de 6 a 9 pm. La temperatura media de calefacción es de 18.3°C durante 24 horas para ambos regímenes de integral de temperatura. Los periodos de integración fueron de 3 días. No hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en los parámetros de crecimiento entre los dos regímenes de integración de temperatura.

Adams *et al.*, (2009) realizaron experimentos en el impacto de la temperatura del día y noche en macetas de crisantemo durante 39, 44 y 49 semanas con diferentes regímenes de temperatura cortos (12 h d⁻¹). Las temperaturas establecidas son 12, 15, 18 y 21 °C usadas durante el día. Pero misma temperatura media diurna en el 2005 y 2006. Sin embargo la temperatura del día más baja alrededor de 16 °C y compensando con noches cálidas para detener la floración por hasta dos semanas.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Localización y descripción de invernaderos

En la presente investigación se utilizaron dos invernaderos ubicados en el campus de la Universidad Autónoma Chapingo, en Chapingo, México, con coordenadas 19° 29' N y 98° 53' O, a una altitud de 2243 msnm.

El clima de la localidad es del tipo Cb(Wo)(W)(i')g, que corresponde a un templado subhúmedo con lluvias en verano, una época seca en invierno y con poca oscilación térmica (5 – 7 °C). La temperatura media anual es de 15.5 °C; mayo el mes más caliente y enero el más frío. La precipitación media anual es de 664 mm (García, 1973).

Los invernaderos utilizados fueron de dimensiones 9.2 m de largo por 7.85 m de ancho cada uno, cubren un área de 72 m² y tienen un volumen 249 m³. El techo en dos aguas y una cubierta de vidrio. Cuenta con ventanas laterales y cenitales, estas ventanas se cierran de forma manual y cubren una superficie de 15.7 m² que representa el 21.8% de la superficie de piso cubierto por el invernadero.

La temperatura se controló en uno de los invernaderos con ventilación natural y forzada (mediante dos enfriadores) en días cálidos y en la noche la temperatura se incrementó con la ayuda de tres calefactores eléctricos, mientras el otro invernadero se mantuvo únicamente con ventilación natural (Figura 3.1).

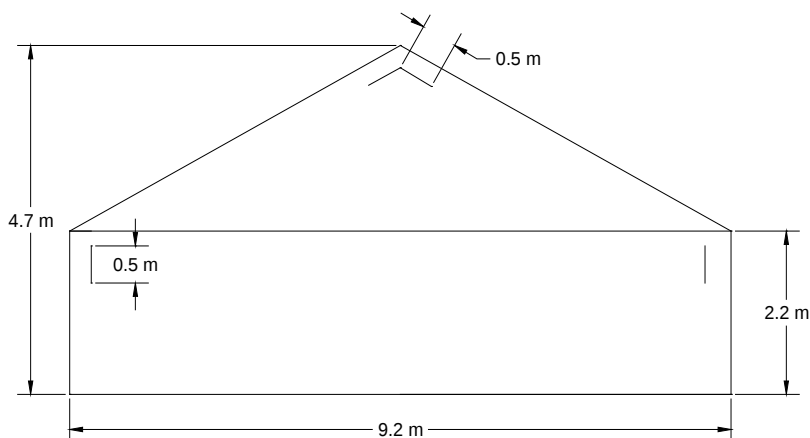


Figura 3.1. Invernadero tipo capilla donde se realizó el experimento.

5.2. Descripción del experimento con cultivo de jitomate

Un cultivo de jitomate (*Lycopersicon esculentum Mill*) variedad “Hybrid Tomato, Sun 7705” se sembró en charolas de 200 cavidades el día 18 de agosto del 2009. La plántula fue trasplantada el día 24 de septiembre en bolsas de 16 L, con sustrato volcánico (tezontle). La densidad fue 2 plantas m^{-2} de invernadero. Las plantas fueron regadas con la solución nutritiva conteniendo 12 meqL NO_3 , 1.5 meqL H_2PO_4 , 7 meqL SO_4 , 7 meqL K, 8 meqL Ca, 3.5 meqL Mg, 0.5 meqL NH_4 , regulando el pH de la disolución nutritiva en un rango de 5.8 a 6.1.

5.3. Registro de datos climáticos y del cultivo

Para medir las variables del clima en el interior de los invernaderos se usaron dos sistemas de adquisición de datos Hobo U12 (Onset Computers Corporation, USA) localizados en el centro de cada uno de los invernaderos a la altura de 1.8 m.

La temperatura y humedad relativa fueron registradas cada minuto utilizando un sistema de adquisición de datos (data logger) Hobo U12 Temp/RH donde su rango de medición de temperatura es de -20° a 70°C y la Humedad Relativa de 5% a 95%. El periodo de registro de datos fue del 24 de septiembre del 2009 al 07 de enero del 2010.

Las variables del crecimiento y desarrollo del cultivo fueron medidos en cinco ocasiones los días 16 y 30 de octubre, 16 de noviembre y 10 de diciembre del 2009, y 07 de enero del 2010. Cada muestreo se realizó con tres plantas por invernadero. En cada muestreo se determinó el peso seco de hojas, tallos y frutos, previo secado a 70°C hasta mantener peso constante durante 72 horas en una estufa de secado Marca: Shellab, Modelo: 1305U-20 /Analógica /200°C /56 L.

Para medir el área foliar de las plantas se desprendió cada una de las hojas junto con el peciolo y se realizó la medición con la ayuda de un medidor de área LI-3100C.

5.4. Tratamientos de temperatura

La temperatura se controló mediante ventilación y calefacción en ambos invernaderos, en el primer invernadero se utilizó sólo ventilación natural y en la etapa final del experimento cuando las temperaturas fueron más bajas se utilizaron dos calefactores de 1500 W durante la noche; por otro lado, en el otro invernadero el control de la temperatura fue mediante el uso de ventilación natural y ventilación forzada (dos ventiladores de 373 W) colocados en las paredes del invernadero y programados para accionarse a los 25°C durante el día y en la noche el incremento de la temperatura fue realizado por medio de tres calefactores eléctricos de 1500 W de accionamiento manual.

Todo esto con el fin de mantener condiciones de temperatura diferentes en cada invernadero pero buscando la misma integral de temperatura para cada día lo largo del ciclo de cultivo.

5.5. Método de integración de la temperatura

El método de integración de los datos de temperatura fue el del trapecio. Según Mathews y Fink, (2000), un método intuitivo para hallar el área limitada por una curva $y = f(x)$ en un intervalo $[a, b]$ es dar una aproximación a dicha área sumando las áreas de una serie de trapecios contruidos sobre los intervalos $\{[x_k, x_{k+1}]\}$ de una partición de $[a, b]$ (Figura 3.2).

Se supone que se divide el intervalo $[a, b]$ en M subintervalos $[x_k, x_{k+1}]$ de anchura común $h = (b-a)/M$ mediante una partición cuyos nodos $x_k = a + kh$, para $k = 0, 1, \dots, M$, están igualmente espaciados. La regla compuesta del trapecio con M subintervalos se puede expresar de cualquiera de las siguientes formas equivalentes.

$$T(f, h) = \frac{h}{2} \sum_{k=1}^M (f(x_{k-1}) + f(x_k)) \quad (3.1a)$$

O bien

$$T(f, h) = \frac{h}{2} (f_0 + 2f_1 + 2f_2 + 2f_3 + \dots + 2f_{M-2} + 2f_{M-1} + f_M) \quad (3.1b)$$

O bien

$$T(f, h) = \frac{h}{2} (f(a) + f(b)) + \sum_{k=1}^{M-1} f(x_k) \quad (3.1c)$$

Este valor es una aproximación a la integral de $f(x)$ en $[a, b]$, lo escribe como

$$\int_a^b f(x) dx \approx T(f, h) \quad (3.2)$$

Aplicando la regla del trapecio sobre cada intervalo $[x_{k-1}, x_k]$ y usando la propiedad de aditividad de la integración, se tiene:

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{k=1}^M \int_{x_{k-1}}^{x_k} f(x) dx \approx \sum_{k=1}^M \frac{h}{2} (f(x_{k-1}) + f(x_k)) \quad (3.3)$$

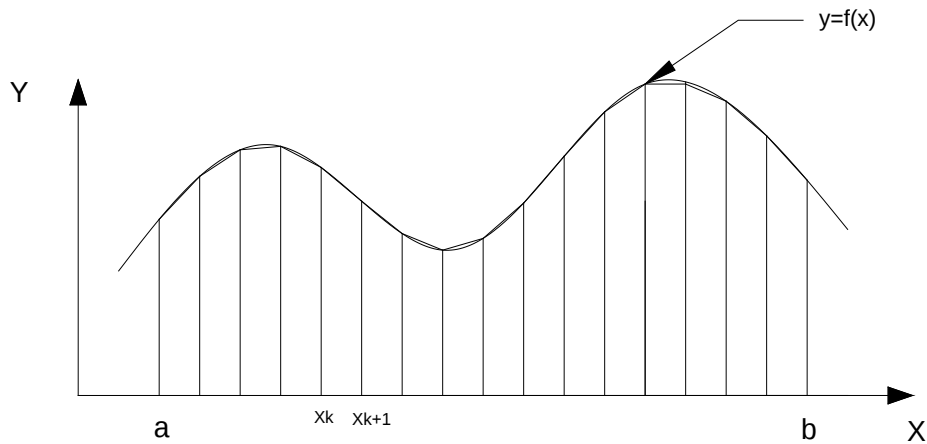


Figura. 3.2. Método de integración del trapecio.

5.6. Métodos para calcular la contante térmica.

Comúnmente ésto se hace en Grados-Día o Unidades Calor, que expresan el calor efectivo para el crecimiento de las plantas acumulado durante el día. Se sabe que a partir de ciertas temperaturas toda planta empieza a crecer. A dicha temperatura, se le conoce como temperatura cardinal mínima, pero también se le llama cero vital, cero fisiológico o temperatura base, por lo tanto, arriba del cero vital se presentan las temperaturas efectivas para el crecimiento de las plantas. La temperatura base varía con la especie y con los diferentes periodos fenológicos (Romo y Arteaga, 1983). Las unidades calor se han relacionado con las etapas fenológicas y es posible calendarizar las diferentes etapas de una planta (Ortiz, 1987).

Las unidades calor, expresadas en Grados-Días de Desarrollo (GDD), pueden ser usadas para describir el desarrollo de cultivos. Con este método, la duración de un proceso o el tiempo necesario para llegar a un estado particular de

desarrollo se expresa en GDD (°C día) en lugar del número de días. Los grados días de desarrollo (GDD) se calculan restando la temperatura base (T_{base}) de la temperatura promedio del aire (T_{prom}) (Raes, *et al.*, 2010).

$$GDD = T_{prom} - T_{base} \quad (3.4)$$

La temperatura base (T_{base}) es la temperatura por debajo del cual el desarrollo del cultivo se detiene. La temperatura del umbral superior ($T_{umbral-superior}$) especifica la temperatura sobre la cual el desarrollo del cultivo ya no aumenta con el incremento de la temperatura del aire.

Primer método

La temperatura promedio del aire (T_{prom}) presentada por McMaster y Wilhelm (1997) está dado por:

$$T_{prom} = \frac{(T_{max} - T_{min})}{2} \quad (3.5)$$

Donde T_{max} es la temperatura máxima diaria y T_{min} es la temperatura mínima diaria. Si la T_{prom} es menor que T_{base} , entonces T_{prom} es tomada como T_{base} (resultando en 0 °C día para ese día). Si T_{prom} es mayor que $T_{umbral-superior}$, entonces T_{prom} es tomada igual a $T_{umbral-superior}$ y los grados de crecimiento para ese día están en su máximo ($T_{umbral-superior} - T_{base}$).

Segundo método

En el método presentado por McMaster y Wilhelm (1997), la comparación con T_{base} y $T_{umbral-superior}$ se produce antes del cálculo de la temperatura promedio. La T_{max} y T_{min} se ajustan si caen por debajo de T_{base} o exceda $T_{umbral-superior}$ antes de que T_{prom} sea calculada. La temperatura promedio está dada por:

$$T_{prom} = \frac{(T_{max}^* - T_{min}^*)}{2} \quad (3.6)$$

Donde T_{max}^* y T_{min}^* son las temperaturas máximas y mínimas del aire ajustadas.

Mediante las siguientes sentencias.

La T_{max}^* , es la temperatura máxima del aire ($T_{max}^* = T_{max}$). Si T_{max} es mayor que $T_{umbral-superior}$, entonces $T_{max}^* = T_{umbral-superior}$, si T_{max} es menor que T_{base} , entonces $T_{max}^* = T_{base}$.

Por otro lado, la T_{min}^* es la temperatura mínima del aire ($T_{min}^* = T_{min}$). Si T_{min} es mayor que $T_{umbral-superior}$, entonces $T_{min}^* = T_{umbral-superior}$, si T_{min} es menor que T_{base} , entonces $T_{min}^* = T_{base}$.

Tercer método

Como en el método 2, la comparación de T_{base} se produce antes del cálculo de la temperatura promedio (Raes, *et al.*, 2010). La temperatura promedio está dada por:

$$T_{prom} = \frac{(T_{max}^* - T_{min})}{2} \quad (3.7)$$

Donde T_{max}^* es la temperatura máxima del aire ajustada y T_{min} es la temperatura mínima del aire.

Mediante las siguientes sentencias:

La T_{max}^* es la temperatura máxima del aire ($T_{max}^* = T_{max}$). Si T_{max} es mayor que $T_{umbral-superior}$, entonces $T_{max}^* = T_{umbral-superior}$, si T_{max} es menor que T_{base} , entonces $T_{max}^* = T_{base}$. Por otro lado, T_{min} no es ajustado. Sin embargo, si T_{min} excede $T_{umbral-superior}$, T_{min} será igual a $T_{umbral-superior}$.

El segundo método descrito anteriormente fue el que se aplicó en el presente trabajo.

5.7. Modelo simplificado Tomgro

Para realizar simulaciones de crecimiento, se utilizó el modelo Tomgro simplificado (Jones *et al.*, 1999).

TOMato GROwth (Crecimiento de Tomate, Tomgro) (Jones *et al.*, 1991) es un modelo mecanicista complejo (con 69 variables de estado), para el cultivo de jitomate, el cual predice desarrollo y producción. El modelo responde a las variables ambientales: temperatura, radiación solar y concentración de CO₂ dentro del invernadero.

Un modelo dinámico del crecimiento de jitomate (Jones *et al.*, 1999) fue simplificado del modelo Tomgro para reducir el número de variables de estado a cinco. Las variables de estado en este modelo consisten en: número de nodos (N), índice de área foliar (LAI), peso seco total (W), materia seca de frutos (W_F) y materia seca de frutos maduros (W_M).

El modelo original fue desarrollado para el crecimiento de jitomate indeterminado bajo un sistema de producción en invernadero.

Número de nodos (N)

La tasa de incrementos de nodos (dN/dt) es calculada en base a un coeficiente empírico que indica la velocidad de aparición de nodos por día (N_m) multiplicado por una función lineal que depende de la temperatura $f_N(T)$.

$$\frac{dN}{dt} = N_m \cdot f_N(T) \quad (3.8)$$

$$f_N(T) = \begin{cases} 0 & T < 9^\circ C \\ 0.1833(T - 9) & 9^\circ C \leq T < 12^\circ C \\ 0.028125(T - 12) + 0.55 & 12^\circ C \leq T < 28^\circ C \\ 1.0 - 0.4545(T - 28) & 28^\circ C \leq T < 50^\circ C \\ 0 & T \geq 50^\circ C \end{cases}$$

Esta variable de estado es calculada de la misma manera en todas las versiones de Tomgro (Jones *et al.*, 1999).

Índice de área foliar (LAI)

La ecuación desarrollada por Goudriaan y Monteith (1990) se utilizó para la tasa de crecimiento de índice de área foliar hasta una edad de desarrollo máxima.

$$\frac{dLAI}{dt} = \rho \cdot \delta \cdot \lambda \cdot (T_d) \frac{\exp[\beta \cdot (N - N_b)]}{1 + \exp[\beta \cdot (N - N_b)]} \cdot \frac{dN}{dt} \quad \text{si } LAI \leq LAI_{\max}$$

$$\frac{d(LAI)}{dt} = 0.0 \quad \text{si } LAI > LAI_{\max} \quad (3.9)$$

Donde el incremento del índice de área foliar ($\frac{dLAI}{dt}$) es calculada mediante la densidad de plantas (ρ) {No [plantas] m⁻²[suelo]}, máxima expansión de área foliar por nodo (δ) {m² [hojas] nodo⁻¹}, temperatura promedio diaria (T_d) {°C}, coeficiente empírico(β) {nodos⁻¹}, número de nodos (N) {No nodos}, puede ser un parámetro constante o bien una función lineal a tramos dependiente de la temperatura promedio diaria(N_b) {nodos} y tiene los siguientes valores:

$$N_b = \begin{cases} 46.5 & T_d < 9^\circ C \\ 46.5 - 4.0(T_d - 8.5) & 8.5^\circ C \leq T_d < 12.5^\circ C \\ 30.5 - 2.0(T_d - 12.5) & 12.5^\circ C \leq T_d < 16.5^\circ C \\ 22.5 - 1.0(T_d - 16.5) & 16.5^\circ C \leq T_d < 20.5^\circ C \\ 18.5 - 0.5(T_d - 20.5) & 20.5^\circ C \leq T_d < 24.5^\circ C \\ 16.5 - 0.25(T_d - 24.5) & 24.5^\circ C \leq T_d < 28.5^\circ C \\ 15.5 - 0.125(T_d - 28.5) & 28.5^\circ C \leq T_d < 32.5^\circ C \\ 15.0 - 0.125(T_d - 32.5) & 32.5^\circ C \leq T_d < 40.5^\circ C \\ 14.0 & T_d \geq 40.5^\circ C \end{cases}$$

El parámetro ha sido utilizado en diferentes adaptaciones del modelo reducido como un parámetro constante (Jones, 1999).

