

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

**ESTRATEGIAS DE ENRIQUECIMIENTO CON DIÓXIDO DE
CARBONO (CO₂) EN INVERNADERO PARA EL CULTIVO DE
TOMATE: UN ESTUDIO BASADO EN SIMULACIÓN**

TESIS

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

PRESENTA:

ALEJANDRO SÁNCHEZ GARCÍA

NOVIEMBRE 2008

Chapingo, Estado de México

**ESTRATEGIAS DE ENRIQUECIMIENTO CON DIÓXIDO DE
CARBONO (CO₂) EN INVERNADERO PARA EL CULTIVO DE
TOMATE: UN ESTUDIO BASADO EN SIMULACIÓN**

Tesis realizada por **Alejandro Sánchez García** bajo la dirección del Comité Asesor
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el
grado de:

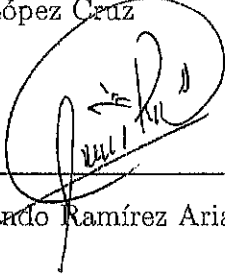
**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA ORIENTACIÓN BIOSISTEMAS**

DIRECTOR:



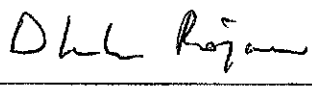
Dr. Irineo L. López Cruz

ASESOR:



Dr. José Armando Ramírez Arias

ASESOR:



Dr. Abraham Rojano Aguilar

**ESTRATEGIAS DE ENRIQUECIMIENTO CON DIÓXIDO DE
CARBONO (CO₂) EN INVERNADERO PARA EL CULTIVO DE
TOMATE: UN ESTUDIO BASADO EN SIMULACIÓN**

El jurado que revisó y aprobó el examen de grado de **Alejandro Sánchez García** autor de la presente tesis de **Maestría en ingeniería en Agrícola y Uso Integral del Agua Orientación Biosistemas** estuvo constituido por:

PRESIDENTE: _____
Dr. Irineo L. López Cruz

ASESOR: _____
Dr. José Armando Ramírez Arias

ASESOR: _____
Dr. Abraham Rojano Aguilar

AGRADECIMIENTOS

Al **posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (IAUIA)** de la **Universidad Autónoma Chapingo**. Por el apoyo para realizar mis estudios de Maestría.

Mi profunda gratitud y reconocimiento al **Dr. Irineo L. López Cruz** por los conocimientos compartidos, y que gracias a su visión y talento me permitió abordar y entender los sistemas de agricultura protegida de una forma más clara.

De igual manera mi más sincero agradecimiento al M.C. Heriberto Godoy Hernandez.

Para mis amigos (Agustín, Rutilo, Esteban, Juan Luis, Germán, Norberto, Vicente, Humberto y Edgar) por todo su apoyo.

DEDICATORIA

Con amor para **Laura** . . .

Para mi familia por ser la base de mis logros. . .

BIOGRAFÍA

Nace el 17 de noviembre de 1978 en Santa Cruz Mixtepec, perteneciente a los Valles Centrales del estado de Oaxaca. Realiza los estudios de preparatoria agrícola e ingeniería en la Universidad Autónoma Chapingo logrando el título de Ingeniero Mecánico Agrícola en el año 2001.

Colaboró con la empresa RINVER en el área de diseño, construcción y automatización de sistemas protegidos (invernaderos), trabajó en el Municipio de Heroica Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca en el área de desarrollo rural donde impulsó proyectos productivos modernizando los sistemas de cultivo, como son el de riego, establecimiento de invernaderos, acolchados, entre otros.

Ha trabajado con modelos matemáticos de crecimiento y clima bajo sistemas protegidos, el presente trabajo es un ejemplo de lo anterior.

RESUMEN

ESTRATEGIAS DE ENRIQUECIMIENTO CON DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) EN INVERNADERO PARA EL CULTIVO DE TOMATE UN ESTUDIO BASADO EN SIMULACIÓN

Palabras clave: CO₂, Invernaderos, Modelos matemáticos, Tomate.

ÍNDICE GENERAL

BIOGRAFÍA	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vi
Índice de cuadros	ix
Índice de figuras	x
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
2.1. Objetivo general	3
2.2. Objetivos particulares	3
3. Revisión de Literatura	4
3.1. Dióxido de carbono	4
3.2. Dióxido de carbono y el crecimiento vegetal	5
3.2.1. Agotamiento de CO ₂	5
3.2.2. Enriquecimiento con CO ₂	6
3.3. Ventilación	6
3.4. Asimilación de CO ₂	7
3.5. Respiración	7
3.6. Crecimiento y producción	8
3.7. Enriquecimiento con CO ₂ del ambiente invernadero	8
3.8. Enriquecimiento con CO ₂ en tomate	8
3.8.1. Plantas de tomate jóvenes	8
3.8.2. Plantas maduras	9
3.8.3. Enriquecimiento de CO ₂ en verano	9
3.8.4. Experimentos	10
3.8.5. Comportamiento de enriquecimiento con CO ₂	10
3.9. Formas de enriquecimiento	11
3.9.1. Gases obtenidos de quemadores	11

3.9.2.	Enriquecimiento con CO ₂ puro	12
3.9.3.	Pérdidas de CO ₂ por ventilación	13
3.9.4.	Tasas de enriquecimiento de CO ₂	14
3.9.5.	Observaciones	14
4.	Materiales y Métodos	16
4.1.	Desarrollo de modelos	16
4.2.	Fenómenos que influyen en el clima del invernadero	18
4.3.	Lugar del experimento	20
4.4.	Estructura e implementación del modelo	21
4.5.	Modelado del clima del invernadero	22
4.5.1.	Modelo de humedad	22
4.5.2.	Transporte de vapor agua por ventilación	23
4.5.3.	Modelo de temperatura	24
4.5.4.	Modelo de dióxido de carbono	27
4.5.5.	Masa térmica	28
4.6.	Modelo simplificado TOMGRO	29
4.7.	Estimación de parámetros del modelo de clima	33
4.7.1.	Validación del modelo	35
5.	Resultados	36
5.1.	Calibración del modelo	36
5.2.	Validación del modelo	41
5.3.	Integración del modelo de clima con el modelo del cultivo	44
5.4.	Diferentes estrategias de inyección de CO ₂	46
6.	Conclusiones	61
	Bibliografía	63
	Anexos	66
A.	Modelo acoplado clima-cultivo	66
a.1	Programa principal (m. file)	66
a.2	Modelo en SIMULINK	68
a.3	Subrutina en lenguaje C (Mex-function).	69
B.	Notación	80
b.1	Variables de estado para el modelo clima-cultivo	80
b.2	Variables y parámetros del modelo clima-cultivo.. . . .	80

ÍNDICE DE CUADROS

5.1. Valores de los parámetros estimados del modelo de clima.	37
5.2. Ecuaciones y estadísticas de regresión obtenidas en la calibración del modelo (1 al 3 de octubre de 2007) en el interior del invernadero. . .	38
5.3. Ecuaciones y estadísticas de regresión obtenidas en la validación del modelo (4 al 11 de octubre de 2007) en el interior del invernadero. . .	41
5.4. Valores máximos del modelo para enriquecimiento en todo el ciclo . .	48
5.5. Valores máximos del modelo para enriquecimiento después de 30 días	51
5.6. Valores máximos del modelo para enriquecimiento después de 60 días.	54
5.7. Valores máximos del modelo para enriquecimiento después de 75 días.	57
5.8. Valores máximos del modelo para enriquecimiento después de 90 días.	60
5.9. Valores de peso seco de frutos maduros con las diferentes estrategias de inyección.	60

ÍNDICE DE FIGURAS

3.1. Enriquecimiento de CO ₂ contra fotosíntesis en dependencia de luz (Nederhoff, 2004).	5
3.2. Comportamiento de enriquecimiento de CO ₂ en tomate (Nederhoff, 2004).	11
4.1. Esquema del modelo de clima de un invernadero.	20
4.2. Descripción del invernadero donde se tomaron los datos.	21
5.1. Registro de las variables meteorológicas utilizadas para calibrar el modelo del clima(Octubre 2007)	36
5.2. Resultados de simulación de temperatura humedad y CO ₂	38
5.3. Gráfica de relación entre la temperatura medida y simulada en la de calibración del modelo.	39
5.4. Gráfica de relación entre la humedad medida y simulada en la de calibración del modelo.	39
5.5. Gráfica de relación entre el CO ₂ medido y simulado en la de calibración del modelo.	40
5.6. Clima interior del invernadero simulados y medidos para los días 4 al 11 de octubre de 2007.	41
5.7. Gráfica de relación entre la temperatura medida y simulada en la de validación del modelo.	42
5.8. Gráfica de relación entre la humedad medida y simulada en la de validación del modelo.	42
5.9. Gráfica de relación entre el CO ₂ medido y simulado en la de validación del modelo.	43
5.10. Graficas del modelo de crecimiento acoplado con el clima: Número de nodos, LAI y peso seco total.	44
5.11. Graficas del modelo de crecimiento acoplado con el clima: Peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros.	45
5.12. Graficas del clima (temperatura, humedad y CO ₂) acoplado con el modelo de crecimiento.	45
5.13. Peso seco total, peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros con diferentes tasas de inyección para todo el ciclo.	46

5.14. Grafica de comportamiento de CO ₂ para diferentes tasas de inyección para todo el ciclo.	47
5.15. Peso seco total, peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros con diferentes tasas de inyección después de 30 días.	49
5.16. Grafica de comportamiento de CO ₂ para diferentes tasas de inyección después de 30 días	50
5.17. Peso seco total, peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros con diferentes tasas de inyección después de 60 días.	52
5.18. Grafica de comportamiento de CO ₂ para diferentes tasas de inyección después de 60 días.	53
5.19. Peso seco total, peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros con diferentes tasas de inyección después de 75 días.	55
5.20. Grafica de comportamiento de CO ₂ para diferentes tasas de inyección después de 75 días.	56
5.21. Peso seco total, peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros con diferentes tasas de inyección después de 90 días.	58
5.22. Grafica de comportamiento de CO ₂ para diferentes tasas de inyección después de 90 días.	59
6.1. Gráfica del modelo implementado en SIMULINK.	68

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En los países de climas fríos la fertilización con CO_2 en ambientes protegidos para la producción de tomate es una práctica común. México es un país donde el cultivo en sistemas protegidos cada vez toma mayor importancia, pero esta tecnología muchas veces es copiada de otros países y utilizada sin un estudio previo.

Actualmente con el uso de dióxido de carbono, el productor puede incrementar la producción y el rendimiento de sus cosechas, adelanta la época de recolección, al optimizar la asimilación de nutrientes y la actividad metabólica, aumentando hasta en un 40 % la producción. El incremento de la producción de frutos de pepino tanto en peso seco como en fresco puede ser de un 19 % con enriquecimiento del aire con CO_2 (Sánchez-Guerrero *et al.*, 2005).

Este tipo de prácticas permite incrementar la producción, conllevando mayores beneficios económicos para los productores, de hasta un 30 % de margen de utilidad. Este beneficio económico depende del margen entre el costo de enriquecimiento con CO_2 y el incremento del valor de la producción que se logra con esto. Establecer una concentración óptima no es factible ya que la aplicación de CO_2 depende de la variación de la radiación solar, la tasa fotosintética y la ventilación (Chalabi *et al.*, 2002).

La aplicación óptima de CO_2 implica la manipulación de las variables de control de tal manera que los beneficios económicos del agricultor sean maximizados, para lo cual se necesita de un modelo matemático del sistema que tome en cuenta la tasa de consumo de CO_2 por el cultivo así como de las pérdidas debido a la ventilación.

Las dos principales fuentes de CO_2 para el enriquecimiento son gas puro y gases provenientes de la combustión de hidrocarburos como propano, butano o gas natural.

En muchos climas la aplicación de CO_2 está restringida por la necesidad de ventilación natural mediante el cierre y apertura de ventanas laterales y cenitales. En México estas técnicas están poco estudiadas por el poco conocimiento de las mismas además de que se necesita un control más preciso de las variables climáticas del invernadero (humedad, temperatura, luz, etc.).

En el presente trabajo se estudia un modelo de asimilación de CO_2 por las plantas así como estrategias para el enriquecimiento del mismo dentro de un invernadero.

Los modelos en la actualidad están tomando gran importancia porque gracias a ellos se pueden implementar estrategias de control más sofisticadas todo esto con ayuda de nuevas tecnologías. Es por ello que en este trabajo se estudia el efecto de diferentes concentraciones de CO_2 en el rendimiento del cultivo de tomate. Para lograr esto los modelos matemáticos son basados en principios básicos, los cuales se implementan en MATLAB Versión 7.0 y SIMULINK Versión 6.0.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Generar, estudiar y simular, el comportamiento de un modelo del clima de un invernadero acoplado con el del crecimiento potencial del cultivo de tomate así como evaluar el comportamiento de la variable dióxido de carbono(CO_2) en el mismo.

2.2. OBJETIVOS PARTICULARES

La presente tesis tiene tres objetivos particulares

1. Construcción y calibración del modelo de clima del invernadero.
2. Integrar el modelo dinámico del clima con el modelo del cultivo.
3. Estudiar el comportamiento del dióxido de carbono(CO_2) dentro del invernadero.

CAPÍTULO 3

REVISIÓN DE LITERATURA

El enriquecimiento de CO_2 en un invernadero aumenta el crecimiento y la producción considerablemente y puede también mejorar la calidad del producto. Sin embargo, el enriquecimiento con CO_2 no es una práctica barata. La presente revisión aborda aspectos de las ventajas, de los métodos y sus costos para enriquecimiento con CO_2 para algunos cultivos en sistemas protegidos (invernaderos).

3.1. DIÓXIDO DE CARBONO

El dióxido de carbono (CO_2) es un gas que se encuentra normalmente en el aire. El aire standard se constituye de nitrógeno 78 %, oxígeno 21 % y solamente 0,034 % de CO_2 , que se indica generalmente como 340 ppm (partes por millón). El CO_2 en concentraciones bajas no es peligroso para los seres humanos, y es usada en las bebidas carbonatadas. La concentración máxima aconsejada en lugares de trabajo es 500 ppm (Estrela. 1994).

El CO_2 se genera con material flamable que contiene carbón como en combustibles de madera y fósiles, en la descomposición del material orgánico. La concentración atmosférica del CO_2 ha estado por debajo de 300 ppm por muchos siglos, pero se está elevando rápidamente en las décadas pasadas debido a la emisión de CO_2 por la industria y los automóviles. El nivel atmosférico creciente de CO_2 contribuye al efecto invernadero y al calentamiento global.

3.2. DIÓXIDO DE CARBONO Y EL CRECIMIENTO VEGETAL

La fotosíntesis es el único mecanismo de entrada de energía, las plantas absorben CO_2 del aire circundante a través de los estomas. Dentro de estos, el dióxido de carbono se transforma en los azúcares y otras sustancias que contienen carbono. El proceso de formación de azúcares se conoce como asimilación de CO_2 o fotosíntesis, porque este proceso requiere luz como fuente de energía, el CO_2 se toma solamente en el día.

Cuando las principales condiciones por ejemplo luz, temperatura y agua son buenas, las plantas consumirán CO_2 en altas cantidades. Cuanto mejor sean las condiciones de luz y riego más CO_2 será absorbido por las plantas (Figura 3.1). Y también, mientras más CO_2 esté disponible, más será absorbido. Esto explica que la tasa de fotosíntesis y de crecimiento se puede aumentar con una fuente de CO_2 adicional en el aire del invernadero, es decir por el enriquecimiento de CO_2 .