Cuando el conjunto de hojas en la planta alcanza su máximo, éstas serán podadas o bien entraran en estado de senescencia, y es en ese momento cuando se define $LAI_{\max}$.

Materia seca total (W)

La tasa de cambio de materia seca en los cultivos es de gran importancia para determinar el rendimiento de frutos y el tejido vegetal. La acumulación de biomasa en el modelo reducido es el resultado de la fotosíntesis, respiración y procesos de conversión de tejidos. Además, las hojas pueden envejecer y reducir la biomasa total de la planta. La senescencia ocurre después de que las plantas alcanzan su máximo índice de área foliar. La tasa de cambio de materia seca total de la planta, sin incluir materia seca de raíces, tiene la siguiente expresión:

$$\frac{dW}{dt} = GR_{net} - p_1 \cdot \rho \cdot \left(\frac{dN}{dt} \right) \quad (3.10)$$

Donde p_1 es un parámetro que pondera la pérdida de materia seca por nodo después de que se alcanza el máximo de área foliar $LAI_{\max}$ {g [hojas] nodo⁻¹}, la densidad de plantas (ρ) {No [plantas] m⁻²[suelo]}, GR_{net} es una función que expresa el crecimiento de la planta {g m⁻² d⁻¹} y se define así:

$$GR_{net} = E \cdot (P_g - R_m) \cdot [1 - f_R(N)] \quad (3.11)$$

Donde P_g es fotosíntesis $\{g[CH_2O] m^{-2}[suelo]d^{-1}\}$ usando las ecuaciones de (Acock, 1991) y parámetros (Jones et al., 1991; Kenig y Jones, 1997), R_m respiración $\{g[CH_2O] m^{-2}[suelo]d^{-1}\}$, E es la eficiencia de crecimiento $\{g[peso seco]g^{-1}[CH_2O]\}$, un parámetro que expresa la conversión de carbohidratos a materia seca, y $f_R(N)$ es la fracción de crecimiento distribuido a raíces y se considera como una función del número de nodos. La fotosíntesis está dada por la siguiente ecuación:

$$P_g = \frac{C_{cnvfot} F_{\max} f_{tot}(T)}{CK} \ln \left[\frac{(1-C_m)F_{\max} + \alpha CK \cdot V_{RFA}}{(1-C_m)F_{\max} + \alpha CK \cdot V_{RFA} \exp(-CK \cdot X_{LAI})} \right] \quad (3.12)$$

Donde CK es el coeficiente de extinción de la luz a través del dosel, C_m es el coeficiente de transmisión de la luz por las hojas, V_{RFA} es la radiación fotosintética activa, α es la eficiencia de aprovechamiento de la radiación de la hoja, C_{cnvfot} es el coeficiente para conversión de unidades de $\mu mol(CO_2)m^{-2}s^{-1}$ a $g(CH_2O)m^{-2}min^{-1}$, es una función que modifica la fotosíntesis para temperaturas subóptimas a través del día. Y $F_{\max}$ calcula el efecto de CO_2 de la siguiente manera:

$$F_{\max} = \tau \cdot V_{CO_2} \quad (3.13)$$

Donde τ es un parámetro de eficiencia en la utilización de dióxido de carbono y V_{CO_2} es la concentración de CO_2 en el interior del invernadero.

La función f_{tot} es lineal a tramos y tiene los siguientes valores:

$$f_{t_{\text{tot}}} = \begin{cases} 0 & T < 0^\circ \text{C} \\ 0.0744T & 0^\circ \text{C} \leq T < 9.0^\circ \text{C} \\ 0.67 + 0.11(T - 9) & 9.0^\circ \text{C} \leq T \leq 12.0^\circ \text{C} \\ 1.0 & 12.0^\circ \text{C} < T \leq 28.0^\circ \text{C} \\ 1.0 - 0.1429(T - 28) & 28.0^\circ \text{C} < T < 35.0^\circ \text{C} \\ 0 & T \geq 35.0^\circ \text{C} \end{cases}$$

La respiración se expresa como:

$$R_m = \int_{ti}^{tf} Q_{10}^{(T-20)/10} \cdot r_m \cdot (W - W_M) \cdot dt$$

Donde T es la temperatura del aire $\{^\circ\text{C}\}$, Q_{10} es la sensibilidad de respiración a la temperatura y r_m es un coeficiente de respiración de mantenimiento $\{\text{g}[\text{CH}_2\text{O}]\text{g}^{-1}[\text{peso seco}]\text{d}^{-1}\}$, ti es el tiempo inicial $\{\text{d}\}$ y tf es el tiempo final $\{\text{d}\}$. La respiración es calculada actualizando en el tiempo la materia que se ha convertido en frutos maduros, eso significa que en cuanto un fruto ha llegado a su madurez es inmediatamente cosechado.

La función $f_R(N)$ es una función lineal a tramos con los siguientes valores:

$$f_R(N) = \begin{cases} 0.2 & N = 1 \\ 0.2 - 0.0045(N - 1) & 1 < N \leq 12 \\ 0.15 - 0.0056(N - 12) & 12 < N \leq 21 \\ 0.10 - 0.0033(N - 21) & 21 < N < 30 \\ 0.07 & N \geq 30 \end{cases}$$

Materia seca de fruto (W_F)

El peso seco de fruto se calcula mediante la introducción de un coeficiente de la fracción de crecimiento de la biomasa aérea particionado diariamente los frutos después de iniciar el desarrollo de frutos. Usando la siguiente ecuación:

$$\frac{dW_F}{dt} = GR_{net} \cdot \alpha_F \cdot f_F(T_d) \cdot [1 - e^{-g(N - N_{FF})}] \times g(T_{día}) \quad (3.14)$$

$$si \quad N \leq N_{FF}$$

Donde (GR_{net}) es el incremento de peso seco de fruto {g [peso seco] m⁻²[suelo] d⁻¹}, (α_F) es un parámetro que indica la máxima distribución de crecimiento de frutos {[fracción] d⁻¹}, la función ($f_F(T_d)$) calcula el efecto de la temperatura promedio diaria sobre la distribución entre crecimiento vegetativo y reproductivo en condiciones de temperaturas bajas {adimensional [función de 0 a 1]}, (g) es el coeficiente de transición entre crecimiento vegetativo y fruto completo {nodo⁻¹}, indica el número de nodos que tiene la planta cuando aparece el primer fruto (N_{FF}) {nodo}, la temperatura promedio durante el día ($T_{día}$) {°C}.

$$f_F(T_d) = \begin{cases} 0 & T_d \leq 12.5^\circ C \\ 0.1(T_d - 12.5) & 12.5^\circ C < T_d \leq 16.5^\circ C \\ 0.4 + 0.095(T_d - 16.5) & 16.5^\circ C < T_d \leq 20.5^\circ C \\ 0.78 + 0.055(T_d - 20.5) & 20.5^\circ C < T_d \leq 24.5^\circ C \\ 1.0 - 0.25(T_d - 24.5) & 24.5^\circ C < T_d < 28.5^\circ C \\ 0 & T_d \geq 28.5^\circ C \end{cases}$$

$$GR_{net} = E \cdot (P_g - R_m) \cdot [1 - f_R(N)] \quad (3.15)$$

La tasa neta de crecimiento aéreo (GR_{net}) se calcula con la eficiencia en el crecimiento, la proporción de la biomasa de fotosintatos disponible para el crecimiento (E) {g [peso seco] g⁻¹[CH₂O]}, la fotosíntesis bruta, integrada en un día (P_g) {g [CH₂O] m⁻²[suelo] d⁻¹}, respiración de mantenimiento diaria (R_m) {g [CH₂O] m⁻²[suelo] d⁻¹}, fracción de la división de biomasa de raíces en función del desarrollo (nodo) ($f_R(N)$) {a dimensional [función de 0 a 1]}.

$$g(T_{día}) = 1.0 - 0.154 \cdot (T_{día} - T_{CRIT}) \quad (3.16)$$

Donde $T_{día}$ es la temperatura promedio de las horas con luz durante el día {°C} y T_{CRIT} es la temperatura por encima de la cual el crecimiento del fruto se reduce {°C} (Kenig y Jones, 1997).

Materia seca de frutos maduros (W_M)

En la versión del modelo Tomgro, el peso de frutos maduros es calculado mediante la siguiente expresión (Marcelis y Koning, 1995):

$$\frac{dW_M}{dt} = D_F(Td) \cdot (W_F - W_M) \quad (3.17)$$

$$\text{Donde } N > N_{FF} + \kappa_F$$

Donde W_F indica el número de nodos desde que aparece el primer fruto hasta que madura {nodo}, N_{FF} indica el número de nodos cuando aparece el primer fruto y $D_F(Td)$ es la función a tramos con los siguientes valores:

$$D_F(Td) = \begin{cases} 0 & Td \leq 9^\circ C \\ 0.0025Td & 9^\circ C < Td \leq 15^\circ C \\ 0.015 + 0.0058Td & 15^\circ C < Td \leq 21^\circ C \\ 0.05 & 21^\circ C < Td \leq 35^\circ C \\ 0.05 + 0.0033Td & 35^\circ C < Td \leq 50^\circ C \\ 0 & Td > 50^\circ C \end{cases}$$

5.8. Simulación del crecimiento de tomate mediante el modelo Tomgro simplificado

El modelo de crecimiento de jitomate se implementó en el ambiente MATLAB/SIMULINK. Este consta de un programa principal donde se definen los parámetros, las variables de entrada y las opciones de simulación; y un archivo C-MEX S-function donde se implementan las ecuaciones del modelo que es llamado por el programa principal a través de un archivo de SIMULINK. Para obtener la solución numérica del modelo se utilizó el método de integración de Runge-Kutta de cuarto orden con tamaño de paso de integración variable **ode23** con una tolerancia de 1×10^{-8} . El intervalo de tiempo de muestreo del modelo fue de un minuto.

Variables de entrada utilizadas en el modelo Tomgro

Las variables de entrada de la temperatura del aire en el interior del invernadero 1 se muestran en la (Figura 3.3), donde se presenta la temperatura media diaria y la temperatura media durante el día, la temperatura del invernadero 2 se muestra en la (Figura 3.4). Las variables del Dióxido de Carbono (CO_2) y Radiación Fotosintética Activa (RFA) fueron utilizadas para ambos invernaderos

las mismas condiciones, se estableció el CO₂ durante el día la concentración de 320 ppm y por la noche de 480 ppm (Figura 3.5).

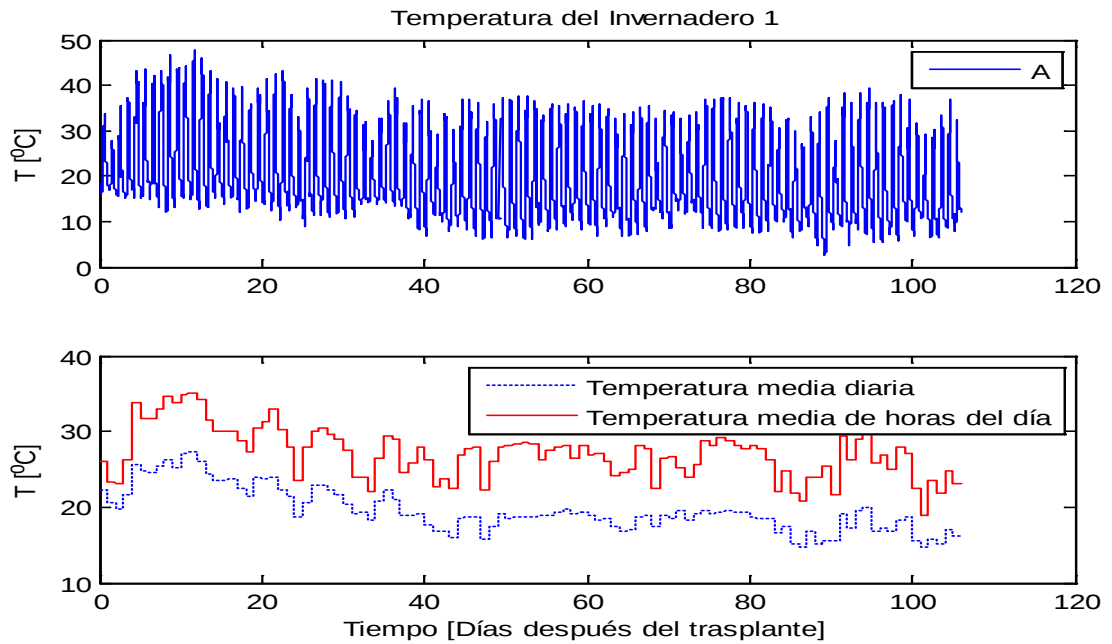


Figura 3.3. Variables de entrada de temperatura en el invernadero 1, A) Temperatura del aire, B) Temperatura media diaria y Temperatura media durante el día.

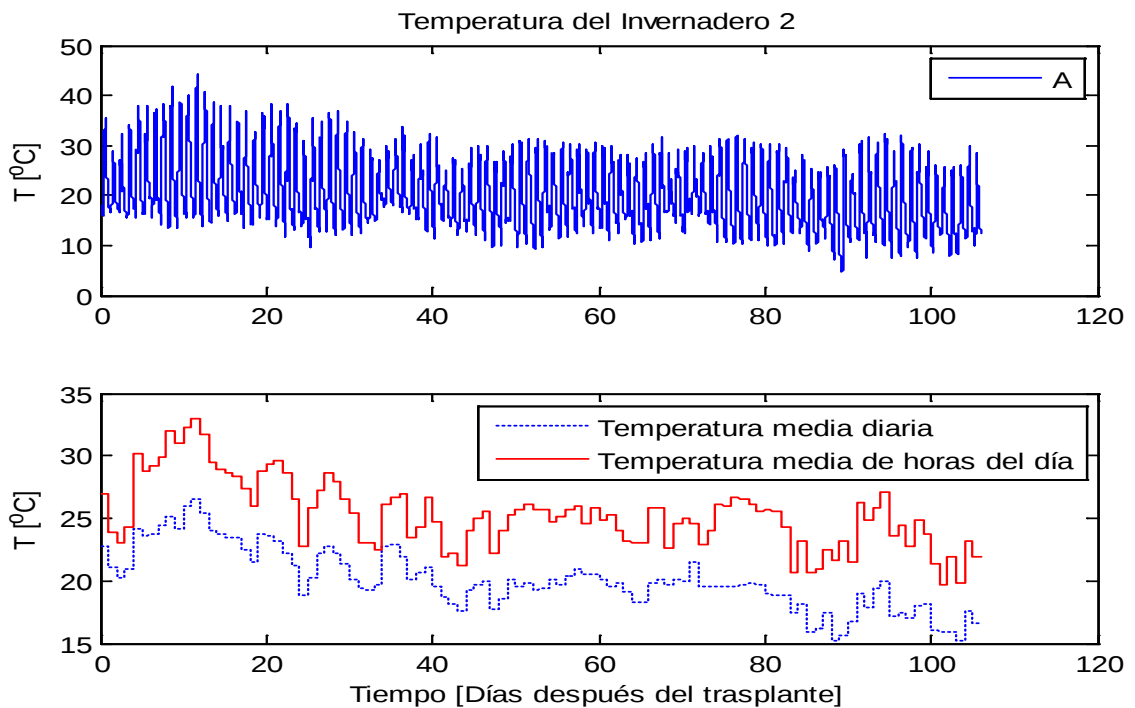


Figura 3.4. Variables de entrada de la temperatura en el invernadero 2, A) Temperatura del aire, B) Temperatura media diaria y Temperatura media durante el día.