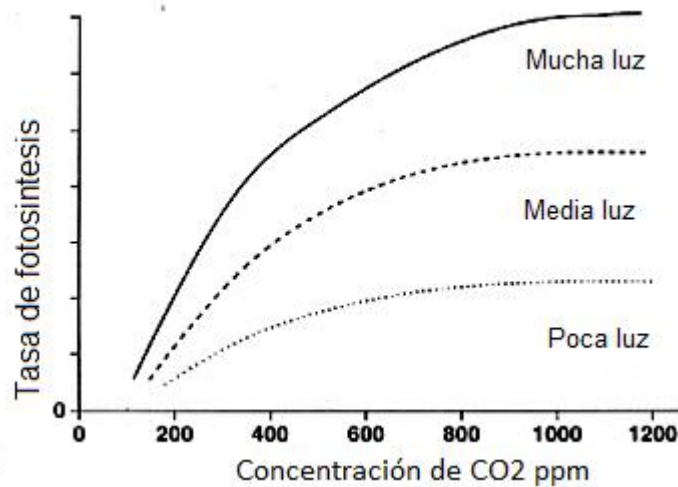


Figura 3.1: Enriquecimiento de CO_2 contra fotosíntesis en dependencia de luz (Nederhoff, 2004).

3.2.1. Agotamiento de CO_2

Cuando no hay fuente de CO_2 o es muy escaso dentro del invernadero, las plantas consumen el CO_2 , hasta llegar a un nivel por debajo del nivel exterior normal de 340

ppm. A tal condición se llama agotamiento de CO_2 . Si el nivel de CO_2 es baja hasta alrededor de 200 ppm, la fotosíntesis se reduce a la mitad del nivel normal de 340 ppm. El enrarecimiento de CO_2 hace que las plantas no se favorezcan de las buenas condiciones ambientales, y cuando esta situación dura mucho tiempo, el crecimiento y la producción caerán drásticamente (Azcon-bieto *et al.*, 1993).

3.2.2. Enriquecimiento con CO_2

Según lo mostrado en la Figura 3.1, el efecto de enriquecimiento con CO_2 es más grande dependiendo de las condiciones de luz. Las líneas se nivelan cerca de 800 ppm e incluso se hacen horizontales más allá de 1000 o 1200 ppm.

El aumento de la concentración de CO_2 hasta las 350 ppm es muy bajo de 400 ppm es muy eficaz, entre 600 y 800 ppm la fuente es menos eficaz y por arriba de 1000 ppm no es muy útil para todas las condiciones de luz.

En general el enriquecimiento a 700 o 1000 ppm aumenta la tasa de fotosíntesis y por lo tanto el crecimiento y la producción por 20 a 30 %. En algunas cosechas, principalmente las cosechas de flor, la aplicación de CO_2 puede también mejorar la calidad del producto.

3.3. VENTILACIÓN

Cuando el aire del invernadero contiene más CO_2 que el aire exterior, este será perdido por intercambio de aire. Con las ventanas cerradas, el intercambio de aire es mínimo. Por supuesto con más ventilación, más CO_2 se debe proveer para mantener cierto nivel sobre el nivel exterior. La necesidad de ventilar para controlar la temperatura vuelve muy costoso o imposible mantener un alto nivel CO_2 en un día soleado. Esto es muy desafortunado, porque las plantas se podrían favorecer mucho con el CO_2 adicional bajo condiciones soleadas (Walker, 1994).

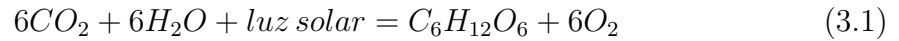
Por otra parte, cuando no se suministra CO_2 , la ventilación es beneficiosa pues trae aire fresco con CO_2 . Pero durante la ventilación puede ocurrir enrarecimiento, porque las plantas consumen a veces más CO_2 que el que provee la ventilación. Mientras el nivel de CO_2 es bajo, el enriquecimiento del CO_2 es muy eficaz. Por

otra parte, mientras el nivel del CO_2 del invernadero es bajo, todo el CO_2 provisto será absorbido por las plantas, especialmente cuando se aplica en la parte inferior de las plantas.

En general, el enriquecimiento de CO_2 es factible siempre que haya agotamiento y la tasa de ventilación es solamente pequeña. Los niveles realmente altos del CO_2 son factibles solamente cuando el invernadero es cerrado.

3.4. ASIMILACIÓN DE CO_2

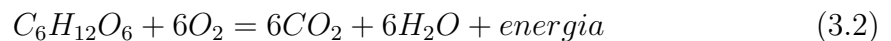
La planta toma el dióxido de carbono (CO_2) del aire y agua (H_2O) del riego para producir los azúcares ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) y oxígeno (O_2) (Thornley *et al.*,1990). Los azúcares se convierten más adelante en varios componentes de la planta, para los cuales se requieren otros nutrientes como nitrógeno, el fosfato, el potasio, etc. El consumo de CO_2 y la formación de azúcares se llama asimilación de CO_2 o fotosíntesis; los azúcares producidos se llaman asimilados. La fotosíntesis necesita energía, la cual se recibe normalmente de la luz del sol, pero no como calor sino como fotones. La fotosíntesis se puede escribir de una forma simplificada como:



La fotosíntesis aumenta cuando hay CO_2 disponible en el aire circundante, con la suficiente agua y luz.

3.5. RESPIRACIÓN

Una parte de los azúcares producidos en la planta son utilizados como fuente de energía en la planta para la actividad de crecimiento, directamente o indirectamente. Siempre que la planta necesite energía (quema algunos de sus azúcares). Este proceso requiere oxígeno, y produce energía, así como CO_2 y agua, es una pérdida inevitable de azúcares. En notación química la respiración es:



La respiración ocurre de día y noche (Thornley *et al.*,1990).

3.6. CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN

El crecimiento vegetal es determinado por la cantidad de azúcares ganadas en la planta sobre un período más largo, por ejemplo 24 horas o una semana. El aumento de azúcares depende de la cantidad de CO₂ fijado, esto es la diferencia neta entre la fotosíntesis (en el día) y respiración (día y noche). Por lo cual el crecimiento depende fuertemente de la luz y de la concentración de CO₂ (para la fotosíntesis) y la temperatura (para la respiración).

3.7. ENRIQUECIMIENTO CON CO₂ DEL AMBIENTE INVERNADERO

El buen control del clima y el buen abastecimiento de agua son condiciones previas para el crecimiento vegetal. Siempre que ocurra la escasez de agua, las plantas se protegerán contra marchitamiento y cerrarán los estomas. Cuando sucede esto, el aprovechamiento de CO₂ y crecimiento se reduce seriamente. También en condiciones de baja humedad del aire los estomas se cerrarán. En las temperaturas demasiado altas, el proceso de fotosíntesis puede ser afectado seriamente.

Por lo tanto, es generalmente más provechoso optimizar las condiciones principales primero (temperatura, irrigación, nutrición, humedad). Cuando se satisfacen estos requisitos es entonces cuando se considera el enriquecimiento con CO₂. El aumento de la concentración de CO₂ en el aire del invernadero a un nivel tres veces del nivel normal (de 340 ppm a 700 o 1000 ppm) aumentará el crecimiento en 20 a 30 % (Chalabi *et al.*, 2002).

3.8. ENRIQUECIMIENTO CON CO₂ EN TOMATE

A continuación mostramos estudios que se han hecho con el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill).

3.8.1. Plantas de tomate jóvenes

Como en todas las cosechas, las plantas jóvenes de tomate que reciben enriquecimiento con CO₂ consiguen ser fuertes y tienen un área de hoja más grande que las

plantas con CO₂ normal. El área más grande de la hoja intercepta más luz, acelera el crecimiento inicial. Así el enriquecimiento con CO₂ estimula el crecimiento y el establecimiento de la cosecha generalmente también mejora el primer florecimiento. Cuando en períodos más oscuros las plantas jóvenes están teniendo dificultades con la fruta fijada, el enriquecimiento ayudará a superar este problema. Estos efectos son causados por el hecho de que el enriquecimiento aumenta la fotosíntesis (Tremblay *et al.*, 1998).

3.8.2. Plantas maduras

En las cosechas maduras el enriquecimiento con CO₂ aumenta el índice de crecimiento (pesos) de todas las partes de la planta. Sin embargo, el CO₂ realmente no aumenta los procesos de aspecto y desarrollo de la fruta. Bajo condiciones ligeras favorables, el enriquecimiento no afecta el número de flores y el sistema de la fruta, pues la mayoría de las flores se fijarán para dar fruto fácilmente. Sin embargo, por ejemplo en períodos oscuros, en invernaderos oscuros, o en invernaderos con lechada de cal, el enriquecimiento con CO₂ puede mejorar la fruta. Por lo tanto en buenas condiciones, de CO₂ tenemos principalmente aumento en el peso medio de fruta, mientras que en condiciones más oscuras, el CO₂ aumenta generalmente el número de frutas y el peso. El efecto total sobre la producción es en el orden de 15 - 20 % a un nivel de CO₂ de 500 ppm o más, (Aikman *et al.*, 1996).

3.8.3. Enriquecimiento de CO₂ en verano

En Europa ha llegado a ser muy común aplicar CO₂ en verano a los tomates y a otras cosechas. Los tomates, sin embargo, pueden dar algunas reacciones especiales al enriquecimiento en verano. Una alta concentración de CO₂ conjuntamente con luz intensa da un extraordinario aumento de fotosíntesis. En la misma época, la demanda por asimilación no aumenta, porque el número de frutos no cambia. Esto es diferente en pepino y muchas otras cosechas, donde el alto contenido CO₂ aumenta el número de flores y de frutas.

Este exceso de asimilados los podemos traducir en un aumento de los azúcares y almidón. Este fenómeno es una reacción de la planta a lo desequilibrado de la

situación, en resumen la cosecha es alta y de mejor calidad pero podría ser incluso más alta, si tuviéramos mas frutas.

3.8.4. Experimentos

Los resultados de un experimento en el Reino Unido con los niveles de CO₂ de 320 y 500 ppm durante 4 meses en verano demostraron un aumento de la producción de tomate de 4.5 kg m⁻². Éste es un aumento del 16 %, o 250 g m⁻² por cada 10 ppm excedente de CO₂. En un experimento en Holanda con enriquecimiento de CO₂ en verano, la producción aumento en 18 % con un enriquecimiento de 510 ppm comparados a 370 ppm. En ambos experimentos, con el enriquecimiento de CO₂ la producción crece con el aumento del peso medio de la fruta y no por el aumento de número de frutas tampoco el contenido de la materia seca y otros aspectos de la calidad donde no afecta mucho el CO₂.

Otras observaciones en España señalan que el decremento de CO₂ aumenta a medida que se desarrolla el dosel vegetal, se han registrado reducciones del 55 % con respecto a la concentración ambiental cuando el invernadero permanece cerrado (Sánchez-Guerrero, 1999). Por otra parte, las bajas tasas de renovación de aire por efecto de la insuficiente ventilación natural, durante la mayor parte del día es insuficiente para compensar los excesos térmicos, no permiten restablecer la concentración de CO₂ (Lorenzo, 1994). Registros continuos realizados durante todo el ciclo de producción indican que la concentración de CO₂ más habitual, analizada por clases de frecuencia, es de 250 a 300 ppm durante el periodo de iluminación cuando opera la ventilación pasiva (Sánchez-Guerrero, 1999). En este rango, el incremento de asimilación de carbono cuando aumenta la concentración de dióxido de carbono presenta respuestas notables, pues coincide con los valores de mayor asimilación.

3.8.5. Comportamiento de enriquecimiento con CO₂

Podemos resumir los resultados en la Figura 3.2. Es obvio que el enriquecimiento de CO₂ en 500 ppm aumenta la producción de 115 - 120 %. Si 1000 ppm y podrían ser mantenidos continuamente, la producción sería 130 - 138 %. También es importante notar que, los niveles bajos de CO₂ (debajo de 340 ppm) dan lugar a la pérdida

de producción. Bajos niveles CO_2 pueden ocurrir cuando se necesita ventilación para disminuir la temperatura en horas donde tenemos la mayor intensidad de sol. Debe ser acentuado que, si el CO_2 se provee apenas algunas horas por la mañana o algunas semanas por año, el efecto sobre la producción será solamente una fracción del efecto según lo mostrado en la Figura 3.2.

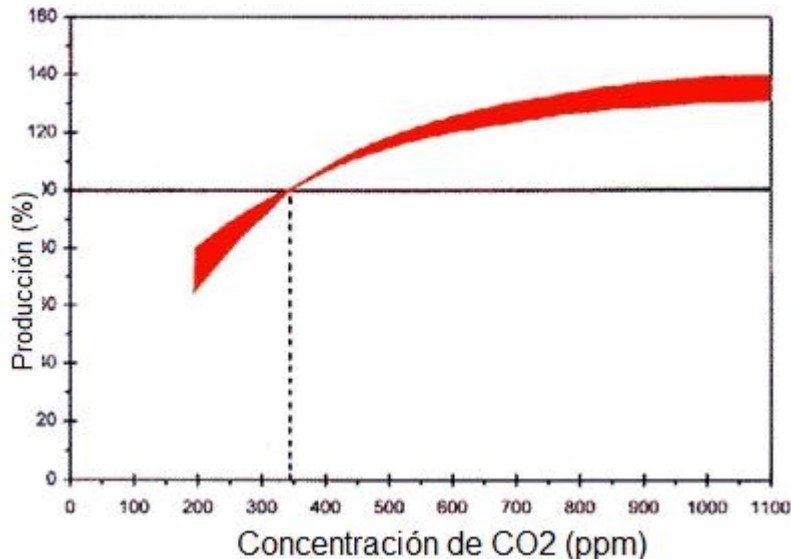


Figura 3.2: Comportamiento de enriquecimiento de CO_2 en tomate (Nederhoff, 2004).

En la Figura 3.2 se muestra la producción vegetal (en %) con varios niveles de CO_2 (en ppm). La producción en los niveles del ambiente normal (340 ppm) se toma como el nivel de la producción estándar (100 %), y la producción obtenida aplicando CO_2 se compara a esa producción estándar. La curva considera la variación en la respuesta para varias cosechas y varias condiciones. La Figura 3.2 se basa en datos de los experimentos hechos en varios lugares y con diversos cultivos.

3.9. FORMAS DE ENRIQUECIMIENTO

3.9.1. Gases obtenidos de quemadores

El combustible fósil ardiente produce una mezcla principalmente de CO_2 , vapor de agua y aire. Como ejemplo, la combustión del gas natural de 1 m^3 produce casi 2 kilogramos de CO_2 . Por lo tanto son una fuente excelente de CO_2 . Pero para el en-

riquecimiento de CO_2 el humo puede contener cantidades peligrosas de componentes nocivos (Chalabi *et al.*, 2002).

Incluso de un combustible limpio, los gases de la combustión pueden contener compuestos nocivos. Una razón es que siempre un poco de nitrógeno (N_2) del aire se quema, dando por resultado el óxido nítrico y el dióxido de nitrógeno (NO_2). La solución al problema es mejorar la técnica de combustión, como mezclar mejor combustible y aire.

Otra fuente importante de humos dañinos es la combustión incompleta causada por la carencia de oxígeno. El más dañino para las plantas es el etileno (C_2H_4), porque actúa como hormona para que la planta se estimule a madurar y envejecer. Otro gas muy peligroso de la combustión incompleta es el monóxido de carbono (CO) que es fatal para los seres humanos.

La escasez de oxígeno puede ocurrir muy fácilmente en invierno, cuando los calentadores están en uso y los ventiladores o las ventanas están cerradas. Las hornillas pueden bastante más oxígeno, y el contenido de este en el aire del invernadero cae en un porcentaje importante.

La solución a este problema es llevar suficiente suministro de aire al boiler. Cuando la combustión incompleta es inminente, los problemas pueden ser evitados levemente abriendo las ventanas o activando los ventiladores.

3.9.2. Enriquecimiento con CO_2 puro

El CO_2 “puro” puede contener cantidades pequeñas de impurezas, dependiendo de cómo se produce. El CO_2 se puede obtener como subproducto de industrias químicas o de procesos bioquímicos, o generar quemándose el combustible fósil u obtenerlo de fuentes naturales. Algunas de estas impurezas son totalmente inofensivas, como el nitrógeno que es un compuesto normal del aire. Otros son peligrosos, por ejemplo los óxidos, dióxidos de sulfuro y nitrógeno disminuyen la producción, mientras que el etileno es incluso fatal para las plantas. El etileno o un compuesto similar en el tanque de CO_2 lo harían inadecuado para el enriquecimiento. No hay normas disponibles, pero de la investigación en Europa puede ser derivado que para el enriquecimiento

con CO_2 puro a las plantas, debe contener no más de 0.005 % de etileno, 0.1 % de NO , 0.05 % NO_2 , 0.005 % ozonos y 0.10 % NH_3 (Chalabi *et al.*, 2002).

3.9.2.1. Técnicas de aplicación de CO_2

El CO_2 puro se provee al invernadero a través de cilindros recargables de aluminio o de acero (botellas) o de tanques, conteniendo CO_2 en fase líquida y de gas a una presión de cerca de 6 MPa. Los tanques criogénicos modernos tienen una presión constante de cerca de 2 MPa, mantenido por el aislamiento la refrigeración (debajo de -18°C). Contienen entre 3 y 30 toneladas de CO_2 . Hay también mini tanques criogénicos' de 300 kilogramos de CO_2 . En los Países Bajos, algunos productores juntos pueden tener un tanque grande de CO_2 con un sistema de distribución para todos los usuarios, para beneficiarse de un precio bajo.

Hay dos métodos para la distribución de CO_2 puro. El CO_2 líquido se puede inyectar a poca presión en el flujo de aire de un ventilador. Después de pasar un reductor de presión el gas de CO_2 entonces fluye por su propia presión a través de un conducto principal (cerca de 20 mm de ancho) hacia el invernadero. Para la buena distribución, debe haber un pvc pequeño o un tubo de nylon (6-8 mm) en cada cama de plantas del invernadero, e.g. 1.5 o 2 m separados.

Una forma especial de usar CO_2 puro es agregándolo al riego usado. Un carbonatador se utiliza para disolver CO_2 en el agua de irrigación. Hay algunos informes que dicen que éste mejora el crecimiento de la raíz y el aprovechamiento de los fertilizantes, pero no está claro qué causa estos efectos.

3.9.3. Pérdidas de CO_2 por ventilación

La cantidad de CO_2 debe ser igual que la cantidad perdida por la ventilación más la cantidad tomada por las plantas (fotosíntesis). La pérdida por ventilación es muy alta para altos niveles de CO_2 . Cuando el nivel de CO_2 en el invernadero está debajo del nivel ambiente, hay CO_2 que fluye hacia fuera del invernadero. Otra situación es cuando la concentración de CO_2 dentro del invernadero es igual al nivel exterior (340ppm): entonces no hay pérdida neta de CO_2 , incluso cuando las ventanas están abiertas.

En niveles más altos de CO₂, la pérdida de CO₂ depende del índice de la ventilación. Por ejemplo en 700 ppm CO₂ cuando las ventanas son cerradas, las pérdidas de CO₂ serán de 2 a 4 g[CO₂] m⁻² h⁻¹ o más en un invernadero muy agujereado. Cuando las ventanas se abren en un 20 % y con una velocidad del viento de 4m/s las pérdidas estarán en el orden de 15 g[CO₂] m⁻² h⁻¹.

3.9.4. Tasas de enriquecimiento de CO₂

En 340 ppm CO₂ (CO₂ ambiente) el índice de la fotosíntesis del cultivo varía de menos de 1 g[CO₂] m⁻² h⁻¹ durante el tiempo muy oscuro, hasta 5 g[CO₂] m⁻² h⁻¹ bajo condiciones ligeras favorables. En el nivel ambiente de CO₂ no hay pérdida al exterior. Por lo tanto mantener este nivel de CO₂ requiere solamente que sea compensada la perdida por la fotosíntesis, para la cual hasta 5 g[CO₂] m⁻² h⁻¹ es necesarios (Chalabi *et al.*, 2002).

En 700 ppm CO₂ la fotosíntesis varía de 3 g[CO₂] m⁻² h⁻¹ durante el tiempo oscuro, a 6 o 7 g[CO₂] m⁻² h⁻¹ cuando hay mucha luz. La pérdida por la ventilación varía a partir de 1/2 en las ventanas cerradas, a 15 g[CO₂] m⁻² h⁻¹. La cantidad total de CO₂ que se proveerá debe ser 5 g[CO₂] m⁻² h⁻¹ en un día cubierto sin ventilación, mientras que en días soleados con ventilación, será alrededor de 20 g[CO₂] m⁻² h⁻¹ o más lo cual es necesario para mantener 700 ppm.

3.9.5. Observaciones

El enriquecimiento mínimo recomendado es de 5 g[CO₂] m⁻² h⁻¹ que es considerado suficiente para mantener un alto nivel de CO₂ en un invernadero cerrado y también suficiente para cubrir el aprovechamiento de CO₂ para cosecha en verano, así previniendo bajos niveles de CO₂ del ambiente.

La cantidad de CO₂ utilizado anualmente varía según la estrategia y la fuente de CO₂. Una estrategia mínima absoluta requiere cerca de 3 kg m⁻² año⁻¹, mientras que una estrategia más abundante requiere 10 kg m⁻² año⁻¹. El aumento estimado en la producción anual de estas dos estrategias estará en el orden de 2 a 8 %. Sin embargo, en los períodos con poca ventilación y los niveles claramente elevados de CO₂, el

efecto del enriquecimiento con CO_2 puede aumentar la producción en el orden de 10 % al 20 % o mas.

CAPÍTULO 4

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología usada a lo largo de esta tesis es la siguiente:

- **Modelado del sistema invernadero:** Modelar el clima del invernadero, la técnica que se ha usado para modelar este sistema está basada en principios fundamentales, usando las leyes físicas de la termodinámica.
- **Modelado de crecimiento de tomate:** Se modela crecimiento de tomate utilizando como base el modelo TOMGRO simplificado.
- **Modelado de aprovechamiento:** Modelar el aprovechamiento de CO_2 por la planta de tomate bajo sistema controlado, los modelos permiten predecir los resultados esperados tendiendo la posibilidad de modificarlos así llegando a una optimización.

4.1. DESARROLLO DE MODELOS

En este apartado se exponen los métodos de modelado utilizados y analizando que ventaja tiene una o otra. Dentro de muchos métodos, citamos los más importantes:

- **Modelado usando principios fundamentales:** La tendencia de la investigación en este campo se dirige hacia la reducción del orden del modelo. La mayoría de los modelos son muy complejos y el hecho de describirlos con detalle puede conducir a cientos de ecuaciones. En el caso del control predictivo la complejidad de las ecuaciones puede resultar innecesaria, y se puede describir las dinámicas más relevantes del proceso con un número mucho más reducido

de ecuaciones. El objetivo de esta técnica de reducción del orden del modelo es obtener un modelo de orden reducido con una capacidad predicativa apropiada del comportamiento del sistema.

- **Modelado empírico:** La investigación en este campo se dirige hacia la generación de los datos. En este sentido es fundamental saber que la fiabilidad de cualquier modelo empírico esta intrínsecamente relacionada con los datos usados para la construcción del modelo.

En general, cualquier modelo empírico es una aproximación de la dinámica del sistema, por esta razón el problema de incertidumbre del modelo no puede ignorarse o tratarse heurísticamente. Ambas incertidumbres, paramentrales y estructurales, son significativas. Estas incertidumbres están principalmente determinadas por la cantidad y densidad de los datos, de aquel problema es directamente relacionado con el diseño del experimento de identificación. Desde el punto de vista de la estrategia de control podemos diseñar un controlador o restringir el cálculo de la señal de control para que la parte incierta del modelo no afecte el rendimiento y evitar un comportamiento oscilatorio o inestable. Este problema se clasifica dentro de la técnica de control robusto. Para aplicar esta técnica hay que aplicar un método para capturar la incertidumbre en una base cuantitativa.

- **Modelado integrado:** Esta técnica consiste en usar las dos técnicas de modelado, empírica y basada en principios fundamentales. Tiene un gran interés porque en la práctica se necesitan ambas cosas. El conocimiento fundamental y los datos, y que cada una de las técnicas es necesaria para obtener un buen modelo. En este caso, el éxito de la operación de modelado depende de la habilidad de combinar entre la información sacada a partir de las dos técnicas.

La integración se puede hacer de varias maneras:

- Un modelo basado en principios fundamentales tiene que ser usado solamente para fines de simulaciones con el objetivo de tener una visión sobre

el diseño de los experimentos y la selección de la estructura de los modelos. Virtualmente los simuladores no imponen ninguna restricción en el sentido de la cantidad y tipo de los datos que pueden ser recogidos. Es ideal para diseñar experimentos de identificación de variables que dan una visión clara del sistema sin preocuparse de problemas de inestabilidad. Además pueden ofrecer indicaciones de cuantos datos se necesitan y que rendimiento en el lazo cerrado se tiene que esperar finalmente. Incluso en el caso de que si tengamos un modelo fundamental muy fiable, un modelo empírico puede ofrecer una manera de obtener un modelo más simple que es más fácil a la hora de usarlo en-línea.

- Primero escribir las ecuaciones básicas representando los balances másicos y energéticos, pero se da poco interés a algunas informaciones críticas como la relaciones cinéticas y termodinámicas. En este caso hay que incluir una caja negra dentro de modelo fundamental. La pregunta clave es como hay que incluir esta caja negra o estimar los parámetros más relevantes en base de los datos de entrada-salida de la planta. El modelo resultante todavía puede tener solamente una capacidad predicativa de extrapolación y conducirnos a problemas en lazo cerrado. Sin embargo, es probable que el problema sea menos severo.

4.2. FENÓMENOS QUE INFLUYEN EN EL CLIMA DEL INVERNADERO

Es importante destacar que este sistema se puede modelar de dos maneras diferentes. La primera es sin considerar el cultivo. De esta forma se estudian solo las variables climáticas dentro del invernadero, despreciando el efecto de las plantas sobre el clima interno de éste. La segunda forma, es incorporar el modelo del cultivo. Así, podemos estudiar el crecimiento de las plantas bajo un cierto clima creado por el invernadero. En este capítulo se van a estudiar las dos formas de modelar el invernadero.

Las condiciones de crecimiento dentro de invernadero no solamente tienen que ser entendidas de una forma cualitativa, sino además de manera cuantitativa para

determinar su impacto sobre la producción. En este sentido el clima del invernadero puede ser cuantificado en relación a las condiciones externas y a las propiedades físicas del invernadero y su equipamiento (Bot, 1983).

El invernadero es un recinto cerrado donde la diferencia entre el clima interior y exterior se crea principalmente por la cubierta, mediante la radiación solar y los mecanismos del estancamiento de aire. La radiación se constituye de dos componentes, la onda corta que proviene directamente del sol, y la onda larga que proviene por emisión del suelo, el sistema de calefacción, las plantas y la transmisión por la cubierta.

Los fenómenos que influyen sobre el clima dentro del invernadero son:

- **La ventilación:** Es un factor determinante en la totalidad del clima interno. Su influencia se extiende sobre la temperatura, la humedad y sobre la concentración de CO₂ del aire.
- **La radiación solar:** Transporte directo de energía entre las superficies de cuerpos opacos y no opacos por ondas electromagnéticas, a través de un medio transparente. Sólo la energía se transporta por este mecanismo. Influye mucho sobre la temperatura interior por medio de la cantidad de energía que proporciona. Es una radiación de onda corta, con una longitud de onda de entre 0.2 y 5 μm .
- **Los procesos de intercambio por convección:** Transporte del flujo de energía y masa desde un lugar a otro. El transporte puede ser desde una superficie a un flujo o viceversa. Se presenta en todo el invernadero y se pueden resumir en:
 - Intercambios del aire interior a la cara interna del material de la cubierta.
 - Intercambios de la cara exterior de la cubierta al aire exterior.
 - Intercambios a nivel de la cubierta.

Los estados de estas variables en el invernadero, son determinados por balances de energía y masa, en los cuales se involucra la superficie del invernadero, el aire, el cultivo y el suelo (Bot, 1983).

La luz penetra al invernadero en forma eficiente, cuando la superficie de la cubierta expuesta es perpendicular a los rayos del sol, es decir, cuando forma un ángulo recto con el haz de luz incidente (Corvalan, 1997).

En la Figura 4.1, se describe el clima del invernadero y sus dependencias como son la temperatura, humedad del aire y concentración de CO₂ dentro del mismo, las condiciones ambientales afuera y los equipos de control.

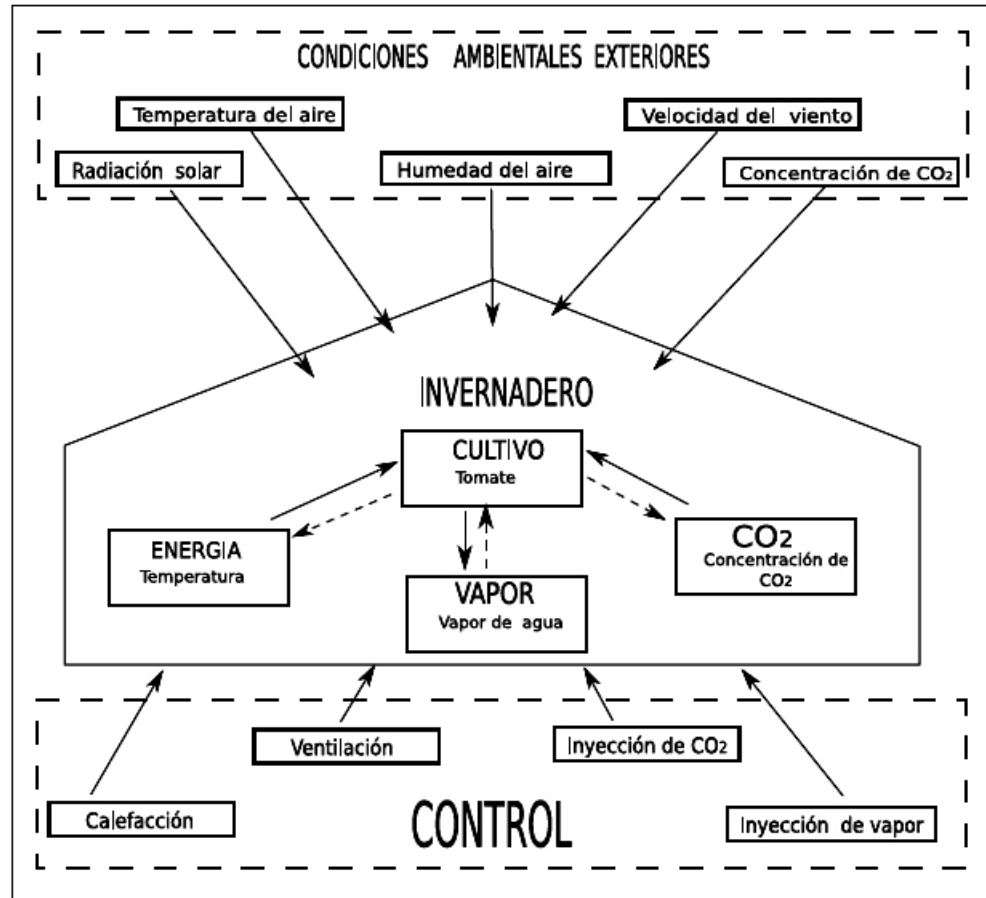


Figura 4.1: Esquema del modelo de clima de un invernadero.

4.3. LUGAR DEL EXPERIMENTO

En la investigación se utilizó un invernadero del Campo Experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ubicado en

el km. 6.5 carretera Celaya-San Miguel de Allende, Celaya Guanajuato. Está ubicado a $20^{\circ} 34'$ latitud norte y $100^{\circ} 49'$ longitud oeste, a una altitud de 1650 msnm.