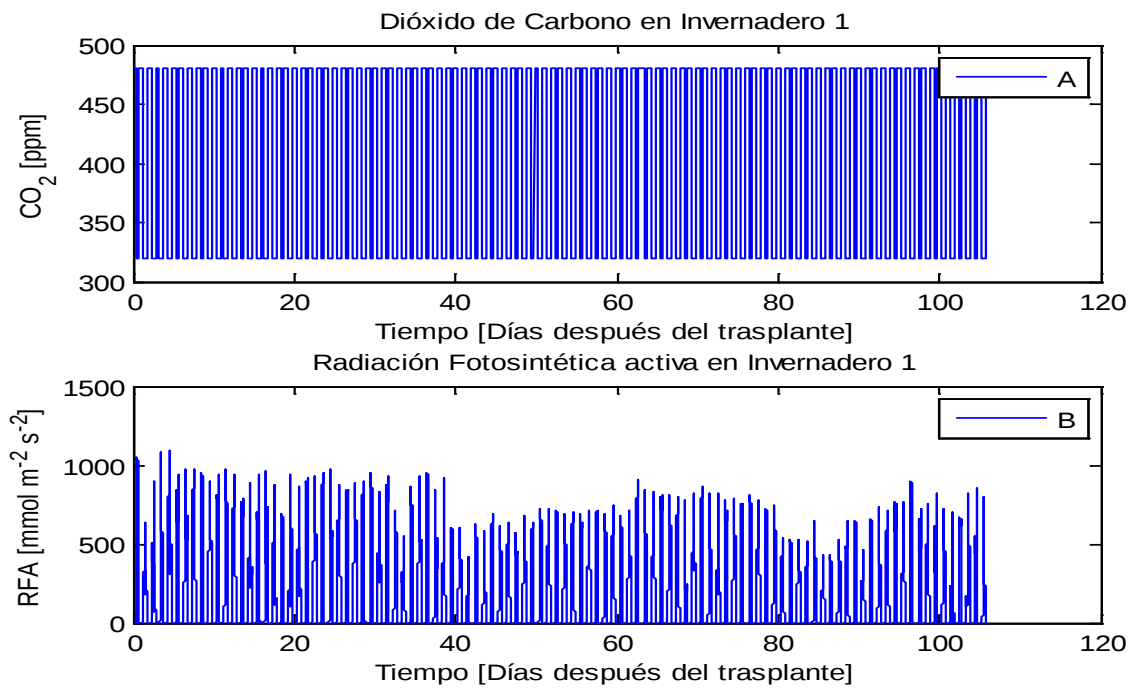


Figura 3.5. Variables de entrada de A) Dióxido de Carbono (CO₂) y B) Radiación Fotosintética Activa (RFA) para el invernadero 1 y 2

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.2. Manejo de la temperatura en el interior del invernadero

El control de la temperatura en el interior de ambos invernaderos se llevó a cabo con diferentes anchos de banda, en el invernadero 1 se realizó un manejo más cercano a las condiciones climáticas del exterior, mientras que en el invernadero 2 se realizó un control con ventilación y calefacción para obtener un ancho de banda más estrecho (Figura 4.1).

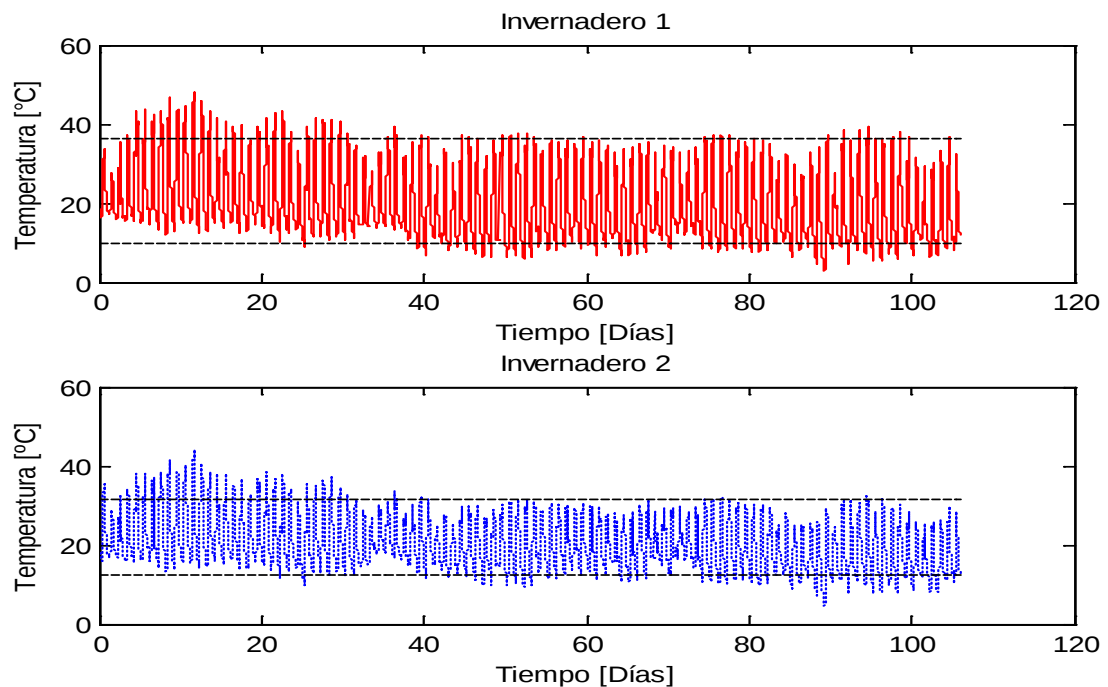


Figura 4.1. La temperatura durante el experimento en el cultivo de jitomate.

El registro de la temperatura se hizo desde el momento del trasplante de la plántula de jitomate. En el invernadero 1 la temperatura fluctuó entre 9.97°C y 36.36°C, mientras que en el invernadero 2 el rango estuvo entre 12.39°C y 31.39°C durante los días del experimento. Otros trabajos han desarrollado gran variedad de estrategias de control de la temperatura, en jitomate De Koning (1990) manejó entre 15°C y 24°C, en rosa Dieleman y Meinen, (2007) establecieron entre 15°C y 25°C, en pimiento morrón y flores por Rijdsdijk y Vogelezang, (2000) se mantuvo la temperatura entre 18°C y 25°C, y en crisantemo entre 16°C y 24°C por Körner, (2004); Adams *et al.*, (2009) utilizó distintas estrategias de temperatura en el cultivo de crisantemo, durante el día de 12, 15, 18 y 21°C y en la noche 16, 18, 19 y 20°C, y con una temperatura media diaria de 18°C.

Aunque hubo diferentes anchos de banda, en días calurosos se observó poca diferencia de temperatura en los dos invernaderos, como se muestra en la Figura 4.2.

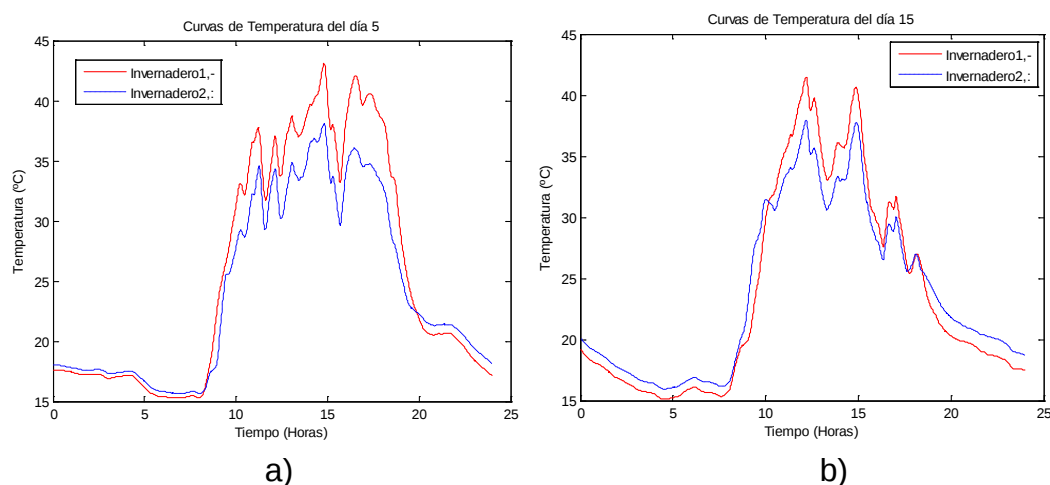


Figura 4.2. Temperatura en los invernaderos 1 y 2. (a) Día 5 después del trasplante y (b) Día 15 después del trasplante.

Durante la mayor cantidad de días se lograron establecer dos anchos de banda diferentes estadísticamente ($P \leq 0.05$) como se observa en la Figura 4.3., y en la cual se presentan a manera de ejemplo los anchos de banda correspondientes a los días 45 y 60 después del trasplante.

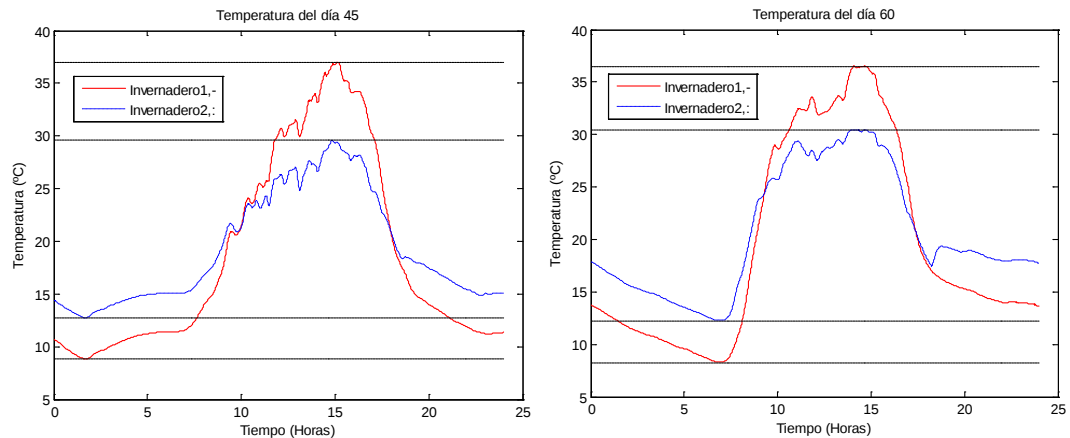


Figura 4.3. Temperatura de los invernaderos 1 y 2. (a) Día 45 después del trasplante y (b) día 60 después del trasplante.

4.2 Integración de temperatura

Un método de integración de la temperatura con un periodo promedio de 24 horas fue el del trapecio. Los resultados obtenidos de la integración de temperaturas durante el periodo de cultivo se analizaron estadísticamente, y la integral de temperatura para los dos invernaderos no tuvo diferencias significativas ($P \leq 0.05$). Se logró mantener la misma integral de temperatura en ambos invernaderos con diferente manejo por cada día (24 horas). El promedio de la temperatura acumulada por día en el invernadero 1 fue de 28218.94 °Cdía⁻¹ y para el invernadero 2 fue de 28916.25 °Cdía⁻¹.

Cuadro 4.1. Resultado del comportamiento de la temperatura dentro de dos invernaderos.

	T min _{prom} °C	T máx. _{prom} °C	T media. _{prom} °C	IT _{prom} °C día ⁻¹
Invernadero 1	9.97a	36.36a	19.61a	28218.94a
Invernadero 2	12.39b	31.39b	20.09a	28916.25a

Prueba Tukey (P=0.05). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, no presentan diferencia estadística. Tmin_{prom}: Temperatura mínima promedio de todo el ciclo, Tmáx_{prom}: Temperatura máxima promedio de todo el ciclo, Tmedia_{prom}: Temperatura media promedio de todo el ciclo, IT_{prom}: Integración de Temperatura promedio por día.

En el Cuadro 4.1., se muestran los promedios de las temperaturas mínimas, máximas, media y su integración durante el experimento, en el mismo cuadro se muestran diferencias significativas ($P=0.05$) de la temperatura mínima y máxima; mientras que la temperatura media y su integración no muestran diferencias significativas ($P=0.05$). Con ello se demuestra que se logró un manejo con diferentes condiciones de temperatura en el interior de los invernaderos pero manteniendo la misma integral de temperatura para cada día. En el Invernadero 1 se consiguió un ancho de banda de 26.39°C y en el invernadero 2 de 19°C. En experimentos realizados por otros autores se observan menores anchos de banda y diferentes periodos de integración, por ejemplo De Koning (1990) manejó 3°C y 6°C de ancho de banda, durante periodos de 3, 6 y 12 días de integración; Rijdsdijk y Vogelezang (2000) trabajaron con 4 y 8°C de ancho de banda, con periodos de integración de 24 horas; Körner (2004b) manejó anchos de banda de 4, 8, 12 y 16°C, con periodos de integración de 6 días; por otro lado Dieleman y Meinen (2007) utilizaron anchos de banda de 6 y 10°C, durante periodos de integración de 2 días y 14 días.

En el Cuadro 4.2., se presenta la frecuencia de las temperaturas mínimas, máximas y promedios a lo largo del experimento. Las temperaturas mínimas oscilaron de 5°C a 10°C con mayor frecuencia en el invernadero 1, y de 11 a 15°C en el invernadero 2; las temperaturas máximas se presentaron con mayor cantidad de días en el invernadero 1 entre los 36°C a 40°C muestran que en el invernadero 2 entre 26 a 30°C y la temperatura promedio se mantuvo con mayor cantidad de días entre 15°C a 20°C para los dos invernaderos.

Cuadro 4.2. Frecuencias de temperaturas para dos invernaderos.

	°C	Inv. 1 (No. Días)	Inv. 2 (No. Días)
Temp. Mínima	< 5	3	1
	5 – 10	63	34
	11 – 15	38	62
	16 – 20	2	9
Temp. Máxima	20 – 25	0	11
	26 – 30	10	49
	31 – 35	39	27
	36 – 40	40	17
	>40	17	2
Temp. Promedio	< 15	2	0
	15 – 20	76	76
	21 – 25	24	28
	>25	4	2

Inv. : Invernadero; Temp.: Temperatura; °C: Grados Celsius.

4.4 Acumulación de materia seca en el cultivo de jitomate.

Los resultados obtenidos de materia seca en hojas, tallos y frutos del cultivo de jitomate se mencionan a continuación.

La prueba de comparación de medias de Tukey (0.05) indicó que para los órganos de las plantas (hoja, tallo y fruto; y área foliar (AF)) de ambos

invernaderos no se encontró diferencia significativa, aunque en el caso de materia seca de frutos se encontró una tendencia a ser mayor en el invernadero 2 en un 12.8%. Lo anterior coincide con resultados previos, en los que se establecen que no se encuentra diferencia en el crecimiento y desarrollo de la planta de jitomate, con periodos de integración de 6,12 y 24 días y amplitudes de temperatura de 3 y 6°C (De Koning, 1990).

El análisis estadístico realizado para ambos invernaderos por muestreo, indica que hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en dos partes específicas de la planta para alguna etapa de desarrollo del cultivo, como es el caso del segundo muestreo en el que se encontró diferencia en el peso seco del sistema reproductivo, que para ese momento era mayor el contenido de flores; y en el cuarto muestreo se encontró diferencia en el peso seco de tallo. Por otra parte en el resto de los muestreos la prueba de comparación de medias de Tukey ($P \leq 0.05$) indicó que al final del ciclo no hubo diferencias significativas en ninguna de las variables evaluadas (Cuadro 4.3). En Rijdsdijk y Vogelezang, (2000) se indica que el experimento de rosa tanto en la producción y floración, no se encontraron efectos en los diferentes manejos de integración de la temperatura. Para Körner (2004b), el desarrollo del cultivo de crisantemo fue retrasado solamente con el ancho de banda de temperatura de 16°C, el mejor régimen con respecto al crecimiento, desarrollo, calidad y ahorro de energía fue el 12°C. Mientras que Dieleman y Meinen (2007) experimentó con el cultivo de rosal, encontrando efectos en la longitud de los tallos. Por otro lado no hubo diferencia significativa ($P \leq 0.05$) en los parámetros de crecimiento entre dos

regímenes de integración de temperatura aplicados por Xiuming *et al.*, (2008) en el cultivo de jitomate.

Cuadro 4.3. Respuesta de materia seca de hoja, tallo y fruto e Índice de Área Foliar.

		IAF m ² m ⁻²	PSH g m ⁻²	PST g m ⁻²	PSF g m ⁻²
23 ddt	Invernadero 1	0.2166a ^z	10.73a	3.00a	0.04a
	Invernadero 2	0.2366a	10.84a	2.83a	0.04a
	Media	0.2266	10.78	2.91	0.04
	DMS	0.0262	1.4374	0.488	0
	CME	0.000133	0.4020	0.0463	0
	CV (%)	5.09	5.87	7.37	0
37 ddt	Invernadero 1	0.86a	46.92a	16.46a	1.63a
	Invernadero 2	0.96a	54.60a	13.65a	1.08b
	Media	0.91	50.76	15.05	1.35
	DMS	0.3582	20.76	7.0212	0.4869
	CME	0.0249	83.8978	9.5925	0.0461
	CV (%)	17.30	18.04	20.56	15.79
54 ddt	Invernadero 1	1.60a	140.413a	33.04a	32.00a
	Invernadero 2	1.34a	118.027a	41.80a	35.40a
	Media	1.47	129.22	37.42	33.7
	DMS	1.0279	26.501	17.098	14.74
	CME	0.2055	136.65	56.88	42.28
	CV (%)	30.7051	9.04	20.15	19.29
78 ddt	Invernadero 1	2.89a	211.65a	83.80a	195.14a
	Invernadero 2	2.95a	185.67a	66.43b	218.39a
	Media	2.92	198.66	75.11	206.76
	DMS	0.6977	46.155	13.11	36.45
	CME	0.0947	414.52	33.46	258.54
	CV (%)	10.52	10.24	7.70	7.77
106 ddt	Invernadero 1	3.16a	263.11a	106.62a	307.42a
	Invernadero 2	3.49a	247.54a	87.01a	352.55a
	Media	3.32	255.32	96.81	329.98
	DMS	1.59	114.41	22.75	59.29
	CME	0.49	2547.15	100.72	684.07
	CV (%)	21.09	19.76	10.36	7.92

^z Valores con la misma letra dentro de cada columna no presentan diferencia significativa de acuerdo con la prueba de Tukey a una P≤0.05.