El invernadero es de tipo cenital con dimensiones 54 m de largo por 35 m de ancho, compuesto de 6 naves de 9×35 m, una altura de 6 m, cubriendo un área de suelo de 1890 m^2 , un volumen aproximado de 9900 m^3 y un área de superficie de cubierta de aproximadamente 6393 m^2 . La cubierta es de polietileno de una capa calibre 800 ultravioleta con una vida útil de 2 años. Cuenta con ventanas laterales, frontales y cenitales, protegidas con malla antiáfidos de 45×25 hilos, estas ventanas se cierran por medio de malacates y cubren un superficie de 520 m^2 y representa el 36 % de la superficie cultivada. La temperatura se controla con ventilación natural en los meses cálidos, y en los meses fríos con un sistema de calefacción compuesto por 2 unidades con las características siguientes para cada unidad, capacidad calorífica (input) 145.3 kw, capacidad calorífica (output) 127.9 kW, flujo de aire 12500 m h^{-1} presión estática 60 Pa, energía eléctrica 1600 W, energía de aporte 240 V.

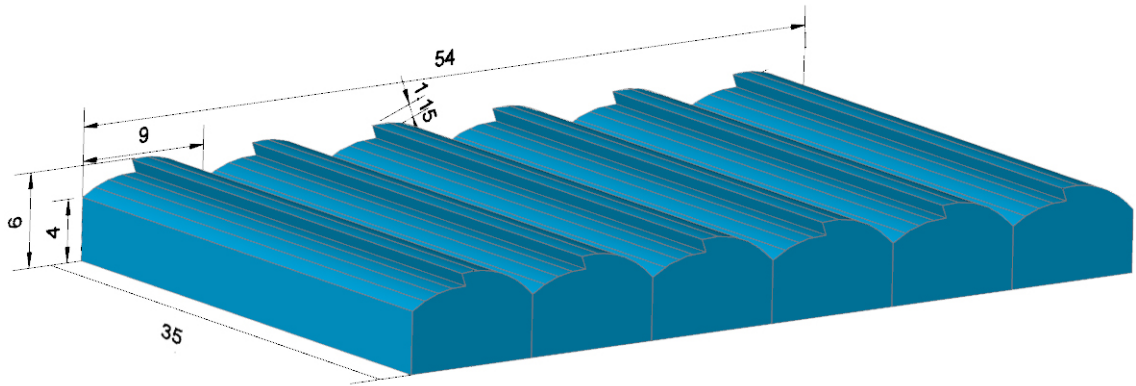


Figura 4.2: Descripción del invernadero donde se tomaron los datos.

4.4. ESTRUCTURA E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El modelo se implementó en MATLAB Versión 7.0 y SIMULINK Versión 6.0, consta de un programa principal donde se definen los parámetros y las variables del modelo del clima, y un archivo C-MEX donde se implementan las ecuaciones

del modelo que es llamado por el programa principal a través de una rutina mdl, se utiliza la rutina de integración Runge-Kutta de segundo orden de paso variable ode45 y una tolerancia de $1e - 10$ ver anexo (B. Programa principal).

4.5. MODELADO DEL CLIMA DEL INVERNADERO

Las dinámicas incluidas en este modelo son la temperatura, la humedad y el nivel de CO_2 . También se integra el modelo de crecimiento de las plantas. El cultivo seleccionado para el modelado es tomate a través del modelo de crecimiento TOMGRO.

4.5.1. Modelo de humedad

El balance de masa de vapor de agua del interior del invernadero se define en términos de la variación de la cantidad absoluta de vapor de agua C_{a-H_2O} en $\text{kg} [\text{H}_2\text{O}] \text{ m}^{-3}$ por área de piso de invernadero.

$$h \frac{dC_{a-H_2O}}{dt} = \Phi_{m-c-a-H_2O} - \Phi_{m-c-o-H_2O} \quad (4.1)$$

donde $\Phi_{m-c-a-H_2O}$ es la tasa de flujo de masa de vapor de agua por transpiración del cultivo en $\text{kg} [\text{H}_2\text{O}] \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, $\Phi_{m-c-o-H_2O}$ es la tasa de flujo de masa de vapor de agua por ventilación en $\text{kg} [\text{H}_2\text{O}] \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ y h es la altura promedio del invernadero en $[\text{m}]$.

4.5.1.1. Transpiración del cultivo

La tasa de transpiración de las plantas depende de la radiación incidente y del déficit de presión de vapor de agua del aire, se calcula con la ecuación de transpiración del cultivo a través de la ecuación de Penman- Monteith modificado por Stanghellini:

$$\Phi_{m-c-a-H_2O} = \frac{\frac{S_\epsilon r_{cl} R_n}{\lambda}}{1 + S_\epsilon r_{cl} + r_h} + \frac{2IAF(C_{a-H_2O}^* - C_{a-H_2O})}{(1 + S_\epsilon)r_{cl} + r_h} \quad (4.2)$$

donde $S_\epsilon = \frac{s}{\gamma}$ es el cambio de contenido de calor latente respecto al contenido de calor sensible, r_{cl} es la resistencia de la capa límite en $[\text{s m}^{-1}]$, r_h es la resistencia interna de la hoja en $[\text{s m}^{-1}]$, R_n es la radiación neta disponible para el dosel en $[\text{W m}^{-2}]$, λ es el calor latente de evaporación en $[\text{J kg}^{-1}]$, $C_{a-H_2O}^*$ es el contenido

de agua en condiciones de saturación en $\text{kg [H}_2\text{O]m}^{-3}$, s es la pendiente de la curva de presión de vapor de agua a saturación $[\text{K Pa}^{-1}]$, γ es al constante psicrométrica termodinámica dada en $[\text{Pa K}^{-1}]$ y LAI es el índice de área foliar $[\text{m}^2 \text{ m}^{-2}]$.

4.5.1.2. Resistencia estomática

La resistencia estomática se modela con la ecuación propuesta por (Boulard y Wang, 2000)

$$r_s = 200 \left(1 + \frac{1}{\exp(0.05(\tau_{inv}I_0 - 50))} \right) [sm^{-1}] \quad (4.3)$$

donde τ_{inv} es la transmisividad de la cubierta del invernadero, I_0 es la radiación global exterior en $[\text{W m}^{-2}]$.

4.5.1.3. Resistencia de la capa límite

La resistencia aerodinámica se supone constante (Boulard y Wang, 2000)

$$r_{cl} = 200 [sm^{-1}] \quad (4.4)$$

4.5.1.4. Radiación neta

La radiación neta que absorbe el cultivo se modela mediante

$$R_n = 0.86(1 - \exp(-Ke IAF))\tau_{inv}I_0 [W m^{-2}] \quad (4.5)$$

donde 0.86 es un coeficiente empírico que se debe estimar.

4.5.2. Transporte de vapor agua por ventilación

El flujo de masa de vapor de agua debido a la ventilación natural se modela de la siguiente manera

$$\Phi_{m-c-o-H_2O} = \frac{\Phi_{a-o}}{As} (C_{a-H_2O} - C_{o-H_2O}) kg[H_2O] s^{-1} m^{-2} \quad (4.6)$$

donde Φ_{a-o} es el flujo de ventilación $[\text{m}^3 \text{ s}^{-1}]$, C_{a-H_2O} es la concentración de agua del aire interior en $[\text{kg m}^{-3}]$ y C_{o-H_2O} es la concentración de agua del aire exterior $[\text{kg m}^{-3}]$.

4.5.2.1. Flujo de ventilación

El flujo de ventilación se calcula con la ecuación propuesta por Kittas (1997)

$$\Phi_{a-o} = \frac{C_d A_T}{2} \left[2gV_\epsilon^2 \left(\frac{\Delta T}{T_\epsilon} \right) \frac{h_{vt}}{2} + C_w v_\epsilon^2 \right]^{0.5} \quad (4.7)$$

donde A_T es la superficie total de ventanas abiertas en $[\text{m}^2]$, g es la constante de gravedad $[9.81 \text{ m s}^{-2}]$, T_ϵ es la temperatura de aire exterior en $[\text{K}]$, h_{vt} es la altura vertical entre las ventanas cenital y lateral en $[\text{m}]$, C_d es el coeficiente empírico de descarga, C_w es el coeficiente empírico por efecto del viento y v_ϵ velocidad del viento exterior $[\text{m s}^{-1}]$. El término V_ϵ se estima mediante

$$V_\epsilon = \frac{2(2C_b)^{-0.5}}{(1 + C_b)(1 + C_b^2)^{0.5}} \quad (4.8)$$

donde $C_b = \frac{A_{cen}}{A_{lat}}$, A_{cen} es la superficie de apertura cenital y A_{lat} es la superficie de apertura lateral.

4.5.3. Modelo de temperatura

En forma de ecuación diferencial tenemos:

$$\rho_a c_{p-a} h \frac{dT_a}{dt} = Q_{rd-a} + Q_{s-a} - Q_{a-e} - Q_{vent} - Q_{Tra} [K s^{-1}] \quad (4.9)$$

donde ρ_a es la densidad del aire en $\text{kg}[\text{aire seco}] \text{ m}^{-3}$, h es la altura promedio del invernadero $[\text{m}]$, C_{p-a} es la capacidad de calor específica del aire en $[\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}]$, Q_{rd-a} es la radiación solar absorbida por el aire interior del invernadero $[\text{W}]$, Q_{s-a} es la transferencia de calor por convección entre la superficie del suelo y aire interior en $[\text{W}]$, Q_{a-e} es la transferencia por convección y conducción en la cubierta entre el aire exterior y el aire interior en $[\text{W}]$, Q_{vent} es la transferencia de calor con el aire exterior debido a la ventilación y pérdida por infiltración en $[\text{W}]$ y Q_{Tra} es la transferencia de calor latente por transpiración del cultivo $[\text{W}]$.

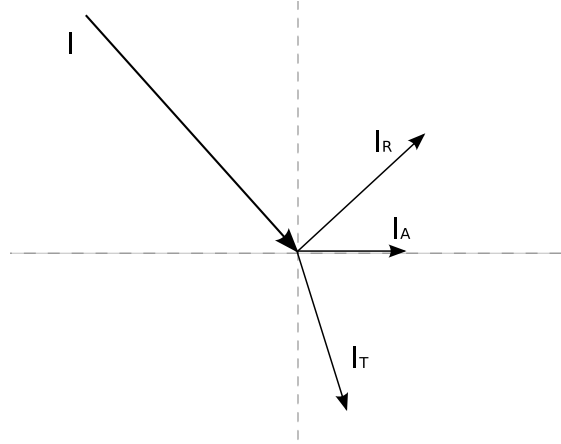
4.5.3.1. Radiación solar absorbida

La cubierta es opaca a la radiación de onda larga (mayor de 3 μm). La cubierta entonces actúa como una barrera entre el invernadero y este tipo de radiaciones.

Así la interacción de la radiación de onda larga con la cubierta contribuye solo en el balance energético de esta última. Este fenómeno es el llamado efecto invernadero.

La radiación de onda corta proviene directamente del sol como radiación directa o del ambiente como radiación difusa. Los dos tipos de radiaciones tienen diferentes características espectrales y geométricas.

En su impacto con la cubierta, la radiación de onda corta se divide en tres partes:



- **IR** es radiación reflejada.
- **IT** es radiación transmitida.
- **IA** es radiación absorbida.

Esta última la modelamos de la siguiente forma.

$$Q_{rd-a} = \eta_{rd} \tau_{cb} I_0 [W m^{-2}] \quad (4.10)$$

donde η_{rd} es el coeficiente de absorción de radiación de onda corta por el aire del invernadero, τ_{cb} es el coeficiente de transmisión de radiación de onda corta de la cubierta del invernadero y I_0 es la radiación solar [$W m^{-2}$].

4.5.3.2. *Proceso de intercambio por convección-conducción*

El proceso de intercambio por convección-conducción es uno de los más importantes mecanismos de pérdida de calor en el invernadero. El intercambio ocurre entre la cubierta, el suelo, la vegetación y el aire interior y entre la cubierta y el aire exterior. El calor de convección es proporcional a la diferencia de temperaturas ΔT entre dos superficies. La transferencia de calor desde el suelo hacia el aire Q_{s-a} , depende principalmente en la diferencia de temperatura, y despreciando la transferencia de calor desde el suelo debido a la evaporación de agua tenemos:

4.5.3.3. *Transferencia por convección suelo-aire*

$$Q_{s-a} = V_s (T_s - T_a) [W m^{-2}] \quad (4.11)$$

donde V_s es el coeficiente de transferencia de calor entre el aire interior y la superficie en $[W m^{-2}]$, T_s y T_a son la temperaturas de la superficie del suelo y del aire interior en $[K]$ y $V_s = a_{s1}|T_a - T_s|^{0.33}$ la constante a_{s1} es un parámetro a estimar.

4.5.3.4. *Transferencia por convección y conducción entre el aire exterior y el aire interior*

$$Q_{a-e} = V_c (T_t - T_0) \quad (4.12)$$

donde V_c es el coeficiente global de transferencia de calor entre el aire interior y la cubierta en $[W m^{-2} K^{-1}]$, T_0 es la temperatura del aire exterior del invernadero en $[K]$ y $V_c = a_{c1} + a_{c2}v_0^{a_{c3}}$ con v_0 que es la velocidad del viento exterior $m s^{-1}$, las constantes a_{c1} , a_{c2} y a_{c3} son parámetros a estimar.

4.5.3.5. *Transferencia por transpiración del cultivo*

$$Q_{tra} = \lambda \cdot \Phi_{m-c-a-H_2O} [W m^{-2}] \quad (4.13)$$

donde λ es el calor latente de vaporización del agua $J kg^{-1}[H_2O]$ y $\Phi_{m-c-a-H_2O}$ es la tasa de transpiración de las plantas en $kg^{-1}[H_2O] m^{-2} s^{-1}$.

4.5.4. Modelo de dióxido de carbono

El estado de dióxido de carbono $C_{a.CO2}$ {kg[CO₂] m⁻³[aire]} en el aire del invernadero es definido por:

$$V_a \cdot \frac{dC_{a.CO2}}{dt} = \Phi_{m.in.a.CO2} - \Phi_{m.a.c.CO2} - \Phi_{m.a.o.CO2} \quad (4.14)$$

donde V_a es el volumen que ocupa el aire del invernadero {m³}, las tasas de flujos de masa de dióxido de carbono considerados son: $\Phi_{m.in.a.CO2}$ aportado al aire interior (variable de control) {kg[CO₂] s⁻¹}, $\Phi_{m.a.c.CO2}$ del aire interior al dosel (tasa de fotosíntesis del cultivo) {kg[CO₂] s⁻¹} y $\Phi_{m.a.o.CO2}$ del interior al exterior por ventilación {kg[CO₂] s⁻¹}.

4.5.4.1. Aporte o inyección de CO₂

La tasa de flujo de masa de dióxido de carbono $\Phi_{m.in.a.CO2}$ {kg[CO₂] s⁻¹} aportado al aire interior se describe por:

$$\Phi_{m.in.a.CO2} = v_{p.CO2} \cdot \Phi_{m.CO2} \quad (4.15)$$

donde $\Phi_{m.CO2}$ {kg[CO₂] s⁻¹} es la máxima tasa de flujo de masa de CO₂ inyectado a aportado, y $v_{p.CO2}$ es la posición de la válvula de inyección de CO₂ y es una variable de control.

4.5.4.2. Fotosíntesis y respiración

La tasa de flujo de masa de dióxido de carbono $\Phi_{m.a.c.CO2}$ {kg[CO₂] s⁻¹} del aire interior al dosel (tasa de fotosíntesis del dosel) se describe por:

$$\Phi_{m.a.c.CO2} = P_{cg} - r_c \quad (4.16)$$

donde la tasa de asimilación bruta del dosel P_{cg} {kg[CO₂] s⁻¹} está dada por

$$P_{cg} = \frac{10^{-3}}{60} \cdot A_s \cdot P_g \quad (4.17)$$

y la tasa de respiración oscura del dosel r_c {kg[CO₂] s⁻¹} está dada por

$$r_c = \frac{10^{-3}}{60} \cdot A_s \cdot r_D \quad (4.18)$$

donde P_g $\{g[CO_2] \text{ m}^{-2}[\text{suelo}] \text{ min}^{-1}\}$ es la tasa de asimilación bruta del dosel, r_D $\{g[CO_2] \text{ m}^{-2}[\text{suelo}] \text{ min}^{-1}\}$ es la tasa de respiración oscura del dosel y A_s $\{m^2\}$ es el área de la superficie del suelo o piso del invernadero.

4.5.4.3. *Transporte de dióxido de carbono por ventilación*

La tasa de flujo de masa de dióxido de carbono $\Phi_{m_{a.o.CO_2}}$ $\{kg[CO_2] \text{ s}^{-1}\}$ del interior al exterior debido a la ventilación se describe por:

$$\Phi_{m_{a.o.CO_2}} = \Phi_{a.o.} \cdot (C_{a.CO_2} - C_{o.CO_2}) \quad (4.19)$$

donde $\Phi_{a.o.}$ $\{m^3 \text{ s}^{-1}\}$ es la tasa de ventilación, $C_{a.CO_2}$ $\{kg \text{ m}^{-3}\}$ es la concentración de dióxido de carbono del aire interior y $C_{o.CO_2}$ $\{kg \text{ m}^{-3}\}$ es la concentración de dióxido de carbono del aire exterior.

4.5.5. Masa térmica

El balance de energía de la masa térmica del invernadero

$$C_m \cdot \frac{dT_m}{dt} = Q_{sm} - Q_{mm} - Q_{fm} \quad (4.20)$$

donde T_m $\{K\}$ es la temperatura de la masa térmica, C_m $\{J \text{ m}^{-2} K\}$ es la capacidad específica de la masa térmica.

La energía almacenada por la masa térmica Q_{sm} $\{W \text{ m}^{-2}\}$ durante el día

$$Q_{sm} = \alpha_m \cdot \tau \cdot S_o \quad (4.21)$$

donde α_m coeficiente de absorción de calor de la masa térmica, τ es la transmisividad del invernadero, S_o $\{W \text{ m}^{-2}\}$ es la radiación solar exterior.

Las pérdidas de energía hacia el fondo del suelo Q_{fm} $\{W \text{ m}^{-2}\}$ se modela

$$Q_{fm} = k_a \left(\frac{T_m - T_{ref}}{z_{ref}} \right) \quad (4.22)$$

donde k_a $\{W \text{ m}^{-1} K^{-1}\}$ es el coeficiente de conductividad de la masa térmica, T_m $\{K\}$ la temperatura de la masa térmica, T_{ref} $\{K\}$ temperatura del suelo a la profundidad de referencia y z_{ref} $\{m\}$ la profundidad de referencia a la cual la temperatura de la masa térmica es constante.

4.6. MODELO SIMPLIFICADO TOMGRO

El modelo simplificado TOMGRO surge como una opción para eliminar la complejidad del modelo completo TOMGRO (Jones, 1991) y posibilitar su uso en sistemas de control en línea conservando sus características fisiológicas (Jones, 1999). Las variables de estado que contiene son: número de nodos (X_N), índice de área foliar (X_{IAF}), peso seco total (X_{PS}), materia seca de frutos (X_F) y materia seca de frutos maduros (X_M).

Cantidad de nodos. La aparición de nodos es modelada considerando la temperatura como el elemento principal que la regula:

$$\frac{dX_N}{dt} = N_m \cdot f_N(X_{ta}) \quad (4.23)$$

donde N_m es un coeficiente empírico que indica la velocidad de aparición de nodos y $f_N(X_{ta})$ es una función lineal a tramos que depende de la temperatura.

$$f_N(X_{ta}) = \begin{cases} 0 & X_{ta} < 9^\circ \text{C} \\ 0.1833(X_{ta} - 9) & 9^\circ \text{C} \leq X_{ta} < 12^\circ \text{C} \\ 0.028125(X_{ta} - 12) + 0.55 & 12^\circ \text{C} \leq X_{ta} < 28^\circ \text{C} \\ 1.0 - 0.4545(X_{ta} - 28) & 28^\circ \text{C} \leq X_{ta} < 50^\circ \text{C} \\ 0 & X_{ta} \geq 50^\circ \text{C} \end{cases} \quad (4.24)$$

Esta variable de estado es calculada de la misma manera en todas las versiones de TOMGRO (Jones, 1999).

Índice de área foliar. El índice de área foliar es estimado por:

$$\frac{dX_{IAF}}{dt} = \rho \cdot \delta \frac{\exp[\beta(X_N - N_b)]}{1 + \exp[\beta(X_N - N_b)]} \frac{dX_N}{dt} \quad (4.25)$$

donde ρ es la densidad de plantas, β es un coeficiente empírico, δ es la máxima expansión de área foliar por nodo, N_b puede ser un parámetro constante o bien una función lineal a tramos dependiente de la temperatura promedio diaria (T_d), y tiene

los siguientes valores:

$$N_b = \begin{cases} 46.5 & T_d < 8.5^\circ \text{ C} \\ 46.5 - 4.0(T_d - 8.5) & 8.5^\circ \text{ C} \leq T_d < 12.5^\circ \text{ C} \\ 30.5 - 2.0(T_d - 12.5) & 12.5^\circ \text{ C} \leq T_d < 16.5^\circ \text{ C} \\ 22.5 - 1.0(T_d - 16.5) & 16.5^\circ \text{ C} \leq T_d < 20.5^\circ \text{ C} \\ 18.5 - 0.5(T_d - 20.5) & 20.5^\circ \text{ C} \leq T_d < 24.5^\circ \text{ C} \\ 16.5 - 0.25(T_d - 24.5) & 24.5^\circ \text{ C} \leq T_d < 28.5^\circ \text{ C} \\ 15.5 - 0.125(T_d - 28.5) & 28.5^\circ \text{ C} \leq T_d < 32.5^\circ \text{ C} \\ 15.0 - 0.125(T_d - 32.5) & 32.5^\circ \text{ C} \leq T_d < 40.5^\circ \text{ C} \\ 14.0 & T_d \geq 40.5^\circ \text{ C} \end{cases} \quad (4.26)$$

El parámetro N_b 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 entrarán en estado de senescencia, y es en ese momento cuando se define $C_{IAF,max}$.

Materia seca total. La tasa de cambio de materia seca total de la planta, sin incluir materia seca de raíces, tiene la siguiente expresión:

$$\frac{dX_{PS}}{dt} = CR_n - p_1 \cdot \rho \left(\frac{dX_N}{dt} \right) \quad (4.27)$$

donde p_1 es un parámetro que pondera la pérdida de materia seca por nodo después que se alcanza el máximo de área foliar ($C_{IAF,max}$), CR_n es una función que expresa el crecimiento de la planta y se define así:

$$CR_n = C_E (FOT_b - R_m) (1 - f_R(X_N)) \quad (4.28)$$

donde FOT_b es fotosíntesis, R_m respiración, C_E es la eficiencia de crecimiento, un parámetro que expresa la conversión de carbohidratos a materia seca, y $f_R(X_N)$ 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:

$$FOT_b = \frac{C_{cnv fot} F_{max} f_{tfot}(X_{ta})}{CK} \ln \left[\frac{(1 - C_m) F_{max} + \alpha CK \cdot V_{RFA}}{(1 - C_m) F_{max} + \alpha CK \cdot V_{RFA} \exp(-CK \cdot X_{IAF})} \right] \quad (4.29)$$

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, $C_{cnv fot}$ es un coeficiente para conversión de unidades de $\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a $\text{g}(\text{CH}_2\text{O}) \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$, f_{tfot} 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:

$$F_{max} = \tau \cdot V_{CO_2} \quad (4.30)$$

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_{tfot} es lineal a tramos y tiene los siguientes valores:

$$f_{tfot} = \begin{cases} 0 & X_{ta} < 0^\circ \text{C} \\ 0.0744 X_{ta} & 0^\circ \text{C} \leq X_{ta} < 9.0^\circ \text{C} \\ 0.67 + 0.11(X_{ta} - 9) & 9.0^\circ \text{C} \leq X_{ta} \leq 12.0^\circ \text{C} \\ 1.0 & 12.0^\circ \text{C} < X_{ta} \leq 28.0^\circ \text{C} \\ 1.0 - 0.1429(X_{ta} - 28) & 28.0^\circ \text{C} < X_{ta} < 35.0^\circ \text{C} \\ 0 & X_{ta} \geq 35.0^\circ \text{C} \end{cases} \quad (4.31)$$

La respiración se expresa como:

$$R_m = \int_{t_i}^{t_f} Q_{10}^{(X_{ta}-20)/10} r_m (X_{PS} - X_M) dt \quad (4.32)$$

donde X_{ta} es la temperatura del aire, Q_{10} es la sensibilidad de respiración a la temperatura y r_m es un coeficiente de respiración de mantenimiento, t_i es el tiempo inicial y t_f es el tiempo final. 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 $f_R(X_N)$ es una función lineal a tramos con los siguientes valores:

$$f_R(X_N) = \begin{cases} 0.2 & X_N = 1 \\ 0.2 - 0.0045(X_N - 1) & 1 < X_N \leq 12 \\ 0.15 - 0.0056(X_N - 12) & 12 < X_N \leq 21 \\ 0.10 - 0.0033(X_N - 21) & 21 < X_N < 30 \\ 0.07 & X_N \geq 30 \end{cases} \quad (4.33)$$

En condiciones de climas cálidos el crecimiento de los frutos puede llegar a ser muy bajo debido a altas temperaturas, por tanto habrá exceso de carbohidratos. Este modelo no incluye el cálculo de demanda por frutos y por tanto se asume que hay un máximo crecimiento vegetativo por nodo y que el incremento de materia seca total puede estar restringido por este límite, modelándolo mediante la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{dX_{PS}}{dt}\right)_{max} = \frac{dX_F}{dt} + (Cv_{max} - p_1)\rho \frac{dX_N}{dt} \quad (4.34)$$

donde Cv_{max} es el máximo crecimiento de tejido vegetativo por nodo.

El crecimiento de la materia seca total será el mínimo de las ecuaciones (4.27) y (4.34).

Materia seca de frutos. La materia seca de frutos es determinada por la siguiente expresión

$$\frac{dX_F}{dt} = CR_n \cdot \alpha_F \cdot f_F(T_d) \{1 - \exp[-v(X_N - N_{f1})]\} \cdot g(T_{dia}) \quad (4.35)$$

donde α_F es un parámetro que indica la máxima distribución de crecimiento destinada a frutos, N_{f1} indica el número de nodos que tiene la planta cuando aparece el primer fruto, v es un coeficiente de transición entre crecimiento vegetativo y fruto, 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, mientras que la función $g(T_{dia})$ modifica la distribución a frutos en condiciones de días muy cálidos, y se definen de la siguiente manera:

$$f_F(T_d) = \begin{cases} 0 & T_d \leq 12.5^\circ \text{ C} \\ 0.1(T_d - 12.5) & 12.5^\circ \text{ C} < T_d \leq 16.5^\circ \text{ C} \\ 0.4 + 0.095(T_d - 16.5) & 16.5^\circ \text{ C} < T_d \leq 20.5^\circ \text{ C} \\ 0.78 + 0.055(T_d - 20.5) & 20.5^\circ \text{ C} < T_d \leq 24.5^\circ \text{ C} \\ 1.0 - 0.25(T_d - 24.5) & 24.5^\circ \text{ C} < T_d < 28.5^\circ \text{ C} \\ 0 & T_d \geq 28.5^\circ \text{ C} \end{cases} \quad (4.36)$$

$$g(T_{dia}) = 1.0 - 0.154(T_{dia} - T_{crit}) \quad (4.37)$$

donde T_{dia} es la temperatura promedio de las horas con luz durante el día y T_{crit} es la temperatura por encima de la cual el crecimiento del fruto se reduce.

Materia seca de frutos maduros. La dinámica de frutos está basada en el efecto de la temperatura sobre la maduración de frutos y se estima así:

$$\frac{dX_M}{dt} = D_F(T_d)(X_F - X_M) \quad \text{Si } X_N > (N_{f1} + X_F) \quad (4.38)$$

donde X_F indica el número de nodos desde que aparece el primer fruto hasta que madura, N_{f1} indica el número de nodos cuando aparece el primer fruto y $D_F(T_d)$ es una función lineal a tramos con los siguientes valores:

$$D_F(T_d) = \begin{cases} 0 & T_d \leq 9^\circ \text{ C} \\ 0.0025 T_d & 9^\circ \text{ C} < T_d \leq 15^\circ \text{ C} \\ 0.015 + 0.0058 T_d & 15^\circ \text{ C} < T_d \leq 21^\circ \text{ C} \\ 0.05 & 21^\circ \text{ C} < T_d \leq 35^\circ \text{ C} \\ 0.05 - 0.0033 T_d & 35^\circ \text{ C} < T_d \leq 50^\circ \text{ C} \\ 0 & T_d > 50^\circ \text{ C} \end{cases} \quad (4.39)$$

NOTACIÓN

Ver anexos b.1 y b.2.

4.7. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DEL MODELO DE CLIMA

Para obtener un modelo confiable, tenemos que disponer de ecuaciones basadas en principios básicos lo suficiente representativas de los procesos que se llevan a cabo bajo el invernadero, además de una técnica que permita ajustar los parámetros disminuyendo los errores entre los datos reales y los simulados. Para esto se utilizó una técnica de optimización que emplea un algoritmo de evolución diferencial para sistemas dinámicos. La evolución diferencial nació en 1994 en los intentos de Kenneth Price por resolver polinomios Chebychev, problema propuesto por Rainer Storn. En estos intentos fue cuando Kenneth Price concibió la idea de utilizar las diferencias entre los vectores para perturbar el vector de la población. Con esta idea principal, Storn y Price comenzaron a realizar simulaciones y pruebas para poder construir un método versátil y robusto como lo es hoy en día esta heurística. La comunidad de

ED ha estado creciendo desde 1995 y cada día más investigadores trabajan con esta técnica.

La ED es un método de búsqueda que utiliza N vectores de la siguiente forma $x_{i,G}; i = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ como población de cada generación (G). El valor de N no cambia durante el proceso de minimización. La población inicial se elige de manera aleatoria si no se conoce nada acerca del problema. Como regla, se asume una distribución uniforme para las decisiones aleatorias a tomar. La idea principal detrás de la ED es un nuevo esquema para generar vectores. La ED genera estos nuevos vectores cuando se suma la diferencia de pesos entre dos vectores miembros de la población a un tercer vector miembro. Si la aptitud del vector resultante es menor que el miembro de la población elegido entonces el nuevo vector reemplaza al vector con el cual fue comparado (Price *et al.*, 2005).

Las diferentes estrategias que pueden adoptarse en el algoritmo de ED dependen del tipo de problema al que se aplique. Las estrategias se basan en el vector a perturbar, el número de diferentes vectores considerados para la perturbación y finalmente el tipo de cruce a utilizar. Los siguientes son las doce estrategias diferentes propuestas por Price y Storn.

1 – – > $DE/rand/1/exp$	7 – – > $DE/rand/1/bin$
2 – – > $DE/best/1/exp$	8 – – > $DE/best/1/bin$
3 – – > $DE/rand - to - best/1/exp$	9 – – > $DE/rand - to - best/1/bin$
4 – – > $DE/best/2/exp$	10 – – > $DE/best/2/bin$
5 – – > $DE/rand/2/exp$	11 – – > $DE/rand/2/bin$
6 – – > $DE/current - to - rand/1/exp$	12 – – > $DE/current - to - rand/1/bin$

donde DE es Evolución Diferencial, el vector a perturbar puede ser el mejor vector de la generación anterior (best) o cualquier vector elegido aleatoriamente (rand), (1,2) es el número de vectores considerados para la perturbación y por último el tipo de cruce a ser utilizada (exp: exponencial; bin: binomial). La estrategia a adoptar para cada problema se determina de forma independiente mediante ensayo y error. De tal forma, una estrategia que funcione mejor para resolver un problema puede no trabajar bien cuando se aplica para otro problema distinto. El presente trabajo se

utilizó la estrategia 7 a través del código proporcionado por Dr. Irineo L. López Cruz . Systems and Control Group, Wageningen University The Netherlands. University of Chapingo, México ilopez@correo.chapingo.mx ver anexo (Programa para calibrar los parámetros del modelo de clima).