IAF: Índice Área Foliar. PSH: Peso Seco de Hoja. PST: Peso Seco de Tallo. PSF: Peso Seco de Fruto. DMS: Diferencia Mínima Significativa. CME: Cuadrado Medio del Error. *: Resultados promedios por invernadero. ddt: Días después del trasplante.

En la Figura. 4.4., se presenta una comparación gráfica de los resultados obtenidos de materia seca de frutos por m² durante el ciclo de cultivo. El

rendimiento expresado en materia seca de frutos de jitomate fue de 307.42 g m^{-2} y de 352.54 g m^{-2} para el invernadero 1 y 2 respectivamente a los 106 días después del trasplante, se observa una tendencia de 12.8 % mayor en el caso del invernadero con un sistema de control de la temperatura y menor ancho de banda.

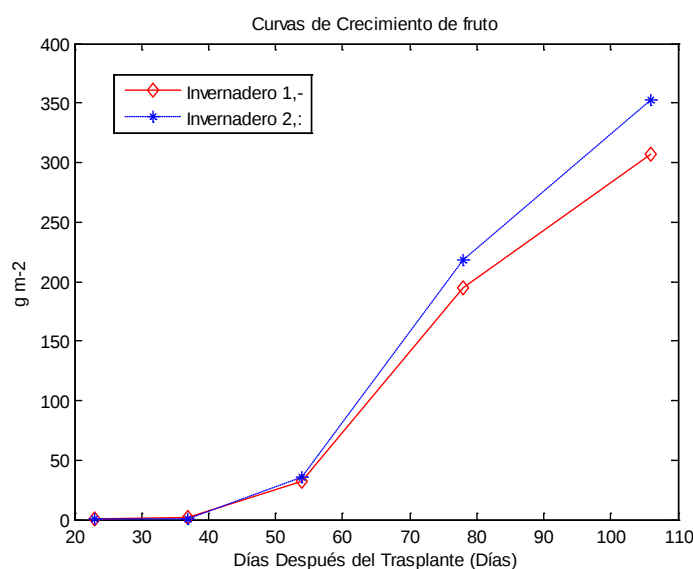


Figura 4.4. Comparación de la acumulación de materia seca de fruto de dos invernaderos.

La ganancia de materia seca de tallos en plantas de jitomate se comparó en la Figura 4.5., y se obtuvo 106.62 g m^{-2} y 87.01 g m^{-2} para el invernadero 1 y 2 respectivamente al final del ciclo. Al igual para las hojas de jitomate se observó que hay una ligera diferencia entre ambos invernaderos, siendo el Invernadero 1 de 263.11 g m^{-2} y en el invernadero 2 fue de 247.54 g m^{-2} a los 106 días (Figura 4.6).

Aunque no hubo diferencias significativas en Figura 4.5 y 4.6 se observa una tendencia en el invernadero menos controlado hacia mayor crecimiento

vegetativo en hojas y tallos del 5.91% y 18.39% respectivamente, mientras que en el controlado a mayor crecimiento reproductivo del 12.8%.

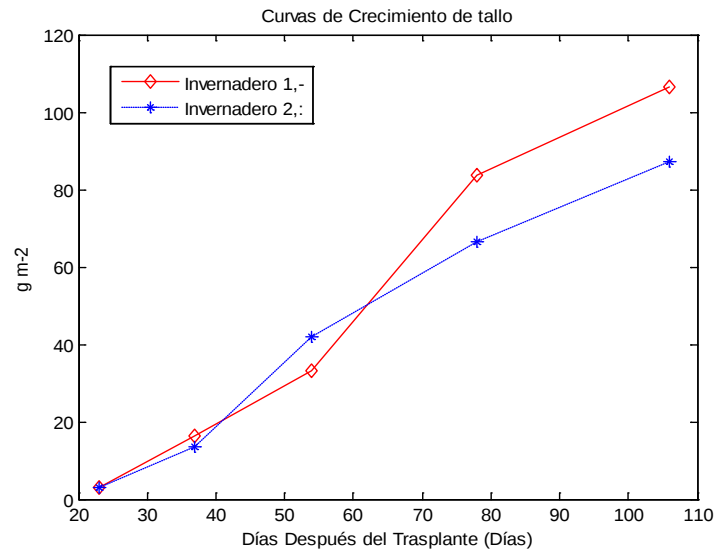


Figura 4.5. Comparación de la acumulación de materia seca de tallo de dos invernaderos.

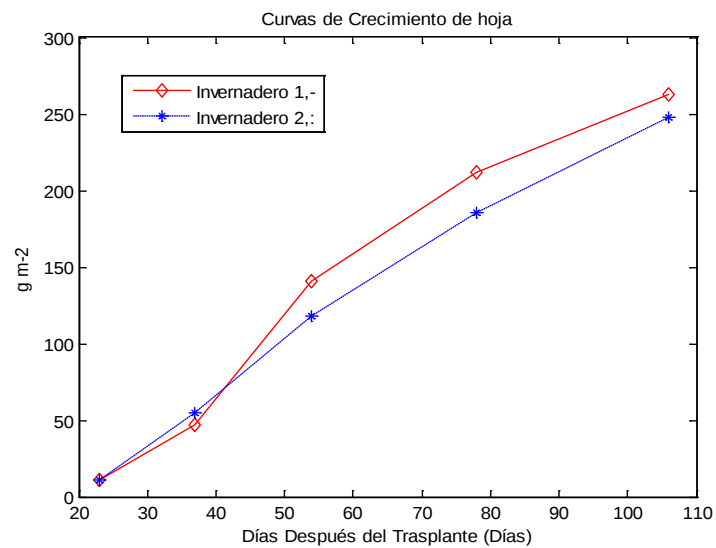


Figura 4.6. Comparación de la acumulación de materia seca de hoja de dos invernaderos.

En la Figura 4.7, se grafica el comportamiento del IAF para el caso de dos invernadero, en donde se observa una ligera tendencia a favor del invernadero 2. Pero estadísticamente no hay diferencia significativa ($P \leq 0.05$).

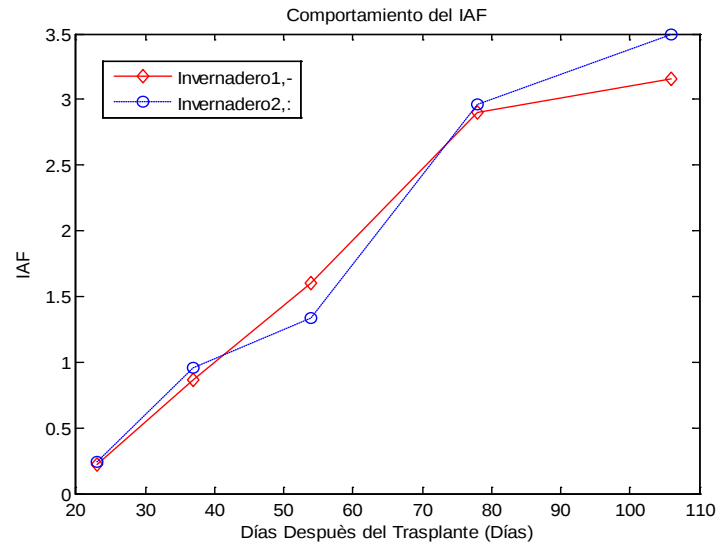


Figura 4.7. Curva de crecimiento del Índice de Área Foliar de dos invernadero.

En las Figuras 4.8 y 4.9, se observan los resultados obtenidos de materia seca de hojas, tallos, frutos y peso seco total de plantas en condiciones de temperatura del Invernadero 1 e invernadero 2 respectivamente.

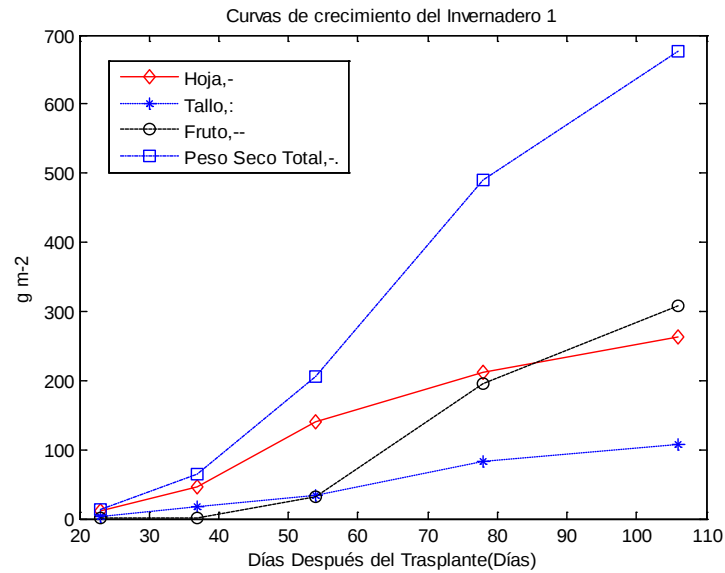


Figura 4.8. Curva de crecimiento de materia seca de hojas, tallo y fruto del invernadero 1.

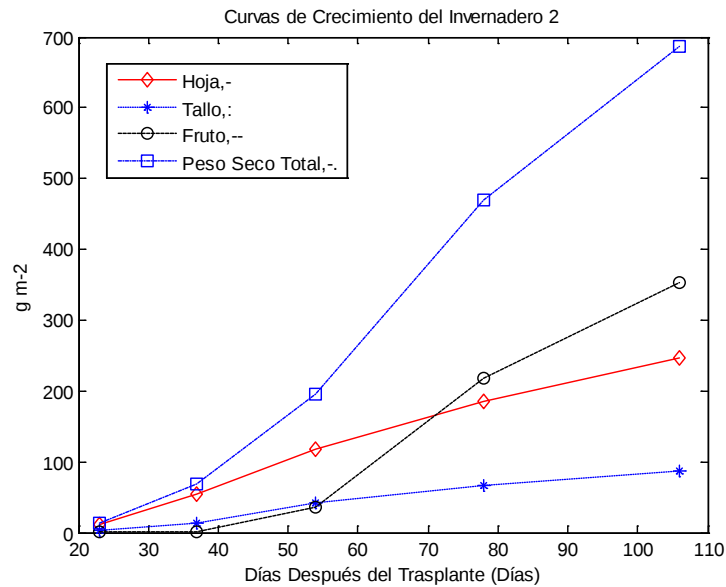


Figura 4.9. Curva de crecimiento de materia seca de hojas, tallo y fruto del invernadero 2.

La productividad de materia seca en función de la temperatura en los invernaderos 1 y 2 fue de $0.0239 \text{ g m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ y $0.0237 \text{ g m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ respectivamente. Lo que permite decir que se obtuvo la misma productividad para los dos invernaderos por cada grado de temperatura.

5.4. Grados Días de Desarrollo

Las unidades calor fueron calculadas con el segundo método estándar, reportado por McMaster y Wilhelm (1997), donde la $T_{\min}$ y $T_{\max}$ son las temperaturas mínimas y máximas del aire diarias respectivamente y la $T_{\text{base}}=10^{\circ}\text{C}$, si $T_{\max}>30^{\circ}\text{C}$, la $T_{\max}$ fue 30°C (Ortiz, 1987; Zalom y Wilson, 1999; Scholberg, *et al.*, 2000).

Los resultados obtenidos de las unidades calor se muestran en el Cuadro 4.4. Los valores de las Unidades Calor no presentaron diferencias significativas entre los dos invernaderos, lo que ayuda a entender porqué en diferentes invernaderos se tiene la misma duración de periodo de crecimiento en el cultivo de jitomate.

Cuadro 4.4. Valores de la constante térmica de dos invernaderos.

	GDD	T_{prom} $^{\circ}\text{C}$
Invernadero 1	897.1a	20.60a
Invernadero 2	903.4a	20.89a

Prueba Tukey ($P=0.05$). Cifras con la misma letra dentro de una misma columna, no presentan diferencia significativa. GDC: Grados Días de Crecimiento. Tprom: Es la temperatura promedio de todos los días del experimento.

Perry, *et al.*, (1997) han demostrado que la suma de la Unidad Calor puede mejorar la predicción de la fecha de cosecha en comparación con simplemente contar los días de emergencia a cosecha. Mientras que los resultados experimentales de Zalom y Wilson, (1999), indican que se requiere de un rango de 1100 a 1600 $^{\circ}\text{C}$ día, desde la emergencia de la plántula al 90% de frutos rojo

maduro y de 770°C día desde emergencia de plántula a fruto rosado, en jitomate. Los resultados del presente trabajo muestran que se requiere de 897.1 y 903.4 °C día para alcanzar un grado de madurez en el que los frutos tuvieron color parecido a naranja, en el invernadero 1 y 2 respectivamente. Las Unidad Calor es una variable importante, sin embargo, su capacidad de predicción depende del sitio específico del invernadero y de otras variables ambientales (Romo y Arteaga, 1983).

5.5. Consumo de energía

El consumo de energía fue 33.33% más bajo en el invernadero 1 comparado con el invernadero 2, esto por concepto de calefacción por m²; el consumo de energía fue de 62.7 W m⁻² día⁻¹ en el invernadero 2 por enfriamiento. El costo total económico de energía fue 39.52% más alto en el invernadero 2 comparado con el invernadero 1 (Cuadro 4.5). Estos resultados coinciden con resultados de varios autores, así Elings *et al.*, (2005) reportaron que en el cultivo de jitomate, se puede ahorrar energía en un 23% incrementando la insolación en la cobertura del invernadero y un 16% mediante temperaturas más bajas. Körner *et al.*, (2004a) mencionan que con un incremento en las fluctuaciones del clima en primavera y otoño, semanalmente puede disminuir el consumo de energía por más del 60% con un ancho de banda del 12°C de la integral de temperatura. Mientras que la investigación de Rijdsdijk y Vogelesang (2000) refiere a que a lo largo de un año el ahorro de energía fue de 8% con un ancho de banda de 4°C, mientras que con un ancho de banda de 8°C el ahorro fue de

18%. Sigrimis *et al.*, (2000) concluyen que un ahorro de energía de más 20% fue obtenido bajo condiciones de clima templado. Al igual se consigue ahorro de energía en función del tipo de estructura del invernadero como lo registran Djevic y Dimitrijevic (2008).

Mediante el uso de otras estrategias, Andersson y Skov (2005) obtuvieron un ahorro de energía del 40% con la utilización de pantallas térmicas. Lo anterior permite sugerir que la combinación de este tipo de estrategias con la integral de temperatura son opciones para reducción de consumo de energía en invernaderos.

Cuadro 4.5. Consumo de energía y costo económico para dos invernaderos.

	Invernadero 1	Invernadero 2
Calefacción (W m ⁻² día ⁻¹)	408.33	612.5
Calefacción (Costo \$ m ⁻² día ⁻¹)	0.71	1.07
Enfriamiento (W m ⁻² día ⁻¹)	0	62.7
Enfriamiento (Costo \$ m ⁻² día ⁻¹)	0	0.11
Consumo energético total de 106 días (kW)	3116.4	5153.16
Costo total energético (\$)		
Tarifas utilizadas	5,422.54	8,966.50
1. \$1.740/kWh <5000 kWh		

Las tarifas utilizadas se aplican exclusivamente a servicios que destinen la energía para uso agrícola durante el año 2010, Comisión Federal de Electricidad.

5.6. Modelo Tomgro simplificado

En esta investigación no se realizó calibración de los parámetros ya que se utilizaron los parámetros mencionado por Ramírez, (2005), el cual utilizó el método de mínimos cuadrados buscando el mínimo valor de la raíz del error cuadrado medio para la estimación de sus parámetros, con estos parámetros el modelo Tomgro simplificado describió el comportamiento del crecimiento y desarrollo de jitomate de manera adecuada.

Los resultados simulados fueron comparados con las variables medidas. Se encontró que las predicciones del modelo se aproximan bastante bien en algunas variables medidas y de manera más pobre en otras. El modelo Tomgro se simuló usando los valores de los parámetros mostrados en el Cuadro 4.7 y las condiciones iniciales para las variables de estado mostradas en el Cuadro 4.6.