4.7.1. Validación del modelo

La validación del modelo se hizo con datos colectados del 4 al 11 de octubre de 2007, que es un conjunto de datos diferentes a los que se utilizaron en la calibración, que fueron datos del 1 al 3 de octubre de 2007.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

5.1. CALIBRACIÓN DEL MODELO

El modelo se implementó en una MEX-FUNCTION y se llama a través de un bloque de SIMULINK. Para comparar el modelo computacional con los datos, en el proceso de calibración se tomaron datos del 1 al 3 de octubre de 2007 con los cuales se calibró el modelo de temperatura, humedad y CO₂. La Figura 5.1 muestra las variables exteriores e interiores utilizadas para calibrar el modelo del clima.

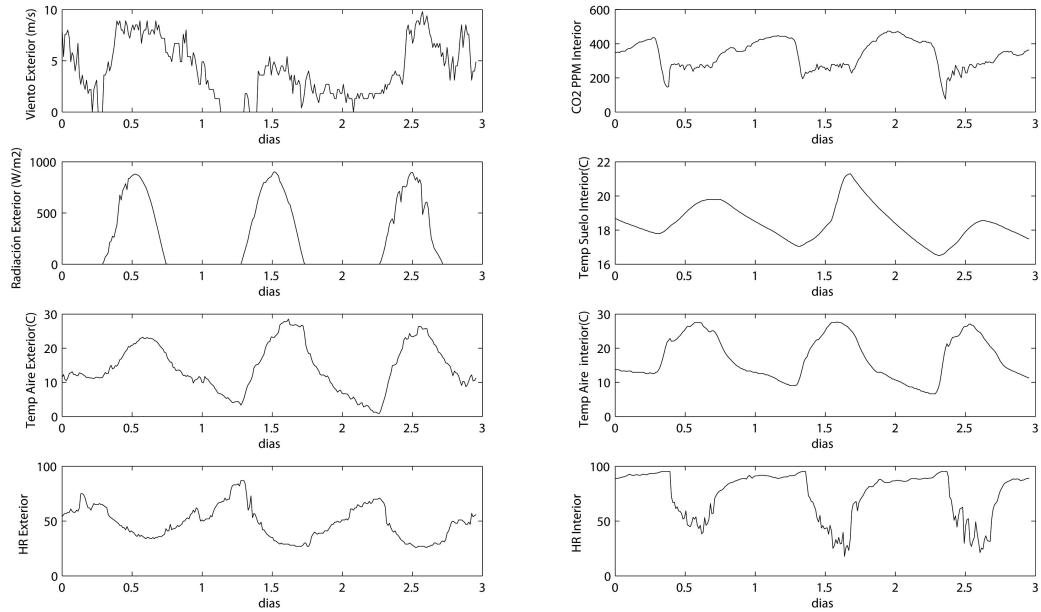


Figura 5.1: Registro de las variables meteorológicas utilizadas para calibrar el modelo del clima(Octubre 2007)

En el cuadro 5.1 se muestran el resultado del proceso de estimación a través de evolución diferencial para los parámetros y el valor de los mismos.

Cuadro 5.1: Valores de los parámetros estimados del modelo de clima.

Parámetro	Descripción	Valor
τ_{inv}	Transmisividad de la cubierta del invernadero	0.65
η_{Ia}	Coeficiente de transmisión de radiación de onda corta	1.0
τ_{cb}	Coeficiente de absorción de radiación de onda corta	0.30
C_w	Coeficiente empírico por efecto del viento	0.303
C_d	Coeficiente empírico de descarga	0.0917
Q_{a-e}	Coeficiente de transferencia por convección entre el aire exterior e interior	6.659
Q_{vent}	Transferencia de calor por ventilación e infiltración	0.0042
$CapCalorMasa$	Capacidad de absorción del invernadero	350000
$Coef_{AbsMasa}$	Coeficiente de absorción de masa térmica	0.15
$Coef_{CnvMasaAire}$	Coef. convección de calor de masa térmica	1.86
$Coef_{CndMasaSuelo}$	Coef. conducción de calor de masa térmica	0.85
T_{ref}	Temperatura referencia de la masa térmica	283.15
$Prof_{Ref}$	Profundidad de referencia de la masa térmica	1.5

En la Figura 5.2 se muestran los valores medidos y los simulados después de la calibración del modelo. Como se puede apreciar la temperatura del aire es simulado de manera adecuada por el modelo. El contenido de humedad del aire y CO₂ aunque es simulado de manera adecuada muestra algunas discrepancias con los valores medidos en algunos periodos del día. En el caso del CO₂ los errores se presentan durante la apertura y cierre de ventanas, y por la noche sigue una tendencia marcada.

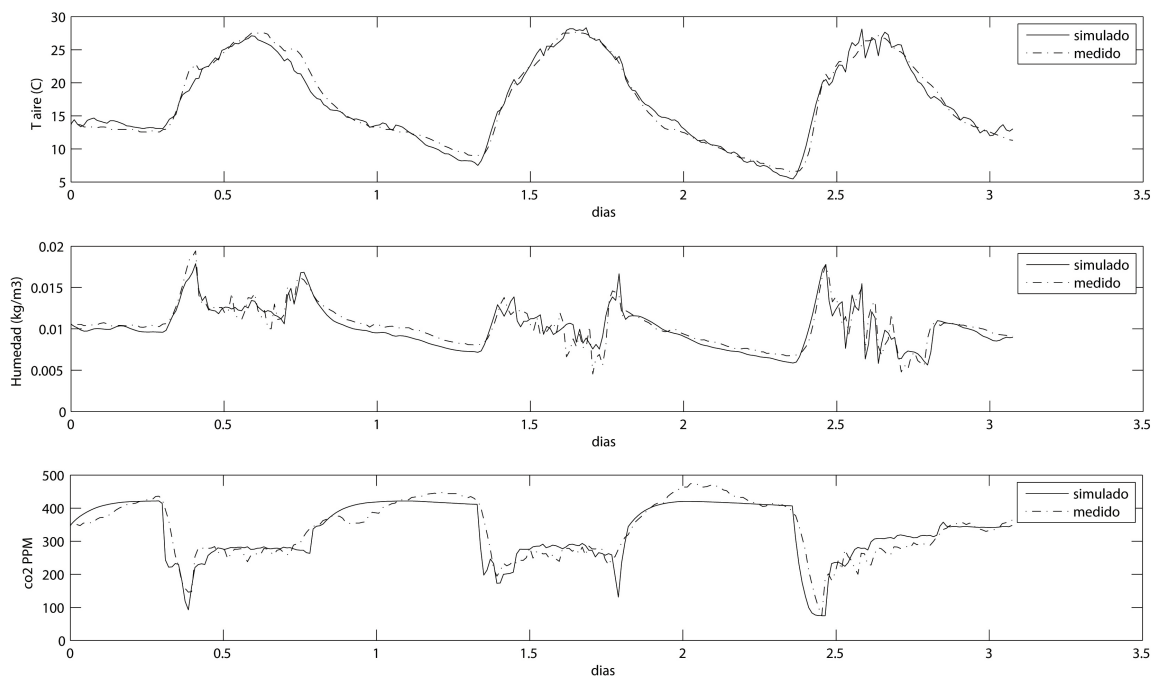


Figura 5.2: Resultados de simulación de temperatura humedad y CO₂.

En el cuadro 5.2 se muestran las ecuaciones de regresión con los valores de r^2 y RMSE de la calibración del modelo.

Cuadro 5.2: Ecuaciones y estadísticas de regresión obtenidas en la calibración del modelo (1 al 3 de octubre de 2007) en el interior del invernadero.

	Ecuación de regresión	r^2	RMSE
Temperatura	$y = 1.24x - 68.23$	0.9553	1.317 (K)
Humedad	$y = 0.8874x + 0.0009402$	0.7661	0.001212 (kg m ⁻³)
CO ₂	$y = 0.9158x + 0.0000437$	0.8002	0.000069 (kg m ⁻³)

En las Figuras 5.3, 5.4 y 5.5 se muestran relación entre las variables medidas y las simuladas durante la calibración del modelo del clima.

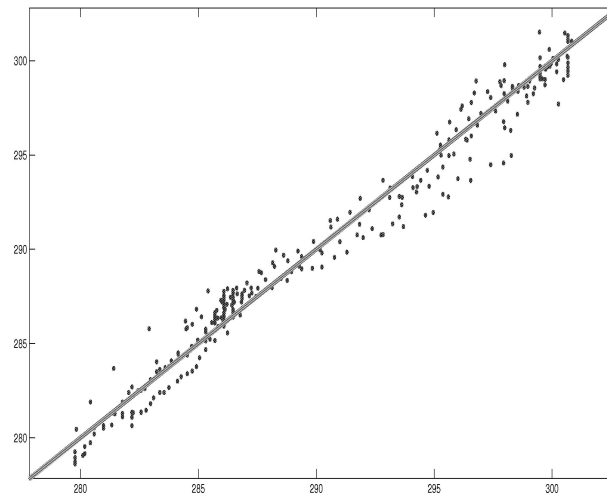


Figura 5.3: Gráfica de relación entre la temperatura medida y simulada en la de calibración del modelo.

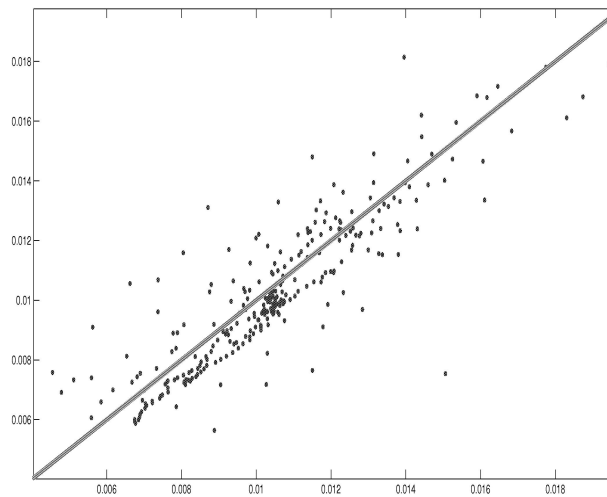


Figura 5.4: Gráfica de relación entre la humedad medida y simulada en la de calibración del modelo.

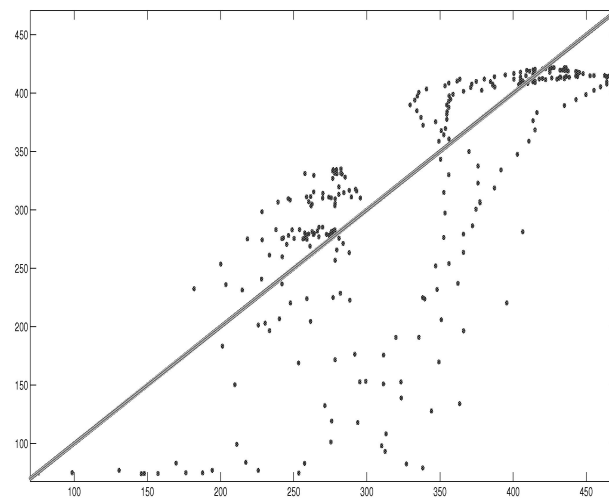


Figura 5.5: Gráfica de relación entre el CO₂ medido y simulado en la de calibración del modelo.

5.2. VALIDACIÓN DEL MODELO

El modelo se validó con datos independientes para los días 4 al 11 de octubre de 2007. En la Figura 5.6 se muestran los resultados obtenidos para 7 días consecutivos.

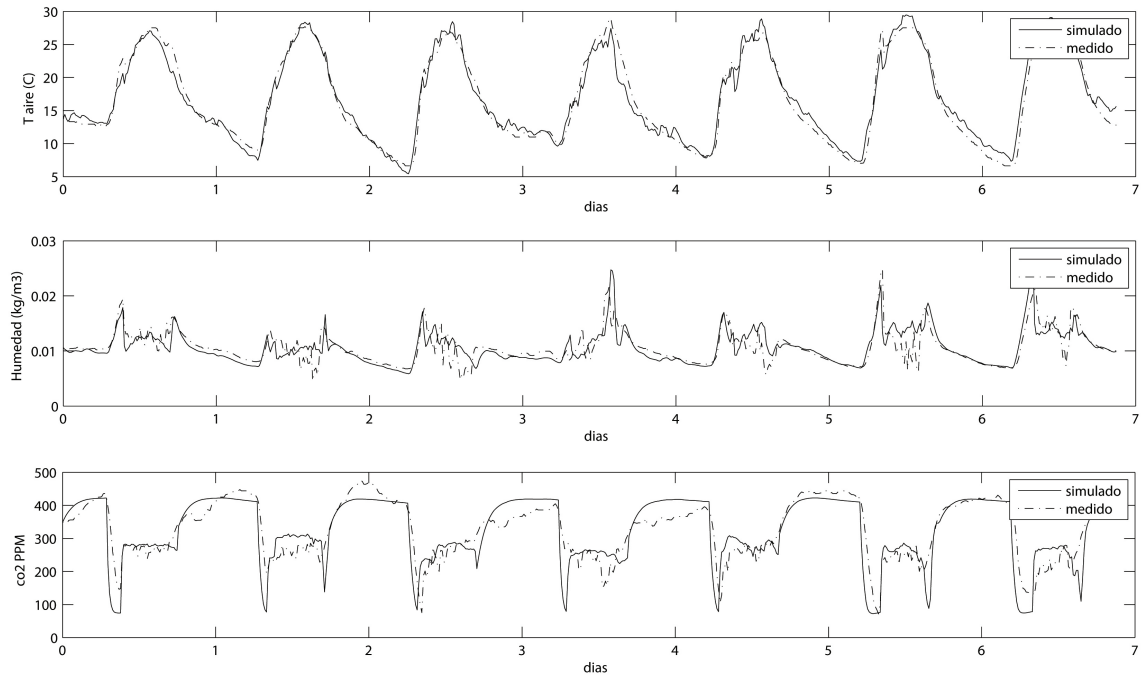


Figura 5.6: Clima interior del invernadero simulados y medidos para los días 4 al 11 de octubre de 2007.

En el cuadro 5.3 se muestran las ecuaciones de regresión con los valores de r^2 y RMSE de la validación del modelo.

Cuadro 5.3: Ecuaciones y estadísticas de regresión obtenidas en la validación del modelo (4 al 11 de octubre de 2007) en el interior del invernadero.

	Ecuación de regresión	r^2	RMSE
Temperatura	$y = 1.203x - 57.35$	0.9509	1.413(K)
Humedad	$y = 0.6548x + 0.003473$	0.5055	0.001903(kg m ⁻³)
CO ₂	$y = 0.941x + 0.0000313$	0.6931	0.000099(kg m ⁻³)

En las Figuras 6.1, 5.8 y 5.9 se muestran relación entre las variables medidas y las simuladas durante la validación del modelo del clima.

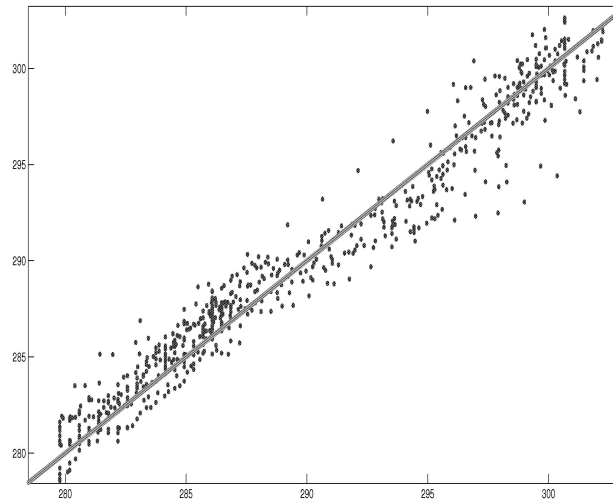


Figura 5.7: Gráfica de relación entre la temperatura medida y simulada en la de validación del modelo.