Cuadro 4.6 Condiciones iniciales y densidad de planta de cada variable de estado.

Variable	Invernadero 1	Invernadero 2
ρ	2.0	2.0
N	3.16	3.5
LAI	0.025	0.025
W	0.61	0.61
W_F	0.0	0.0
W_M	0.0	0.0

Cuadro 4.7. Parámetros para Tomgro modelo reducido

Parámetro	Descripción	Rango de estimación	Valores publicados por otros autores	Chapingo 2010	Variable
N_m	Máxima velocidad de nodos	0.1 – 0.9	0.50*	0.57¶	Nodos (N)
N_b	Parámetro en ecuación expolineal	3 – 25	16*	7¶	IAF (LAI)
δ	Máxima expansión de área foliar	0.01 – 0.1	0.030	0.041¶	
β	Parámetro en ecuación expolineal	0.06 – 0.7	0.169*	0.5¶	
$V_{\max}$	Máximo incremento por nodo	2 – 12	8*	6¶	Materia seca total (W)
α	Eficiencia de uso de luz	0.01 – 0.5	0.0645**	0.09¶	
τ	Eficiencia de CO ₂	0.01 – 0.5	0.0693**	0.12¶	
CK	Coeficiente de extinción para radiación	0.3 – 0.9	0.58**	0.61¶	Materia seca de fruto (W _F)
C_E	Coeficiente de conversión a materia seca	0.5 – 0.9	0.7**	0.74¶	
T_{crit}	Temperatura crítica	17 – 32	24.4*	26¶	
α_F	Máxima distribución a frutos	0.1 – 0.95	0.95*	0.95¶	
ν	Transición vegetativa-fruto	0.05 – 0.9	0.20*	0.38¶	

*(Jones, *et al.*, 1999); ** (Jones, *et al.*, 1991); ¶ (Ramírez, 2005).

Simulaciones del modelo Tomgro en jitomate del invernadero 1

Las simulaciones a través del ciclo de cultivo y su comparación con los datos medidos se muestran en las Figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13, en las que se puede observar la dinámica de las variables a través de los días desde la fecha de trasplante hasta el final del ciclo. El número de nodos se estimó en el experimento desarrollado en condiciones del invernadero 1; la simulación puede considerarse bastante aceptable (Figura 4.10).

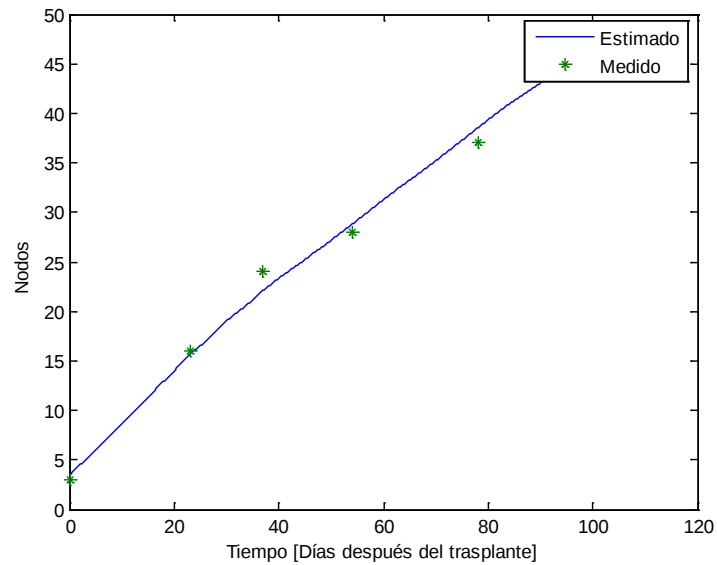


Figura 4.10. Simulación y datos medidos de cantidad de nodos en el invernadero 1.

Para la variable simulada del índice de área foliar muestra un ajuste bastante bien en comparación con los resultados medidos de esta variable (Figura 4.11).

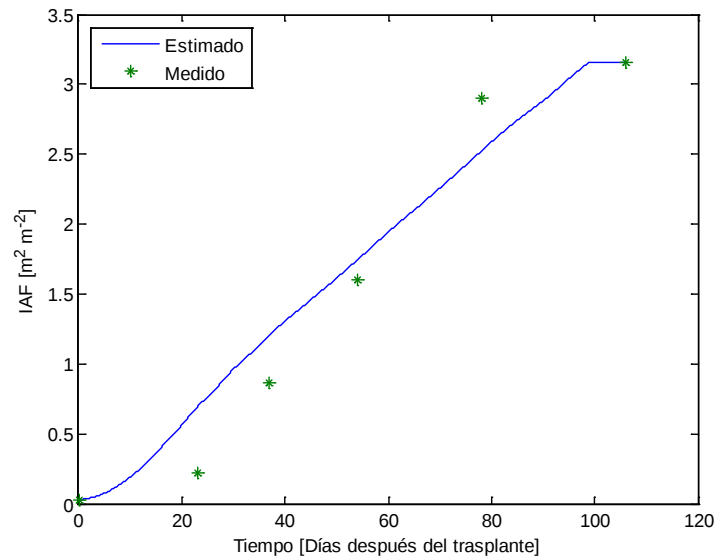


Figura 4.11. Simulación y datos medidos de Índice de Área Foliar en el invernadero 1.

Por otro lado se observa que en la variable simulada del peso seco total se ajusta bien a los datos medidos en las primeras cuatro mediciones, posterior a

ello, el modelo subestima el comportamiento de peso seco total en las dos últimas mediciones (Figura 4.12).

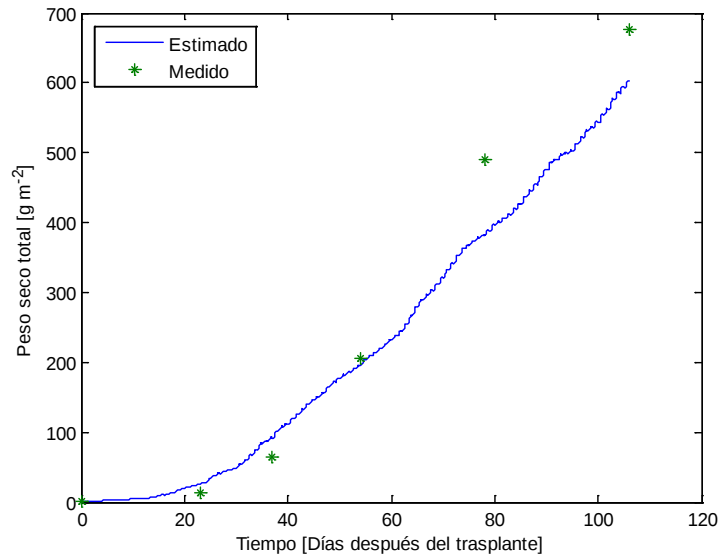


Figura 4.12. Simulación y datos medidos de peso seco total en el invernadero 1.

Para el caso de la variable del peso seco de frutos el comportamiento del modelo de crecimiento tiene una muy buena aproximación a los datos medidos (Figura 4.13).

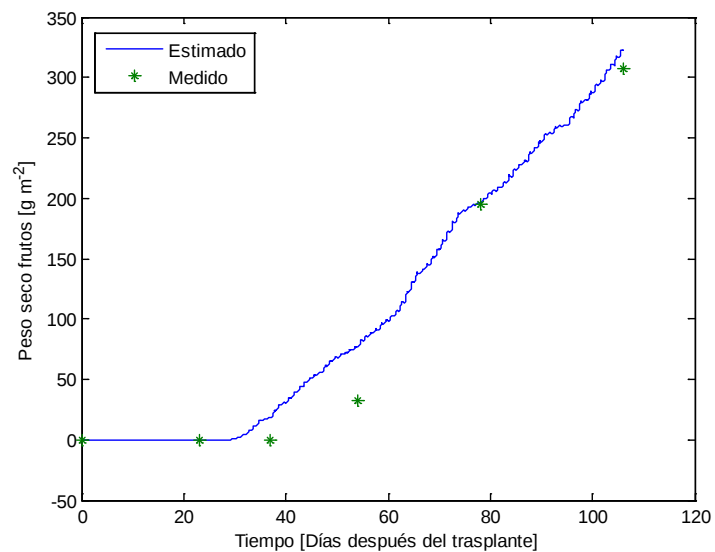


Figura 4.13. Simulación y datos medidos de peso seco de frutos en el invernadero 1.

Se encontró que la predicción de la variable del peso seco de frutos maduros en el invernadero 1 no se ajustó adecuadamente a los valores medidos, lo que sobreestima la simulación hasta por el doble de los datos medidos, por lo que requiere de calibración de los parámetros que influyen en esta variable, así como una mayor cantidad de datos medidos (Figura 4.14).

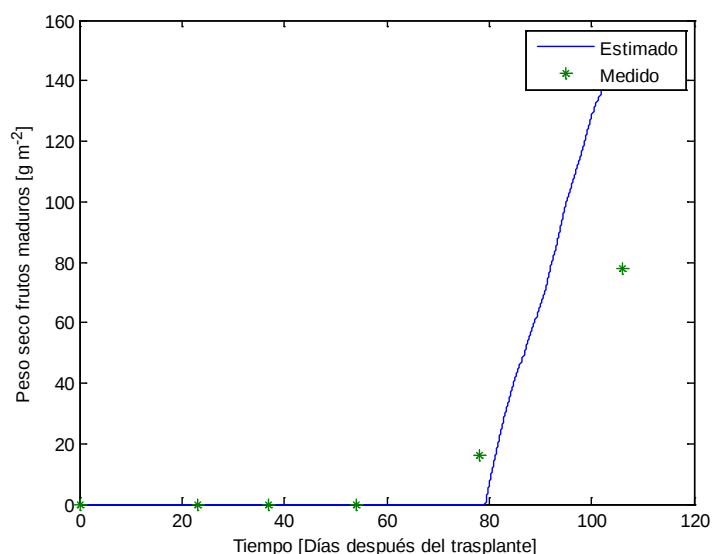


Figura 4.14. Simulación y datos medidos de peso seco fruto maduros en el invernadero 1.

Cuadro 4.8. Ecuaciones de regresión lineal y resultados de los índices estadísticos en el invernadero 1.

Variable	Ecuación de regresión	r^2	RMSE
Número de nodos (N)	$y = 1.024x - 0.4427$	0.9908	1.467
Índice de Área Foliar (LAI)	$y = 0.8523x + 0.3107$	0.9621	0.2527
Peso Seco Total (W)	$y = 0.8311x + 15.09$	0.9889	27.66
Peso Seco de Frutos (W_F)	$y = 0.9913x + 14.1$	0.9823	19.52
Peso Seco de Frutos Maduros (W_M)	$y = 1.996x - 5.301$	0.9579	14.61

Simulaciones del modelo Tomgro en jitomate del invernadero 2

El modelo de crecimiento de jitomate Tomgro, obtuvo un buen ajuste en número de nodos e índice de área foliar y un ajuste bajo en peso seco total y de frutos con respecto a las variables medidas a lo largo del experimento. El desajuste de algunas de las variables involucradas en el modelo se debe al efecto de la temperatura y porque se implementaron los mismos valores de los parámetros utilizados en el invernadero 1, con la finalidad de observar cual sería el efecto que involucra el manejo de las condiciones climáticas que en este caso fue únicamente la temperatura, y las otras variables de entrada como el dióxido de carbono y radiación fotosintética activa se mantuvieron las mismas para ambos invernaderos.

Se observa que la simulación se aproxima adecuadamente a los resultados medidos de la cantidad de nodos para el invernadero 2, también se muestra el momento donde se realizó la practica cultural de la eliminación apical del tallo semanas antes al término del experimento (Figura 4.15). En la (Figura 4.16) se muestra un buen ajuste del modelo a los valores medidos en campo del índice del área foliar.

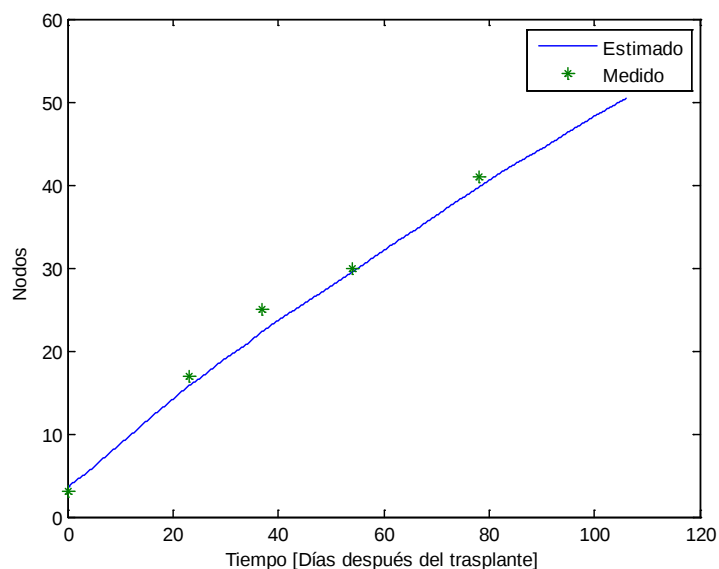


Figura 4.15. Simulación y datos medidos del número nodos en el invernadero 2.

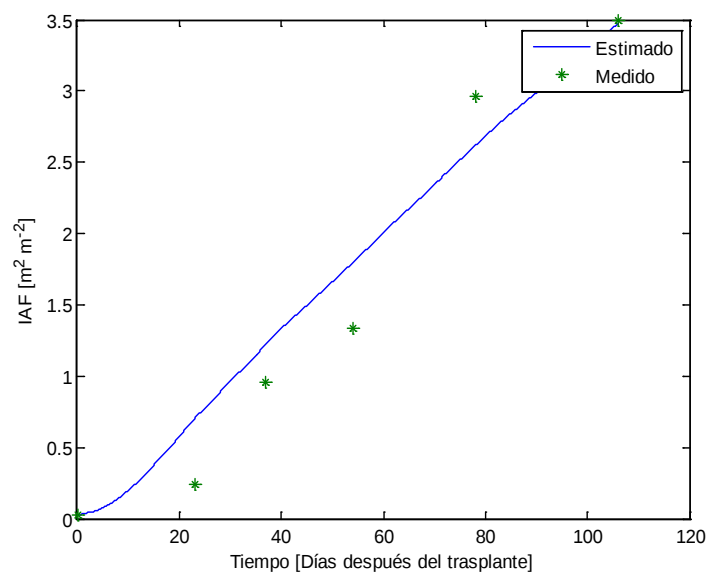


Figura 4.16. Simulación y datos medidos del Índice de Área Foliar en el invernadero 2.

De acuerdo a las simulaciones efectuadas en el invernadero 2 se puede observar que el peso seco total (Figura 4.17), pero seco de frutos (Figura 4.18) y muy fuertemente el peso seco de frutos maduros (Figura 4.19) hay una sobreestimación por parte del modelo hacia los datos medidos.

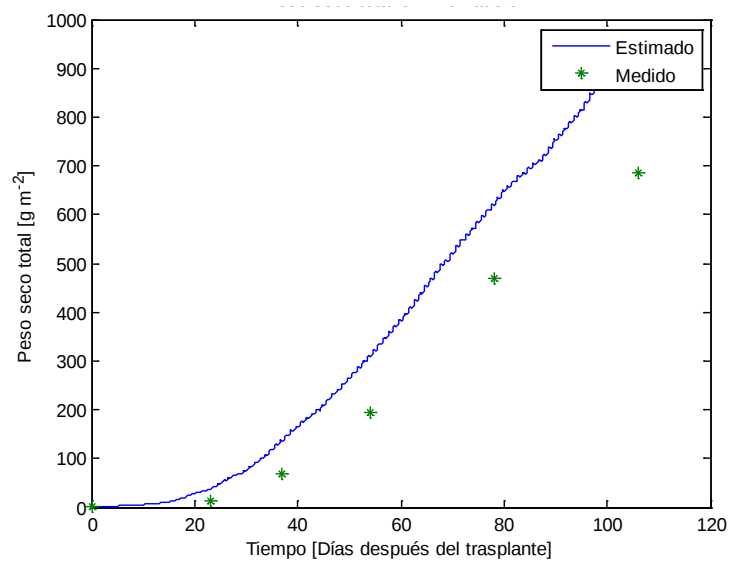


Figura 4.17. Simulación y datos medidos de peso seco total en el invernadero 2.

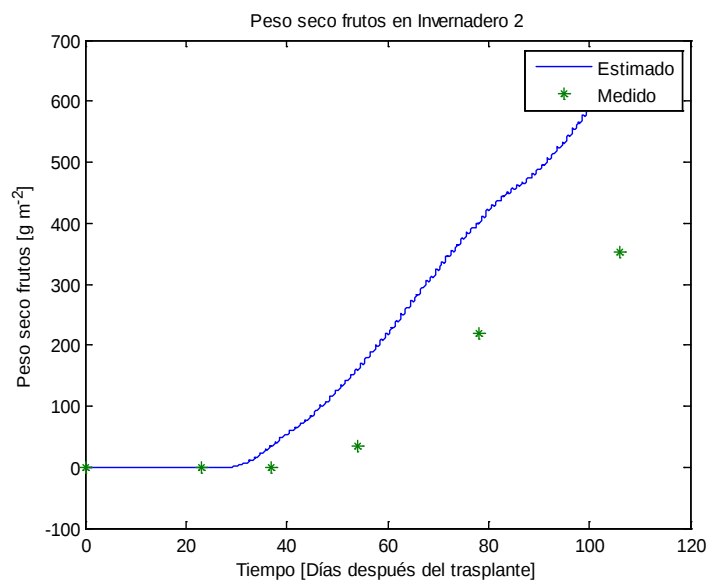


Figura 4.18. Simulación y datos medidos de peso seco de frutos en el invernadero 2.

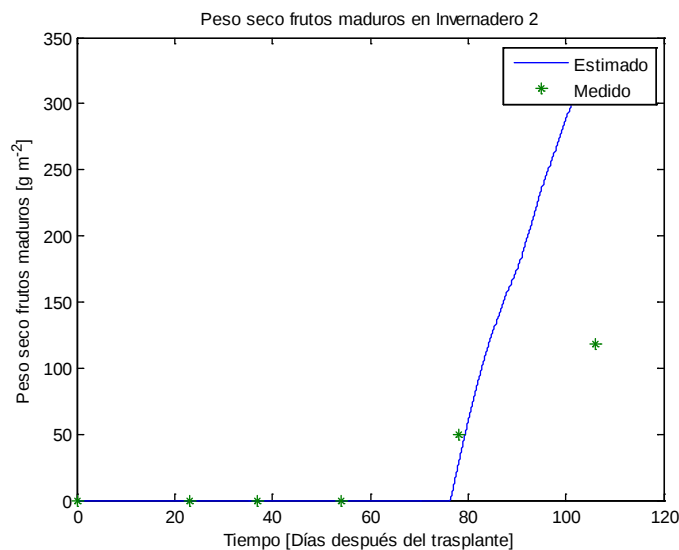


Figura 4.19. Simulación y datos medidos de peso seco de frutos maduros en el invernadero 2.

Cuadro 4.9. Ecuaciones de regresión lineal y resultados de los índices estadísticos en el invernadero 2

Variable	Ecuación de regresión	r^2	RMSE
Número de nodos (N)	$y = 0.9568x - 0.0912$	0.9946	1.155
Índice de Área Foliar (LAI)	$y = 0.8666x + 0.3328$	0.9602	0.2817
Peso Seco Total (W)	$y = 1.358x + 21.03$	0.9953	29.2
Peso Seco de Frutos (W_F)	$y = 1.719x + 30.91$	0.9804	40.67
Peso Seco de Frutos Maduros (W_M)	$y = 2.681x - 13.5$	0.8846	52.31

5. CONCLUSIONES

Se logró mantener la misma integral de temperatura en ambos invernaderos con diferente manejo de la temperatura por cada día (24 horas). La temperatura acumulada por día en el invernadero 1 fue de 28218.94 °Cdía⁻¹ y para el invernadero 2 fue de 28916.25°Cdía⁻¹.

Con la aplicación de la integral de temperatura no se encontró diferencias significativas entre invernaderos ($P \leq 0.05$), en el crecimiento y desarrollo del cultivo de jitomate. Se encontró una tendencia en el invernadero menos controlado hacia mayor crecimiento vegetativo en hojas y tallos del 5.91% y 18.39% respectivamente, mientras que en el controlado a mayor crecimiento reproductivo del 12.8%.

Con la implementación de la integral de temperatura se logró un ahorro de energía de 39.52% en el invernadero 1 en comparación con el invernadero 2, manteniendo en ambos invernaderos los mismos rendimientos.

El modelo *Tomgro simplificado* permite simulaciones del crecimiento y desarrollo de jitomate de manera adecuada en ambos invernaderos, sin embargo, en el invernadero 1 el peso seco de frutos maduros; y en el invernadero 2 el peso seco total, peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros presentaron sobreestimación por parte del modelo hacia los datos medidos.

LITERATURA CITADA

- Aaslyng, J. M., Andreassen, A.U., Korner, O., Lund, J.B., Jakonsen, L., Pedersen, J. S., Ottosen, C.O. y Rosenqvist, E. 2006. Integrated optimization of temperature, CO₂, screen use and artificial lighting in greenhouse crops using a photosynthesis model. *Acta Horticulturae* 711: 79-88.
- Acock, B. 1991. Modeling canopy photosynthetic response to carbon dioxide, light interception, temperature and leaf traits. *In Modeling Crop Photosynthesis from Biochemistry to Canopy*. 41-55, eds. K. J. Boote y R. S. Loomis. CSSA Special Pub. 19. Madison, Wis.: Crop Science Society of America.
- Adams, S.R., Valdes, V.M. y Fuller, D. 2009. The effects of day and night temperature on *Chrysanthemum morifolium*; investigating the safe limits for temperature integration. *The Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 84(6): 604-608.
- Adams, S.R. Cockshull, K.E. y Cave, C.R.J. 2001. Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits. *Annals of Botany*. 88: 869-877.
- AMPHI (Asociación Mexicana de Productores de Hortalizas en Invernadero). 2010. Pagina web. <http://www.hortalizas.com>. Consultada 05 de junio del 2010.

- Andersson N. E. y Skov O. 2005. Energy saving by modified and improved greenhouse construction and climatic control strategy. *Acta Horticulturae* 691: 533-540.
- Azcon-Bieto, J. y M. Talón. 1993. *Fisiología y Bioquímica Vegetal*. McGraw-Hill Interamericana de España. 581 p.
- Bakker, J.C., Boulard, T., Adams, S.R., Montero, J.I. 2008. Innovative technologies for an efficient use of energy. *Acta Horticulturae* 801: 49-62.
- Both, A.J. 2009. Greenhouse temperatura manegement. Dept. of Plant Biology and Pathology. Rutgers University. 11 – 17 p.
- Cockshull, K. y Adams, S. 1997. Temperature integration for improved energy efficiency. University of Warwick. 5 p.
- Challa, H. 2003. Crop models for greenhouse production systems. *Acta Horticulturae* 593: 47-53.
- Criddle, R.S., Smith, B.N. y Hansen, L.D. 1997. A respiration based description of plant growth rate responses to temperature. *Planta*, 201: 441-445.
- De Koning, A.N.M. 1990. Long-term temperature integration of tomato. Growth and development under alternating temperature regimes. *Sci. Hort.* 45: 117-127.
- Dieleman, J. A., Marcelis, L.F.M., y Dueck, T.A. 2005. Effects of temperature integration on growth and development of roses. *Acta Horticulturae* 691: 51-57.

- Dieleman, J.A., Marcelis, L.F.M., Elings, A., Dueck, T.A. y Meinen, E. 2006. Energy saving in greenhouse: Optimal use of climate condition and crop management. *Acta Horticulturae* 718: 203-210.
- Dieleman, J.A. y Meinen, E. 2007. Interacting effects of temperature integration and light intensity on growth and development of single-stemmed cut rose plants. *Scientia Horticulturae* 113: 182-187.
- Djevic, M. y Dimitrijevic, A. 2008. Energy consumption for different greenhouse constructions. *Acta Horticulturae* 801: 781-786.
- Elings, A., Kempkes, F.L.K., Kaarsemaker, R.C., Ruijs, M.N.A. y Van de Braak, N.J. 2005. The energy balance and energy-saving measures in greenhouse tomato cultivation. *Acta Horticulturae* 691: 67-74.
- Estrela, M. J. 1994. Manual práctico de introducción a la meteorología. CEAM (Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo). Madrid. Esp. 23-25 p.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen: para adaptarla a las condiciones de la Republica Mexicana. Instituto de Geografía, UNAM. México. 246 p.
- Goudriaan, J., y J. L. Monteith. 1990. Mathematical function for crop growth based on light interception and leaf area expansion. *Ann. Bot.* 66: 695-701.
- Hanan, J. J. 1998. Greenhouses: advanced technology for protected horticulture. CRC Press LLC. United States of America. 684 p.

- Heuvelink, E. 2005. Tomatoes. *Wageningen University, The Netherlands* CABI Publishing. 339 p.
- Ioslovich, I., Seginer, I. 1996. Normalized costate variable for seasonal optimization of greenhouse tomato production. *Acta Horticulturae*. 417: 87-97.
- Jones, J. W., Dayan, E., Allen, L. H., Van Keulen H., Challa, H. 1991. A dynamic tomato growth and yield model (TOMGRO). *Transaction of the ASAE* 3(2): 663-672.
- Jones J.W., Hwang Y.K., Kenig A. 1997. Developing a simplified crop model. Ch. III-6. In: *Optimal Environmental Control for Indeterminate Greenhouse Crops*. Eds. Seginer I., Jones J.W., Gutman P., Vallejos C.E. BARD Research Report No. IS-1995-91RC. Haifa, Israel.
- Jones, J. W., Kening, A., Vallejos, C. E. 1999. Reduced State- variables tomato growth model. *Transaction of the ASAE* 42 (1): 255-265.
- Kenig, A., y J. W. Jones. 1997. TOMGRO V3.0: A dynamic model of tomato growth and yield, Ch. II-5. In *optimal environmental control for indeterminate greenhouse crops*. Haifa, Israel: Agriculture Engineering Dept., Technion.
- Körner, O. y Challa, H. 2003a. Design for an improved temperature integration concept in greenhouse cultivation. *Computers and Electronics in Agriculture* 39: 39-59.

- Körner, O. y Challa, H. 2003b. Temperature integration and DIF in cut chrysanthemum. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 78 (3): 335-342.
- Körner, O., Challa, H., Van Ooteghem, R.J.C., 2003c. Modeling temperature effects on crop photosynthesis at high radiation in a solar greenhouse. *Acta Horticulturae* 593: 137-144.
- Körner, O. 2003d. Crop based climate regimen for energy saving in greenhouse cultivation. PhD. Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherland. 240 p.
- Körner O., Bakker M.J y Heuvelink E. 2004a. Daily Temperature Integration: a Simulation Study to quantify Energy Consumption. *Biosystems Engineering* 87 (3): 333-343.
- Körner O. y Challa H. 2004b. Temperature integration and process-based humidity control in chrysanthemum. *Computers and Electronics in Agriculture* 43: 1-21.
- Körner O y Van Straten G. 2008. Decesion support for dynamic greenhouse climate control strategies. *Computers and Electronics in Agriculture* 6: 18-30.
- Langton, A., Clarke, I., y Hamer, P. 2003. Energy-saving strategies. Published in the *Grower*. January 9 2003, p. 14-15.

- Lambers H., Chapin S., Pons T. 1998. Plant physiological ecology. Springer-Verlag. 567 p.
- López C. I. L. 2005. Control óptimo del clima del invernadero: avances y retos. Seminario sobre optimización y teoría de juegos. UACH. Chapingo, México. 11 p.
- López C. I. L., Rojano A. A., Ojeda B. W. y Salazar M. R. 2007. Modelos ARX para predecir la temperatura del aire de un invernadero: una metodología. *Agrociencia* 41: 181-192.
- Marcelis, L. F., y A. N. M. De Koning. 1995. Crop growth: Biomass partitioning in plants. In greenhouse climate control: An integrated approach. 84- 92. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Pers.
- Mathews J.H. y Fink K.D. 2000. Métodos numéricos con Matlab. Prentice-Hall. 721 p.
- McMaster, G. S. and W.W. Wilhelm 1997. Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology* 87: 291-300.
- Nederhoff, E. y Schreuder, R. 2004. Temperature control: dif, pre-night and other tricks for crop steering. *The Grower* 59(8): 54-55.
- Ortiz S. C. A. 1987. Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones en la republica mexicana. 3er edición. Depto. de suelos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 327 p.

- Perry, K., Wu Y., Sanders D.C., Garret T. J., Decoteau D. R., Nagata R. T., Dufault R. J., Batal K. D., Granberry D. M., McLaurin W. J. Heat units to predict tomato harvest in the southeast USA. *Agricultural and Forest Meteorology* 84(3-4): 249-254.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao T. C., y Fereres E. 2010. *Aquacrop Calculation Procedure, Version 3.1*.FAO, Rome, Italy, 83 p.
- Ramírez, A. J. A. 2005. Control jerárquico multiobjetivo de crecimiento de cultivos bajo invernadero. Tesis de Doctorado. Universidad de Almería. 222 p.
- Rijsdijk, A.A. y Vogelezang, J. V. M. 2000. Temperature integration on a 24-hour base: a more efficient climate control strategy. *Acta Horticulturae* 519: 163-169.
- Romero, P., Giacomelli, G., Choi, C.Y. and López-Cruz, I. 2006. Ventilation rates for a naturally-ventilated greenhouse in central Mexico. *Acta Hort.* 719: 65-72.
- Romo G. J. R. y Arteaga R. R. 1983. *Meteorología agrícola*. Depto. de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México, 442 p.
- Runkle, E. 2008. *Temperature and Scheduling. Improving greenhouse production efficiency*. Department of Horticulture. Michigan State University. 10 p.

- Runkle, E. 2006. Temperature effects on floriculture crops and energy consumption. Michigan State University. OFA bulletin. No. 894: 1 – 8.
- Scholberg, J., McNeal B. L., Jones, J. W., Boote K. J. Stanley C. D. y Thomas A. Obreza. 2000. *Agronomy Journal* 92: 152-159.
- Seginer I. 2009. Models and control of the greenhouse environment. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. UACH. Chapingo, Méx. 112 p. Notas de curso.
- Seginer I., Gary, C., y Tchamitchian, M. 1994. Optimal temperature regimen for a greenhouse crop with a carbohydrate pool: a modeling study. *Scientia Horticulturae*, 60: 55-80.
- Sigrimis N., Anastasiou A., y Rerras N. 2000. Energy saving in greenhouses using temperature integration: a simulation survey. *Computers and Electronics in Agriculture*. 26: 321–341.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 1991. *Plant Physiology*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. Menlo Park. Ca. 623 p.
- Tap, F. 2000. Economics- based optimal control of greenhouse tomato crop production. PhD. Thesis. Wageningen The Netherlands. 127 p.
- Van der Berg, G. 2001. Temperature integration and its effect on production. Canadian Greenhouse Conference 2001. Toronto, Canada. 4 p.

- Van der Ploeg, A. y Heuvelink, E. 2005. Influence of sub-optimal temperature on tomato growth and yield: a review. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 80 (6): 652-659.
- Van Ooteghem, R. J. C. 2007. Optimal control design for a solar greenhouse. PhD. Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherland. 304 p.
- Xiuming H., Borhan M. S., and Jingming Z. 2008. Effects of temperature integration regimes with low pre-night temperature on energy consumption, microclimate and fruit yield in early greenhouse tomato production. *Acta Horticulturae* 801: 473-478.
- Zalom F. G. y Wilson L. T. 1999. Predicting phenological events of California processing tomatoes. *Acta Hort.* 487: 41-48.
- Zekki, H., Gary, C., Gosselin, A., y Gauthier, L. 1999. Validation of a photosynthesis model through the use of the CO₂ balance of a greenhouse tomato canopy. *Annals of Botany* 84: 591-598.

APÉNDICE A

INTEGRACIÓN DE LA TEMPERATURA POR DÍA

24/Septiembre/2009 a 07/Enero/ 2010

Figura 1.A. Integración de la temperatura por día en dos invernaderos.