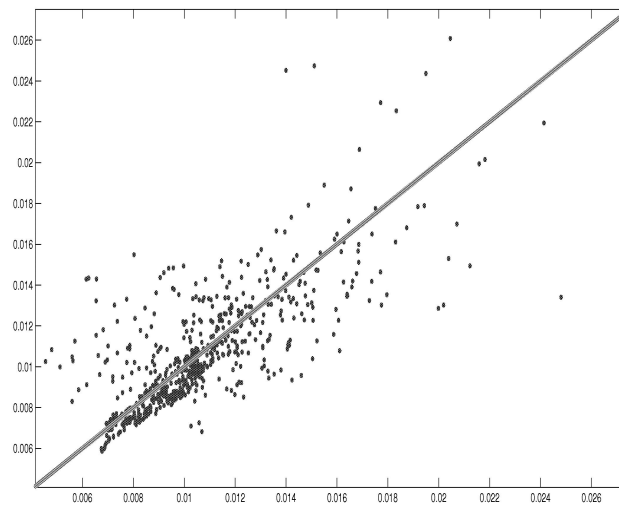


Figura 5.8: Gráfica de relación entre la humedad medida y simulada en la de validación del modelo.

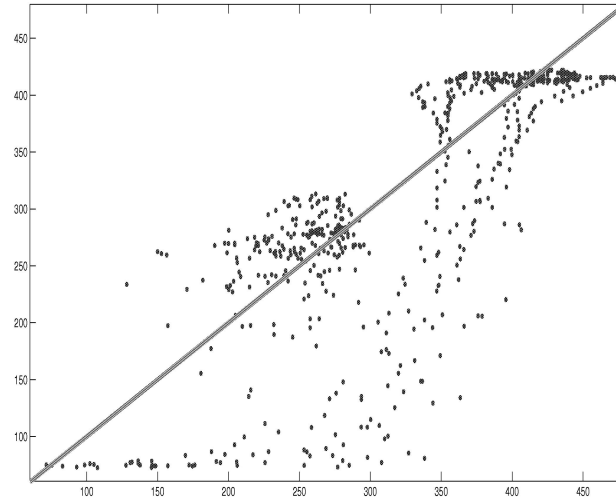


Figura 5.9: Gráfica de relación entre el CO₂ medido y simulado en la de validación del modelo.

5.3. INTEGRACIÓN DEL MODELO DE CLIMA CON EL MODELO DEL CULTIVO

Una vez calibrado y validado el modelo del clima se integró con el modelo de crecimiento de tomate TOMGRO para esto las salidas temperatura, humedad y CO_2 son parte de la entrada para el crecimiento y el LAI, peso de frutos y peso seco total forman parte de las entradas para el clima, las simulaciones se realizaron para 165 días, del 8 de agosto de 2007 al 17 de enero de 2008. Los resultados obtenidos se muestran en la Figuras 5.10, 5.10 y 5.12. A pesar de carecer de observaciones contra los cuales se deban comparar las predicciones, las simulaciones son aceptables considerando las variables del modelo del cultivo.

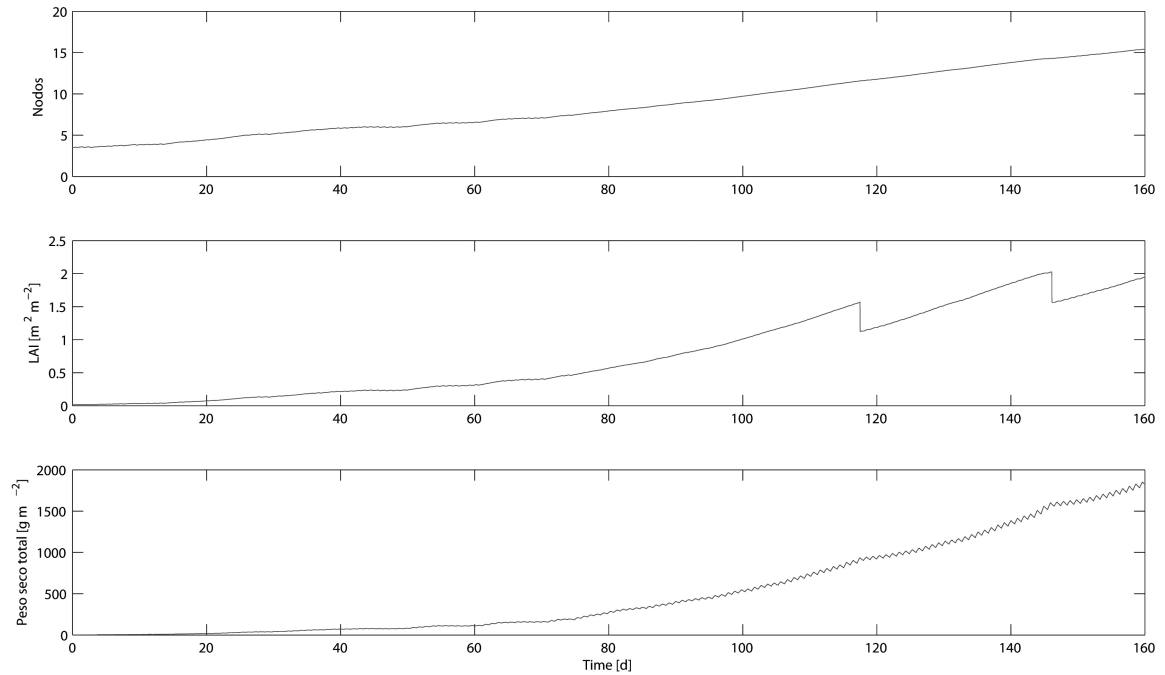


Figura 5.10: Graficas del modelo de crecimiento acoplado con el clima: Número de nodos, LAI y peso seco total.

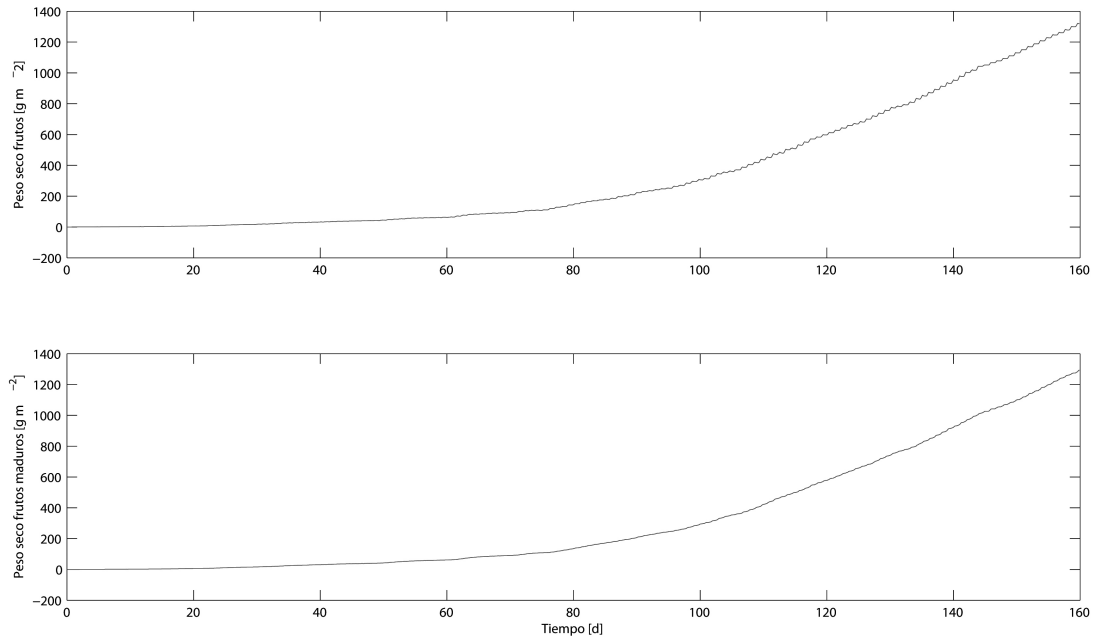


Figura 5.11: Graficas del modelo de crecimiento acoplado con el clima: Peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros.

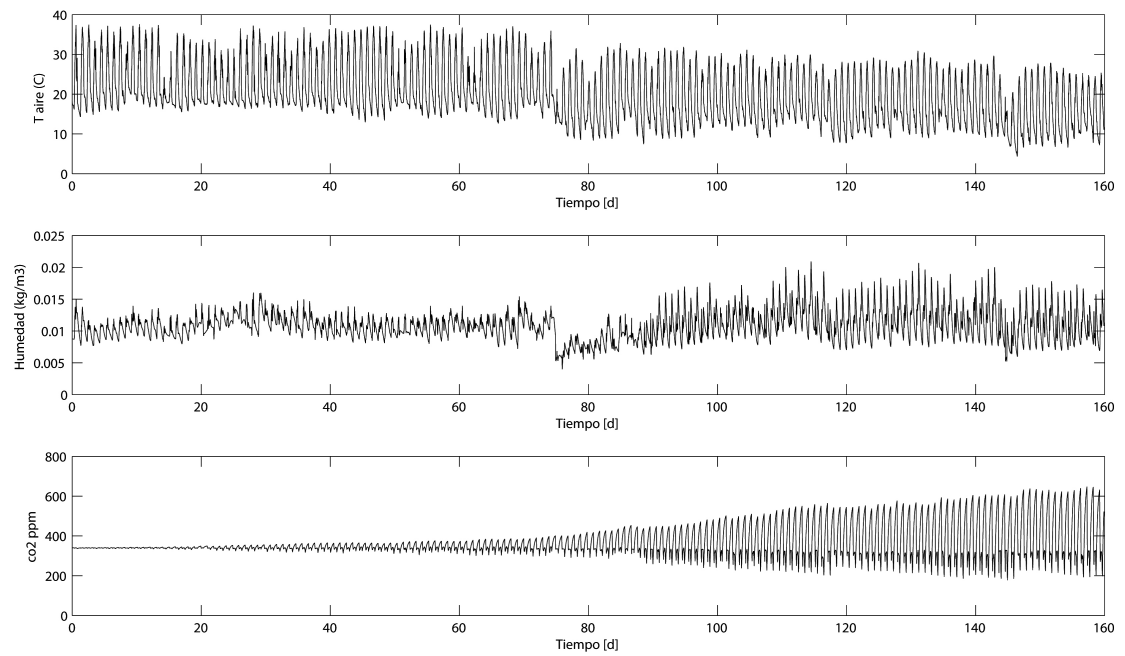


Figura 5.12: Graficas del clima (temperatura, humedad y CO₂) acoplado con el modelo de crecimiento.

5.4. DIFERENTES ESTRATEGIAS DE INYECCIÓN DE CO₂

Para estudiar el comportamiento de la concentración de CO₂ dentro del invernadero se proponen diferentes periodos, y concentraciones de CO₂ a inyectar, de la siguiente manera:

Escenario No 1: Se inyecta CO₂ en los periodos 8:00 a 10:00 de la mañana y por la tarde de las 4:00 a las 5:30, **para todo el ciclo**, se tomó como base la tasa máxima de inyección, realizando la inyección de la siguiente forma 0 ppm que corresponde al 0% o válvula de inyección totalmente cerrada, 7 ppm m⁻² s⁻¹ que corresponde al 25%, 14 ppm m⁻² s⁻¹ que corresponde al 50%, 20 ppm m⁻² s⁻¹ que corresponde al 75% y 27 ppm m⁻² que corresponde al 100% o válvula de inyección totalmente abierta. Obteniendo los resultados mostrados en la Figura 5.13.

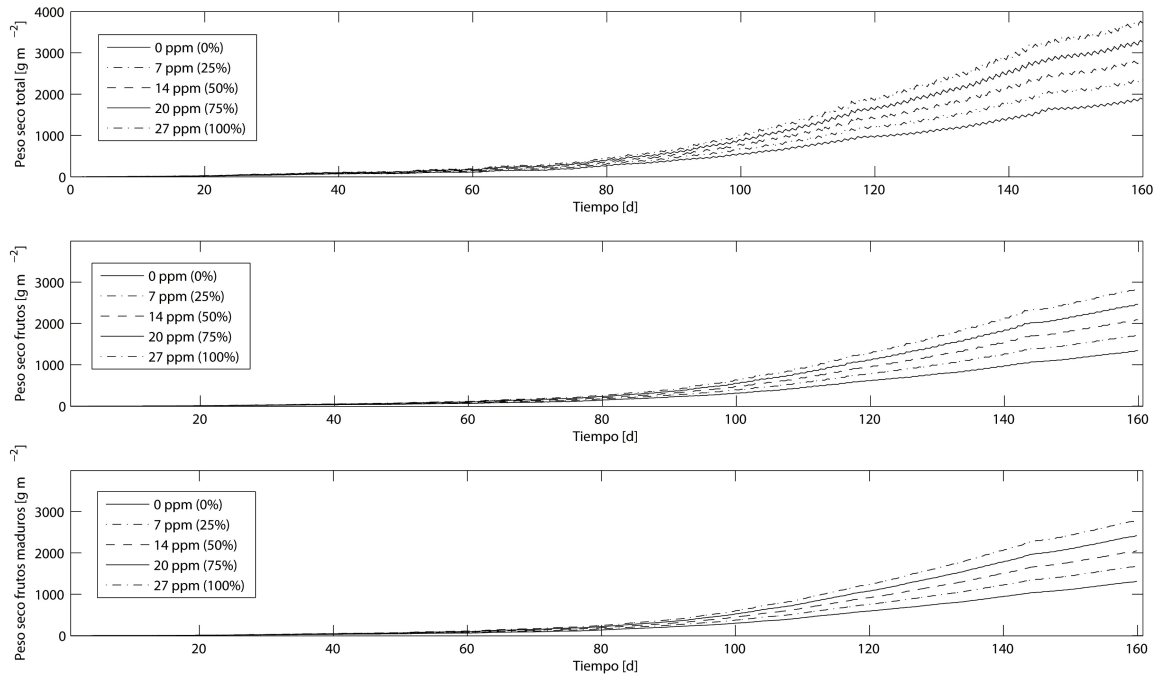


Figura 5.13: Peso seco total, peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros con diferentes tasas de inyección para todo el ciclo.

En cuanto al comportamiento del CO_2 se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 5.14.

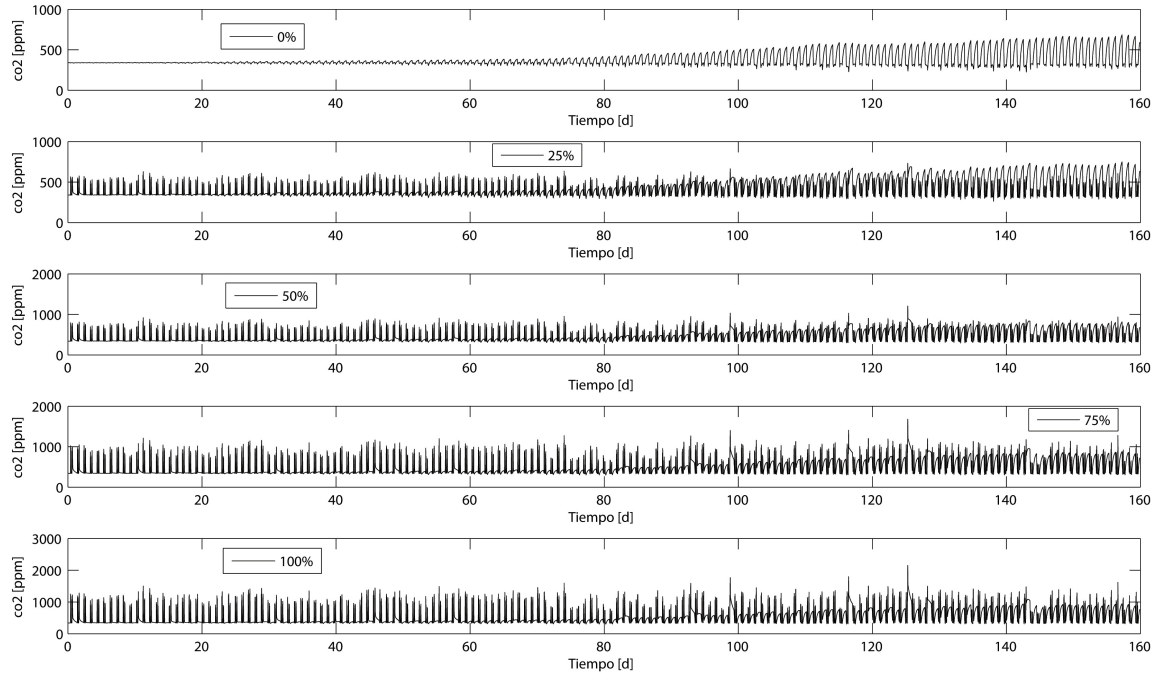


Figura 5.14: Grafica de comportamiento de CO_2 para diferentes tasas de inyección para todo el ciclo.