Invernadero 1				
Día	Integración (° C/día)	Promedio	Temp. Máx. (° C)	Temp. Min. (° C)
1	32167	22.35	33.835	16.32
2	29755	20.68	27.677	16.225
3	28570	19.85	35.529	15.7
4	31029	21.56	37.069	15.342
5	36905	25.64	43.133	15.27
6	35548	24.70	43.616	15.127
7	35311	24.53	42.179	14.697
8	36725	25.52	43.344	13.233
9	37650	26.16	46.641	12.171
10	36425	25.31	43.707	13.04
11	38876	27.01	44.349	15.151
12	39173	27.22	47.875	14.84
13	37469	26.03	45.908	12.606
14	35076	24.37	43.284	12.968
15	34000	23.62	41.443	15.103
16	33790	23.48	40.573	13.81
17	34029	23.64	39.318	15.127
18	32440	22.54	39.686	12.195
19	30735	21.36	35.743	12.678
20	34547	24.00	39.29	14.577
21	34300	23.83	41.502	13.858
22	34585	24.03	42.624	12.268
23	32159	22.34	43.073	10.247
24	30868	21.45	37.921	12.534
25	26958	18.73	33.079	12.316
26	29756	20.67	39.318	9.064
27	32952	22.90	41.356	11.346
28	33082	22.99	41.007	11.321
29	32182	22.36	41.094	10.858
30	31218	21.69	40.602	11.734
31	29209	20.29	37.425	10.663
32	27616	19.19	34.545	11.175
33	27690	19.24	31.868	13.954
34	26404	18.35	27.924	14.002
35	29969	20.82	32.691	13.81

36	32024	22.25	36.525	14.17
37	30266	21.03	39.346	13.329
38	27080	18.82	31.74	12.389
39	27334	18.99	35.448	10.785
40	27543	19.14	37.015	8.369
41	25403	17.65	36.688	6.687
42	24229	16.83	29.215	11.273
43	24118	16.76	33.887	8.095
44	23008	15.98	30.091	7.845
45	26728	18.57	36.987	8.792
46	26801	18.62	36.715	8.07
47	26814	18.63	36.119	6.965
48	22652	15.74	32.047	6.153
49	25157	17.48	35.958	6.509
50	27505	19.11	37.206	10.247
51	26737	18.58	36.96	6.331
52	27071	18.81	37.535	6.687
53	26790	18.61	37.673	5.949
54	26828	18.64	36.552	6.281
55	27158	18.87	33.339	9.114
56	27260	18.94	35.904	8.02
57	27957	19.42	35.342	8.22
58	28462	19.77	35.931	8.767
59	27678	19.23	34.995	10.222
60	27908	19.39	36.525	8.27
61	27257	18.94	35.342	9.312
62	26183	18.19	36.012	6.864
63	26732	18.57	34.73	8.891
64	25221	17.52	32.768	11.078
65	24267	16.86	33.6	6.661
66	24369	16.93	33.966	6.788
67	26796	18.62	35.128	7.192
68	27105	18.83	35.609	7.695
69	24988	17.36	32.665	12.558
70	27247	18.93	34.387	10.638
71	26767	18.60	34.229	8.419
72	28182	19.58	32.665	12.558
73	26190	18.20	33.261	11.783
74	27590	19.17	34.202	12.074
75	28207	19.60	36.742	8.394
76	27575	19.16	37.042	8.593
77	27974	19.43	37.261	7.745

78	28007	19.46	37.096	8.07
79	27929	19.40	36.039	8.618
80	27728	19.26	35.368	8.668
81	27025	18.78	36.119	7.569
82	26591	18.47	35.958	7.444
83	26656	18.52	35.128	7.87
84	23923	16.62	30.444	9.952
85	25166	17.49	32.562	10.1
86	21709	15.08	29.84	6.509
87	21295	14.80	27.112	7.895
88	24061	16.72	33.001	8.916
89	21695	15.07	34.15	4.584
90	22409	15.57	37.069	2.797
91	22476	15.62	27.751	8.295
92	27594	19.17	38.421	8.841
93	24788	17.22	36.039	4.766
94	28234	19.62	38.393	8.095
95	28688	19.93	39.488	7.242
96	24330	16.90	36.227	5.488
97	24902	17.30	36.335	5.462
98	24332	16.90	36.661	7.217
99	26336	18.30	38.087	5.745
100	26955	18.73	36.905	9.903
101	22502	15.63	31.663	6.687
102	21182	14.72	29.19	10.565
103	22662	15.75	30.369	6.357
104	21796	15.14	33.443	6.535
105	24549	17.06	36.824	8.693
106	23359	16.23	32.433	8.02
PROMEDIO	28218.94	19.61	36.36	9.97

Figura 2.A. Integración de la temperatura por día en dos invernaderos.

Invernadero2				
Día	Integración(° C/día)	Promedio	Temp. Máx. (° C)	Temp. Min. (° C)
1	32697	22.72	35.636	15.986
2	30291	21.05	28.841	16.654
3	29169	20.27	32.407	16.749
4	30060	20.89	34.019	15.676
5	34710	24.12	38.087	15.629
6	33961	23.60	37.838	16.129
7	34141	23.72	37.233	15.676
8	35137	24.41	38.282	14.218
9	36221	25.17	41.678	13.401
10	34845	24.21	38.588	13.57
11	37424	26.00	40.114	15.652
12	38172	26.52	44.135	15.438
13	36538	25.39	40.804	13.978
14	34495	23.97	38.644	14.385
15	34089	23.69	37.976	15.939
16	33841	23.51	37.949	15.031
17	33749	23.45	34.916	16.272
18	32422	22.53	36.878	13.618
19	30856	21.44	32.768	14.074
20	34193	23.76	36.606	15.581
21	33903	23.56	38.337	15.079
22	33330	23.16	36.878	13.642
23	31976	22.22	38.143	11.734
24	30557	21.23	34.281	13.257
25	27078	18.81	30.874	13.233
26	29160	20.26	35.448	9.657
27	32035	22.26	34.783	12.703
28	32744	22.75	36.498	12.63
29	32035	22.26	37.015	12.195
30	30788	21.39	34.677	13.112
31	28962	20.12	32.717	11.953
32	27834	19.34	31.408	12.268
33	27713	19.26	29.09	14.673
34	28412	19.74	27.21	14.84
35	32677	22.71	30.041	17.796
36	33050	22.97	31.255	18.129
37	31640	21.99	33.574	16.606
38	28968	20.13	28.147	16.272

39	29730	20.66	30.268	15.127
40	30342	21.08	32.407	12.799
41	28132	19.55	31.586	11.516
42	26863	18.67	25.162	14.936
43	26115	18.15	27.53	12.606
44	25381	17.64	25.477	12.074
45	27688	19.24	29.59	12.703
46	28289	19.66	29.79	12.122
47	28710	19.95	30.066	11.175
48	25584	17.78	26.744	9.682
49	26775	18.60	28.766	9.952
50	29005	20.15	30.243	13.93
51	28171	19.57	31.026	9.78
52	28570	19.85	31.357	10.173
53	27647	19.21	31.433	9.287
54	27843	19.35	31.001	9.731
55	28956	20.12	28.667	13.04
56	28403	19.74	30.469	11.37
57	29370	20.41	30.243	11.734
58	30154	20.95	30.268	12.534
59	29455	20.47	29.34	13.906
60	29510	20.51	30.469	12.268
61	28993	20.15	29.74	13.353
62	28115	19.53	29.89	10.883
63	28520	19.82	28.048	12.558
64	27623	19.19	27.998	14.96
65	26239	18.23	27.579	10.467
66	26227	18.22	28.345	10.59
67	28437	19.76	30.243	10.883
68	28905	20.08	31.637	11.419
69	28261	19.64	28.493	16.582
70	28885	20.07	29.29	14.433
71	28721	19.96	29.54	12.268
72	30974	21.52	29.815	16.368
73	28029	19.48	28.518	15.748
74	28064	19.50	29.84	14.122
75	28173	19.58	31.433	10.663
76	28100	19.52	31.433	10.834
77	28210	19.60	31.919	10.173
78	28344	19.69	31.433	10.149
79	28593	19.87	30.52	11.029
80	28338	19.69	30.117	11.151

81	27339	18.99	30.217	10.075
82	27026	18.78	30.318	9.879
83	27214	18.91	29.49	10.369
84	25065	17.42	25.162	12.437
85	26208	18.21	28.245	12.485
86	22807	15.85	25.186	8.817
87	23366	16.24	24.798	10.369
88	25106	17.44	25.623	11.394
89	21985	15.27	25.939	7.142
90	22499	15.63	29.29	4.714
91	24062	16.72	24.436	10.541
92	27302	18.97	30.95	10.907
93	25769	17.90	31.663	7.494
94	28012	19.46	30.722	10.614
95	28702	19.94	32.381	9.854
96	24718	17.17	28.692	7.544
97	25209	17.52	31.919	7.845
98	24573	17.07	29.49	9.632
99	25829	17.95	30.293	7.619
100	26033	18.09	28.692	11.321
101	23037	16.01	25.89	8.419
102	22840	15.87	25.598	12.147
103	22852	15.88	25.744	7.87
104	21895	15.21	26.158	8.045
105	25387	17.64	29.991	11.2
106	23970	16.66	28.568	10.1
PROMEDIO	28916.25	20.09	31.39	12.39

Cuadro 3. A. Análisis de varianza de los datos obtenidos de integración de temperatura para dos invernaderos.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr>F
Modelo	1	25770186	25770186	1.7	0.1933
Error	210	3177197575	15129512		
Total correcto	211	3202967761			
	R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	IT Media	
	0.008046	13.61566	3889.667	28567.59	

Cuadro 4. A. Análisis de varianza de los datos obtenidos de temperaturas máximas en dos invernaderos.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr>F
Modelo	1	1308.71038	1308.71038	75.54	<.0001
Error	210	3638.00225	17.32382		
Total correcto	211	4946.71262			

R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	TMAX Media
0.264562	12.28835	4.162189	33.87103

Cuadro 5. A. Análisis de varianza de los datos obtenidos de temperaturas mínimas en dos invernaderos.

Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr>F
Modelo	1	309.931988	309.931988	36.74	<.0001
Error	210	1771.30738	8.434797		
Total correcto	211	2081.23937			
R-cuadrado	Coef Var	Raiz MSE	TMIN Media		
0.148917	25.97519	2.904272	11.18095		

APÉNDICE B

MUESTREOS DE PLANTAS DE JITOMATE

Figura 1.B. Datos de cinco muestreos de plantas de jitomate.

Invernadero 1						Invernadero 2					
DATOS DE PLANTAS						DATOS DE PLANTAS					
Muestreo 1	16/10/2009	R1	R2	R3	Promedio	Muestreo 1	16/10/2009	R1	R2	R3	Promedio
IAF(m2)		0.11	0.10	0.11	0.11	IAF		0.11	0.13	0.12	0.12
Pfhoja(g)		47.82	43.11	47.61	46.18	Pfhoja		45.55	50.05	49.26	48.29
Pftallo(g)		21.19	20.05	21.49	20.91	Pftallo		17.97	21.14	19.89	19.67
Pfflor(g)		0.33	0.19	0.24	0.25	Pfflor(g)		0.21	0.28	0.19	0.23
Pshoja(g)		5.54	5.31	5.25	5.37	Pshoja		5.02	5.86	5.38	5.42
Pstallo(g)		1.6	1.46	1.45	1.50	Pstallo		1.27	1.49	1.49	1.42
Psfruto(g)		0.02	0.02	0.02	0.02	Psfruto(g)		0.02	0.02	0.02	0.02
Pf-total	67.34					Pf-total					68.18
Ps-total	6.89					Ps-total					6.85666667
Muestreo 2	30/10/2009	R1	R2	R3	Promedio	Muestreo 2	30/10/2009	R1	R2	R3	Promedio
IAF(m2)		0.44	0.42	0.44	0.43	IAF(m2)		0.39	0.44	0.60	0.48
Pfhoja(g)		267.75	241.18	280.22	263.05	Pfhoja(g)		206.34	238.77	338.53	261.21
Pftallo(g)		95.65	81.87	103.86	93.79	Pftallo(g)		70.71	90.72	108.6	90.01
Pfflor(g)		6.98	4.3	9.4	6.89	Pfflor(g)		4.57	7.27	8.27	6.70
Pshoja(g)		26.51	18.76	25.12	23.46	Pshoja(g)		21.98	31.87	28.05	27.3
Pstallo(g)		8.97	6.1	9.63	8.23	Pstallo(g)		6.17	6.18	8.13	6.83
Psfruto(g)		0.81	0.7	0.94	0.82	Psfruto(g)		0.5	0.65	0.48	0.54
Pf-total	363.74					Pf-total					357.93
Ps-total	32.51					Ps-total					34.67
Muestreo 3	16/11/2009	R1	R2	R3	Promedio	Muestreo 3	16/11/2009	R1	R2	R3	Promedio

IAF(m2)	0.76	0.68	0.97	0.80		IAF(m2)	0.56	0.46	1.00	0.67	Pf-total
Pfhoja(g)	500.62	530.31	650.15	560.36	Pf-total	Pfhoja(g)	570.9	467.33	548.11	528.78	929.93
Pftallo(g)	196.63	179.83	193.92	190.13	933.92	Pftallo(g)	202.04	178.56	189.71	190.10	
Pffruto(g)	219.24	183.24	147.82	183.43		Pffruto(g)	200.9	243.55	188.70	211.05	
Pshoja(g)	64.75	68.07	77.8	70.21	Ps-total	Pshoja(g)	63.71	54.26	59.07	59.01	Ps-total
Pstallo(g)	15.56	16.1	17.91	16.52	102.73	Pstallo(g)	23.44	24.33	14.93	20.9	97.61
Psfruto(g)	20.71	14.95	12.34	16		Psfruto(g)	18.11	19.13	15.86	17.7	
Muestreo 4	10/12/2009					Muestreo 4	10/12/2009				
	R1	R2	R3	Promedio			R1	R2	R3	Promedio	
IAF(m2)	1.48	1.51	1.35	1.45		IAF(m2)	1.36	1.71	1.37	1.48	Pf-total
Pfhoja(g)	1032.54	934.44	840	935.66	Pf-total	Pfhoja(g)	717.89	742.53	693.3	717.91	2603.18
Pftallo(g)	323.21	315.27	290.11	309.53	2786.17	Pftallo(g)	244.59	267.8	215	242.46	
Pffruto(g)	1451.95	1607.37	1563.61	1540.98		Pffruto(g)	1582.52	1978.8	1367.1	1642.81	
Pshoja(g)	110.21	117.23	90.04	105.83	Ps-total	Pshoja(g)	95.46	93.21	89.83	92.83	Ps-total
Pstallo(g)	39.62	45.79	40.29	41.9	245.30	Pstallo(g)	35.41	33.41	30.83	33.22	235.25
Psfruto(g)	91.2	103.31	98.2	97.57		Psfruto(g)	111.96	117.12	98.51	109.20	
Muestreo 5	07/01/2010					Muestreo 5	07/01/2010				
	R1	R2	R3	Promedio			R1	R2	R3	Promedio	
IAF(m2)	1.21	2.11	1.43	1.58		IAF(m2)	1.91	1.60	1.72	1.75	Pf-total
Pfhoja(g)	822.62	1130.79	915.49	956.3	Pf-total	Pfhoja(g)	1002.6	878.96	832.85	904.80	4753.31
Pftallo(g)	275.7	371.46	351.82	332.99	4703.68	Pftallo(g)	275.52	278.77	296.92	283.74	
Pffruto(g)	3199.59	4001.25	3042.31	3414.38		Pffruto(g)	3377.69	4057.42	3259.21	3564.77	
Pshoja(g)	100.5	165.99	128.17	131.55	Ps-total	Pshoja(g)	139.61	117.99	113.71	123.77	Ps-total
Pstallo(g)	45.41	55.74	58.79	53.31	338.58	Pstallo(g)	42.25	44.22	44.05	43.51	343.55
Psfruto(g)	147.44	157.73	155.96	153.71		Psfruto(g)	184.07	188.69	156.06	176.27	

APÉNDICE C

IMPLEMENTACIÓN C-MEX S-FUNCTION DEL MODELO PARA SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DE JITOMATE

```

* -----
* | Modelo de crecimiento de tomate Tomgro simplificado |
* -----
*
#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME tomgro5
/* Implementacion del modelo TOMGRO simplificado de acuerdo con cambios de Ramirez-Arias
2005 */
/*
* Need to include simstruc.h for the definition of the SimStruct and
* its associated macro definitions.
*/

```

```

#include "simstruc.h"
#include <math.h>
#define u(element)(*uPtrs[element])

double minterp1(double,double,double,double,double);

/*Used to read the parameter number 1*/
#define Nn0      p[0]
#define LAI0     p[1]
#define W0       p[2]
#define Wf0      p[3]
#define Wm0      p[4]
#define Nm       p[5]
#define p1       p[6]
#define Rho      p[7]
#define LAIMax   p[8]
#define Delta    p[9]
#define Beta     p[10]
#define D        p[11]
#define Tau      p[12]
#define K        p[13]
#define E        p[14]
#define Alfa     p[15]
#define Alfaf    p[16]
#define Cm       p[17]
#define Nu       p[18]
#define NFF      p[19]
#define Q10      p[20]
#define rm       p[21]
#define Tcrit    p[22]
#define Km       p[23]
#define Kf       p[24]
#define Nb       p[25]

/*=====
 * S-function methods *
 *=====*/

/* Function: mdlInitializeSizes=====
 * Abstract:
 *   The sizes information is used by Simulink to determine the S-function
 *   block's characteristics (number of inputs, outputs, states, etc.).
 */
static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    ssSetNumSFcnParams(S, 1); /* Number of expected parameters */
    if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
        /* Return if number of expected != number of actual parameters */
        return;
    }

    ssSetNumContStates(S, 5);
    ssSetNumDiscStates(S, 0);

    if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
    /*Entradas del modelo*/
    ssSetInputPortWidth(S, 0, 5);

    ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 0);

    if (!ssSetNumOutputPorts(S, 1)) return;
    ssSetOutputPortWidth(S, 0, 5);

    ssSetNumSampleTimes(S, 1);
    ssSetNumRWork(S, 0);
    ssSetNumIWork(S, 0);
    ssSetNumPWork(S, 0);
    ssSetNumModes(S, 0);
    ssSetNumNonsampledZCs(S, 0);

    ssSetOptions(S, 0);

```

```

}

/* Function: mdlInitializeSampleTimes =====
 * Abstract:
 *   This function is used to specify the sample time(s) for your
 *   S-function. You must register the same number of sample times as
 *   specified in ssSetNumSampleTimes.
 */
static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);
}

#define MDL_INITIALIZE_CONDITIONS /* Change to #undef to remove function */
#if defined(MDL_INITIALIZE_CONDITIONS)
/* Function: mdlInitializeConditions =====
 * Abstract:
 *   In this function, you should initialize the continuous and discrete
 *   states for your S-function block. The initial states are placed
 *   in the state vector, ssGetContStates(S) or ssGetRealDiscStates(S).
 *   You can also perform any other initialization activities that your
 *   S-function may require. Note, this routine will be called at the
 *   start of simulation and if it is present in an enabled subsystem
 *   configured to reset states, it will be call when the enabled subsystem
 *   restarts execution to reset the states.
 */
static void mdlInitializeConditions(SimStruct *S)
{
    real_T *x0=ssGetContStates(S);
    double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));

    x0[0]=Nn0;
    x0[1]=LAI0;
    x0[2]=W0;
    x0[3]=Wf0;
    x0[4]=Wm0;
}
#endif /* MDL_INITIALIZE_CONDITIONS */

#define MDL_START /* Change to #undef to remove function */
#if defined(MDL_START)
/* Function: mdlStart =====
 * Abstract:
 *   This function is called once at start of model execution. If you
 *   have states that should be initialized once, this is the place
 *   to do it.
 */
static void mdlStart(SimStruct *S)
{
}
#endif /* MDL_START */

/* Function: mdlOutputs =====
 * Abstract:
 *   In this function, you compute the outputs of your S-function
 *   block. Generally outputs are placed in the output vector, ssGetY(S).
 */
static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
    real_T *y=ssGetOutputPortRealSignal(S,0);
    real_T *x=ssGetContStates(S);
    InputRealPtrsType uPtrs=ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);

    y[0]=x[0];
    y[1]=x[1];
    y[2]=x[2];
    y[3]=x[3];
    y[4]=x[4];
}

```

```

#define MDL_UPDATE /* Change to #undef to remove function */
#if defined(MDL_UPDATE)
/* Function: mdlUpdate =====
* Abstract:
* This function is called once for every major integration time step.
* Discrete states are typically updated here, but this function is useful
* for performing any tasks that should only take place once per
* integration step.
*/
static void mdlUpdate(SimStruct *S, int_T tid)
{
}
#endif /* MDL_UPDATE */

#define MDL_DERIVATIVES /* Change to #undef to remove function */
#if defined(MDL_DERIVATIVES)
/* Function: mdlDerivatives =====
* Abstract:
* In this function, you compute the S-function block's derivatives.
* The derivatives are placed in the derivative vector, ssGetdX(S).
*/
static void mdlDerivatives(SimStruct *S)
{
real_T dx=ssGetdX(S);
real_T x=ssGetContStates(S);
InputRealPtrsType uPtrs=ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);
double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));
real_T t=ssGetT(S);

double TempNodos, NbTemp, FfTd, GTdia, DfTd;
double FNodos, Respiracion1, Respiracion, FotosintesisBruta, Ftfot;
double TasaCrecimiento;
double FrXn;

/*
Variables de entrada del modelo
u(0): Temperatura del aire
u(1): Radiacion PAR
u(2): CO2
u(3): Temperatura promedio diaria
u(4): Temperatura promedio de las horas luz
*/

/*Funcion de crecimiento de nodos dependiente de la temperatura
de acuerdo a Ramirez-Arias 2005. Pag 44.
*/
if ( u(3) < 9.0 || u(3) >= 50.0)
TempNodos=0.0;
else if (u(3) >= 9.0 && u(3) < 12.0)
TempNodos=minterp1(9,0,12,0.5,u(3));
else if (u(3)>=12 && u(3) < 20)
TempNodos=minterp1(12,0.5,20,0.75,u(3));
else if(u(3)>=20 && u(3) < 24)
TempNodos=minterp1(20,0.75,24,1,u(3));
else if (u(3)>=24 && u(3) < 50)
TempNodos=minterp1(24,1,50,0,u(3));

/*Funcion Nb de acuerdo con Ramirez-Arias, 2005, pag 45*/
if(u(3)>=0 && u(3)< 8.5)
NbTemp=minterp1(0,30,8.5,23,u(3));
else if (u(3) >=8.5 && u(3) < 12.5)
NbTemp=minterp1(8.5,23,12.5,13,u(3));
else if (u(3) >=12.5 && u(3) <16.5)
NbTemp=minterp1(12.5,13,16.5,11,u(3));
else if (u(3) >=16.5 && u(3) < 20)
NbTemp=minterp1(16.5,11,20,9.8,u(3));
else if (u(3) >= 20 && u(3) < 24.5)
NbTemp=minterp1(20,9.8,24.5,8.2,u(3));
else if (u(3)>=24.5 && u(3) < 28.5)

```

```

NbTemp=minterp1(24.5,8.2,28.5,7.2,u(3));
else if (u(3) >=28.5 && u(3) < 32.5)
NbTemp=minterp1(28.5,7.2,32.5,6.8,u(3));
else if (u(3) >=32.5 && u(3) < 40.5)
NbTemp=minterp1(32.5,6.8,40.5,6.5,u(3));
else if (u(3) >= 40.5 && u(3) < 60)
NbTemp=minterp1(40.5,6.5,60,5,u(3));
else if (u(3) > 60)
NbTemp=5;

/* Funcion de particionamiento de biomasa en funcion del estado de desarrollo
numero de nodos en este caso. De acuerdo a Ramirez-Arias, 2005. pag 42/

if (x[0]==1.0)
FrXn=0.2;
else if (x[0]>1 && x[0] <= 12.0)
FrXn=0.2-0.0045*(x[0]-1);
else if (x[0] > 12 && x[0] <= 21)
FrXn=0.15-0.0056*(x[0]-12);
else if (x[0] > 21 && x[0] < 30)
FrXn=0.10-0.0033*(x[0]-21);
else if (x[0]>=30)
FrXn=0.07;
else if (x[0]<1.0)
FrXn=0.2;

/* Funcion de Ff(Td) de acuerdo a Ramirez-Arias, 2005, Pag 42*/
if (u(3) <=12.5)
FfTd=0;
else if (u(3) > 12.5 && u(3) <=16.5)
FfTd=minterp1(12.5,0,16.5,0.7,u(3));
else if (u(3) > 16.5 && u(3) <= 20.5)
FfTd=minterp1(16.5,0.7,20.5,0.85,u(3));
else if (u(3)> 20.5 && u(3) <= 24.5)
FfTd=minterp1(20.5,0.85,24.5,1,u(3));
else if (u(3)> 24.5 && u(3) < 28.5)
FfTd=minterp1(24.5,1,28.5,0,u(3));
else if (u(3) >=28.5)
FfTd=0;

if (u(4) > Tcrit)
GTdia=1.0-0.154*(u(4)-Tcrit);

else
GTdia=1.0;

/* Funcion de desarrollo de frutos maduros de acuerdo a Ramirez-Arias, 2005. Pag 43*/

if (u(3) <= 9)
DfTd=0;
else if (u(3)> 9 && u(3) <=15)
DfTd=minterp1(9,0,15,0.025,u(3));
else if (u(3)>15 && u(3) <= 21)
DfTd=minterp1(15,0.025,21,0.05,u(3));
else if (u(3) > 21 && u(3) <= 35)
DfTd=minterp1(21,0.05,35,0.05,u(3));
else if (u(3) > 35 && u(3) <= 50)
DfTd=minterp1(35,0.05,50,0,u(3));
else if (u(3) > 50)
DfTd=0;
DfTd=DfTd/1440;

/*
Funcion que modifica la fotosintesis para temperaturas suboptimas,
de acuerdo a Ramirez-Arias, 2005. pag. 41
*/
if (u(0) < 0)
Ftfot=0;
else if (u(0)>=0 && u(0) < 9)
Ftfot=0.0744*u(0);

```

```

else if (u(0)>=9 && u(0) <= 12)
    Ftfot=0.67+0.11*(u(0)-9);
else if (u(0) >12 && u(0)<=28)
    Ftfot=1;
else if (u(0) > 28 && u(0) < 35)
    Ftfot=1-0.1429*(u(0)-28);
else if (u(0) >= 35)
    Ftfot= 0;

/* Tasa de cambio de nodos*/
dx[0]=Nm*TempNodos;

if (x[1] > LAIMax)
    dx[1]=0.0;
/*
else if (t==91440){
    x[1]=x[1]-1.445;
    dx[1]=0.0;
}
else if (t==151920){
    x[1]=x[1]-0.662;
    dx[1]=0.0;
}
*/
else if (t==162000)
    dx[1]=(Rho*Delta*exp(Beta*(x[0]-Nb))/(1+exp(Beta*(x[0]-Nb))))*Nm*TempNodos;

else
/* Tasa de cambio de indice de area foliar */
    dx[1]=(Rho*Delta*exp(Beta*(x[0]-Nb))/(1+exp(Beta*(x[0]-Nb))))*Nm*TempNodos;
/*
if (t>=92160)
    dx[1]=0.28*((Rho*Delta*exp(Beta*(x[0]-Nb))/(1+exp(Beta*(x[0]-
Nb))))*Nm*TempNodos);
*/

if (x[1] < LAIMax)
    FNodos=0.0;

else
    FNodos=p1;

Respiracion=pow(Q10,(u(0)-20.0)/10.0)*rm*(x[2]-x[4]);

FotosintesisBruta=(D*Tau*u(2)*Ftfot/K)*(log(((1.0-Cm)*Tau*u(2)+Alfa*K*u(1)
)/(Alfa*K*u(1)*exp(-K*x[1])+(1.0-Cm)*Tau*u(2))));
TasaCrecimiento=E*(FotosintesisBruta-Respiracion)*(1.0-FrXn);

/* Tasa de cambio de biomasa*/
dx[2]=TasaCrecimiento-(FNodos*Rho*Nm*TempNodos);
/* Tasa de crecimiento de biomasa de frutos */
if (x[0] > NFF)

    dx[3]=TasaCrecimiento*Alfaf*FfTd*(1-exp(-Nu*(x[0]-NFF)))*GTdia;

else
    dx[3]=0.0;

if (x[0] > (NFF+Kf))
    dx[4]=DfTd*(x[3]-x[4]);
else
    dx[4]=0.0;
}
#endif /* MDL_DERIVATIVES */

/* Function: mdlTerminate =====
* Abstract:

```

```

*      In this function, you should perform any actions that are necessary
*      at the termination of a simulation. For example, if memory was
*      allocated in mdlInitializeConditions, this is the place to free it.
*/
static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
}

double minterp1(double x1,double y1,double x2,double y2,double x)
{
double y;
y=y1+(y2-y1)*(x-x1)/(x2-x1);
return (y);
}

/*=====
* See sfuntmpl.doc for the optional S-function methods *
*=====*/

/*=====
* Required S-function trailer *
*=====*/

#ifdef MATLAB_MEX_FILE    /* Is this file being compiled as a MEX-file? */
#include "simulink.c"      /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h"       /* Code generation registration function */
#endif
#endif

```

APÉNDICE D

PROGRAMA PRINCIPAL DEL MODELO DE CRECIMIENTO TOMGRO SIMPLIFICADO

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%      TOMGRO SIMPLIFICADO                                     %
%      Simulacion de crecimiento de jitomate                  %
%      Autores: Irineo Lopez Cruz & Armando Ramirez Arias    %
%      Modificado por Cuauhtémoc Pérez Vega                  %
%      Julio del 2010                                         %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all;
%global UT Param DATOS

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% INVERNADERO 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Condiciones iniciales

Nn0=3.5;    % Nodos
LAI0=0.025; % Indice de Área Foliar
W0=0.61;    % Peso seco total inicial
Wf0=0.0;
Wm0=0.0;

%Parámetros del modelo:

load datost1.csv
t1=[1:152640]';
Time=1/(24*60)*t1;    % Simulation time vector
Temperatura=datost1(:,1);
PAR=datost1(:,2); % Multiplicado por el coef 4.6.
%CO2=370*ones(152640,1);
CO2=datost1(:,3);
Td=datost1(:,4);
Tdia=datost1(:,5);
%%% Parametros del modelo
Nm=0.00039583;    %Tasa max de nodos
p1=2.0;    %% (?)% Parámetro que pondera perdida de MS por Nodos

```

```

Rho=2.0;      %Densidad de plantas
LAIMax=3.16;  %% IAF máxima
Delta=0.040;  % Máxima expansión de área foliar
Beta=0.5;     % Parámetro en ecuación expolineal
D=0.0018;     %
Tau=0.12;     % Eficiencia de CO2
K=0.65;       % Coef de extinción de radiación
E=0.79;       % 0.85 para Jones et al. Coef de conv a MS
Alfa=0.09;    % Eficiencia de uso de luz
Alfaf=0.95;   % Maxima distribución a frutos
Cm=0.10;      % Coef de transmisión de la luz por las hojas
Nu=0.43;      %
NFF=18;       %
Q10=1.4;      % Sensibilidad de respiración a la temperatura
rm=0.013/1440;% Coef de respiración de mantenimiento
Tcrit=26;     % Temp por encima de la cual el crecimiento del fruto se reduce
Km=0.0006;    %
Kf=21.0;      % Numero de nodos desde que aparece el primer fruto hasta que madura
Nb=7.0;       % Parámetro en ecuación expolineal
%-----

%Datos del cultivo
% Experimento Chapingo 24 septiembre 2009 al 07 enero 2010: total 106 dias

tps=(1/(24*60))*[1 33120 53280 77760 112320 152640];
ps402=[1.22 13.78 65.02 205.46 490.59 677.15];
pfrs=[0 0 0 32 195.14 307.42];% peso seco de frutos

pfrm=[0 0 0 0 16.02 78.03]; % peso seco de frutos maduros
%Nodos
tnn=(1/(24*60))*[1 33120 53280 77760 112320];
nnnodo=[3 16 24 28 37];

%lai:
tlai=(1/(24*60))*[1 33120 53280 77760 112320 152640];
lai=[0.025 0.22 0.86 1.6 2.9 3.16 ];
param=[Nn0 LAI0 W0 Wf0 Wm0 Nm p1 Rho LAIMax Delta Beta D Tau K E Alfa Alfaf Cm Nu NFF Q10
rm Tcrit Km Kf Nb];
UT=[Time*(24*60) Temperatura PAR CO2 Td Tdia ];
DATOS=[tps' ps402'];
options=simset('Solver','ode23','Reltol',1e-10,'Abstol',1e-12);
[t,x,y]=sim('stomgrov5',t1,options,UT);

figure(1);

plot(t/(24*60),x(:,1),tnn,nnnodo,'*');
xlabel('Tiempo [Días después del trasplante]');
ylabel('Nodos ');
title('Número de Nodos en Invernadero 1');
legend('Estimado', 'Medido');

figure(2)

plot(t/(24*60),x(:,2),tlai,lai,'*');
xlabel('Tiempo [Días después del trasplante]');
ylabel('IAF [m^2 m^-^2]');
legend('Estimado', 'Medido');
title('Índice de área foliar en Invernadero 1');

figure(3)
plot(t/(24*60),x(:,3),tps,ps402,'*');
xlabel('Tiempo [Días después del trasplante]');
ylabel('Peso seco total [g m^-^2]');
legend('Estimado', 'Medido');
title('Peso seco total en Invernadero 1');

figure(4)

```

```

plot(t/(24*60),x(:,4),tps,pfrs,'*');
ylabel('Peso seco frutos [g m^-^2]');
xlabel('Tiempo [Días después del trasplante]');
legend('Estimado', 'Medido');
title('Peso seco frutos en Invernadero 1');

figure(5)
plot(t/(24*60),x(:,5),tps,pfrm,'*');
ylabel('Peso seco frutos maduros [g m^-^2]');
xlabel('Tiempo [Días después del trasplante]');
legend('Estimado', 'Medido');
title('Peso seco frutos maduros en Invernadero 1');

figure(6)
subplot(2,1,1);
plot(Time,Temperatura)
ylabel('T [^oC]');

title('Temperatura del Invernadero 1');
legend('A')
subplot(2,1,2);
plot(Time,Td,':b',Time,Tdia,'r');
ylabel('T [^oC]');
xlabel('Tiempo [Días después del trasplante]');
legend('Temperatura media diaria', 'Temperatura media de horas del día');

figure(7)
subplot(2,1,1);
plot(Time,C02);
ylabel('CO_2 [ppm]');
xlabel('Tiempo [Días después del trasplante]');
title('Dióxido de Carbono en Invernadero 1');
legend('A');
subplot(2,1,2);
plot(Time,PAR);
xlabel('Tiempo [Días después del trasplante]');
ylabel('RFA [mmol m^-^2 s^-^2]');
title('Radiación Fotosintética activa en Invernadero 1');
legend('B');

```

APÉNDICE E

ARCHIVO SIMULINK