Cuadro 5.4: Valores máximos del modelo para enriquecimiento en todo el ciclo

Parámetro	0 ppm 0 %.	7 ppm 25 %	14 ppm 50 %	20 ppm 75 %	27 ppm 100 %	Unidades
Peso seco total	1613	2300	3350	4400	5450	g m^{-2}
Peso seco de frutos	1246	1694	2378	3063	3747	g m^{-2}
Peso seco de frutos maduros	1227	1669	2346	3023	3700	g m^{-2}
CO ₂	549	1662	2889	4416	5542	ppm

El Cuadro 5.4 muestra los valores máximos de las variables de estado del modelo de crecimiento del cultivo para enriquecimiento en todo el ciclo. Se puede observar que se incrementa el peso seco total, el peso seco de los frutos y peso seco de frutos maduros en mas de 200 % al inyectar en un 100 % con respecto al que no se le inyecta, no así el índice de área foliar y el número de nodos, también podemos observar que a partir de 60 días la tasa de fotosíntesis aumenta disminuyendo con esto la concentración de CO₂ dentro del invernadero, pero se pueden esperar grandes pérdidas de CO₂ ya que se observa una concentración de más de 5500 ppm cuando se inyecta al 100 %.

Escenario No 2: Se inyecta CO_2 en los periodos 8:00 a 10:00 de la mañana y por la tarde de las 4:00 a las 5:30, **comenzando después de 30 días**, se tomó como base la tasa máxima de inyección, realizando la inyección de la siguiente forma 0 ppm que corresponde al 0 % o válvula de inyección o totalmente cerrada, 7 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 25 %, 14 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 50 %, 20 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 75 % y 27 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 100 % o válvula de inyección totalmente abierta. Obteniendo los resultados mostrados en la Figura 5.15.

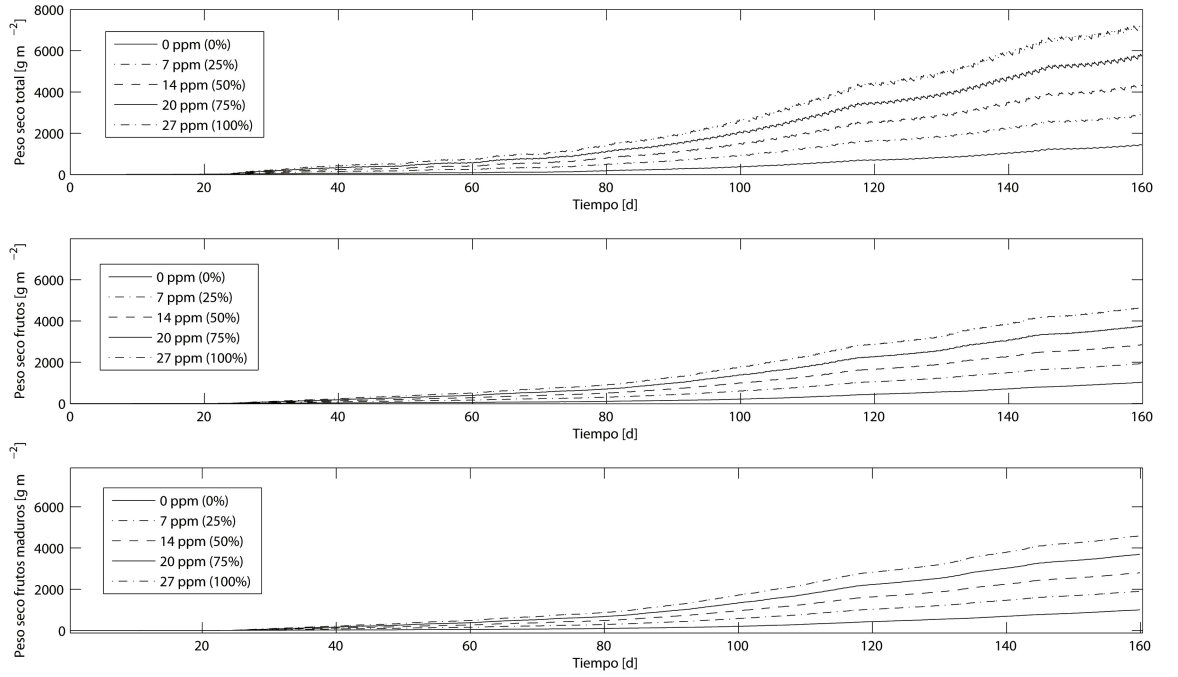


Figura 5.15: Peso seco total, peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros con diferentes tasas de inyección después de 30 días.

En cuanto al comportamiento del CO_2 se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 5.16.

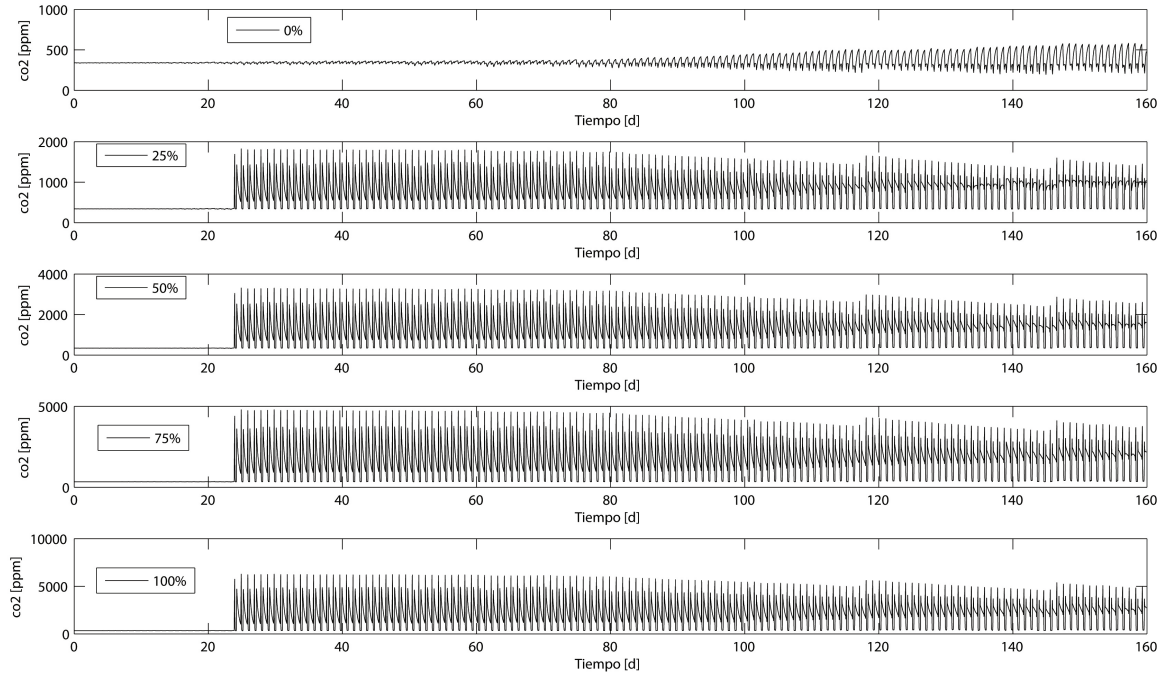


Figura 5.16: Grafica de comportamiento de CO_2 para diferentes tasas de inyección después de 30 días

Cuadro 5.5: Valores máximos del modelo para enriquecimiento después de 30 días

Parámetro	0 ppm 0 %.	7 ppm 25 %	14 ppm 50 %	20 ppm 75 %	27 ppm 100 %	Unidades
Peso seco total	1613	2288	327	4365	5404	g m^{-2}
Peso seco de frutos	1246	1683	2358	3032	3705	g m^{-2}
Peso seco de frutos maduros	1227	1659	2326	2992	3658	g m^{-2}
CO ₂	549	1486	2587	3789	5090	ppm

El Cuadro 5.5 muestra los valores máximos de las variables de estado del modelo de crecimiento del cultivo para enriquecimiento después de 30 días. Se puede observar que se incrementa el peso seco total, el peso seco de los frutos y peso seco de frutos maduros en más de 200 % al inyectar en un 100 % con respecto al que no se le inyecta, con respecto al anterior escenario inyectado a un 100 % se observa que disminuye en un 3 % el peso total de frutos maduros que es de interés, también se observa que la concentración máxima de CO₂ dentro del invernadero disminuye en un 15 %, pero aún se observan concentraciones muy elevadas lo cual indica que no se está aprovechando todo el CO₂ que se inyecta.

Escenario No 3: Se inyecta CO_2 en los periodos 8:00 a 10:00 de la mañana y por la tarde de las 4:00 a las 5:30, **comenzando después de 60 días**, se tomó como base la tasa máxima de inyección, realizando la inyección de la siguiente forma 0 ppm que corresponde al 0% o válvula de inyección o totalmente cerrada, 7 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 25 %, 14 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 50 %, 20 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 75 % y 27 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 100 % o válvula de inyección totalmente abierta. Obteniendo los resultados mostrados en la Figura 5.17.

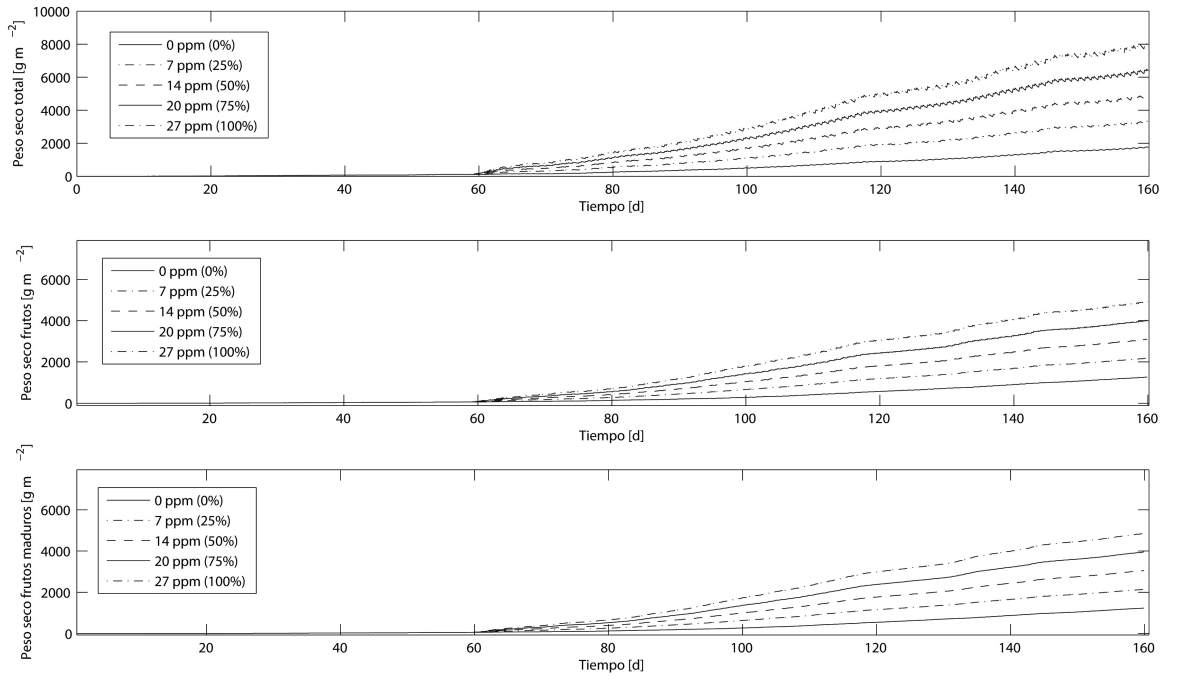


Figura 5.17: Peso seco total, peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros con diferentes tasas de inyección después de 60 días.

En cuanto al comportamiento del CO_2 se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 5.18.

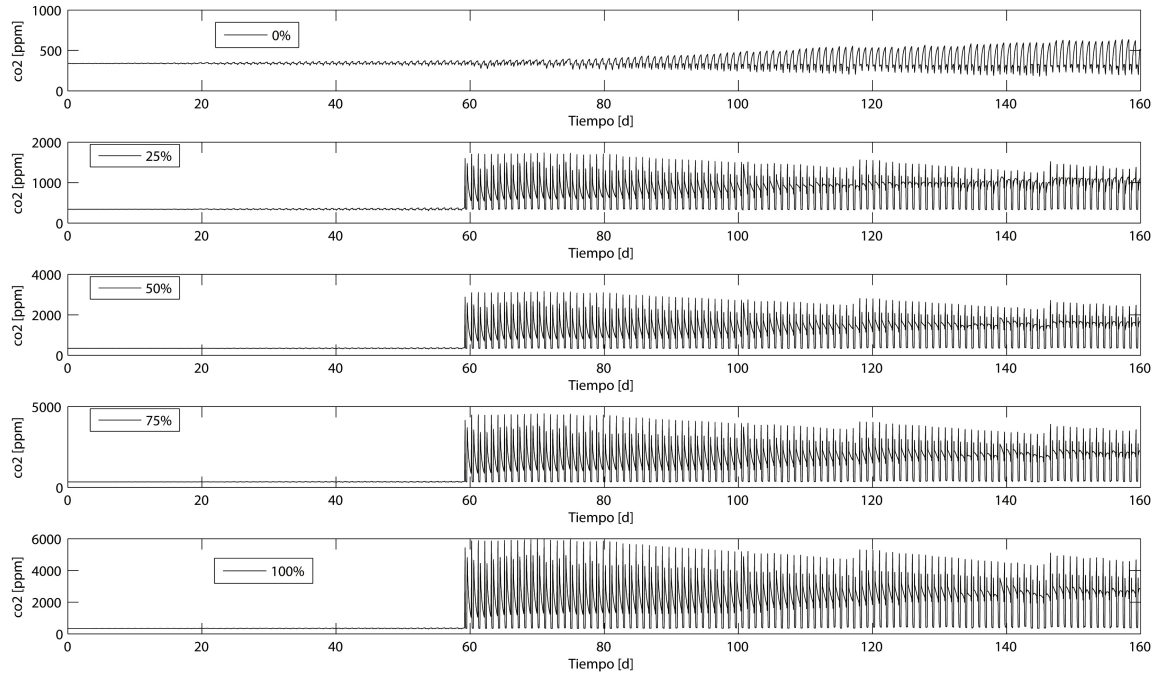


Figura 5.18: Grafica de comportamiento de CO_2 para diferentes tasas de inyección después de 60 días.

Cuadro 5.6: Valores máximos del modelo para enriquecimiento después de 60 días.

Parámetro	0 ppm 0 %.	7 ppm 25 %	14 ppm 50 %	20 ppm 75 %	27 ppm 100 %	Unidades
Peso seco total	1613	2228	3206	4184	5162	g m^{-2}
Peso seco de frutos	1246	1634	2260	2885	3509	g m^{-2}
Peso seco de frutos maduros	1227	1610	2228	2945	3462	g m^{-2}
CO ₂	549	1333	2433	3533	4633	ppm

El Cuadro 5.6 muestra los valores máximos de las variables de estado del modelo de crecimiento del cultivo para enriquecimiento después de 60 días. Se puede observar que se incrementa el peso seco total, el peso seco de los frutos y peso seco de frutos maduros en más de 200 % al inyectar en un 100 % con respecto al que no se le inyecta, con respecto al primer escenario e inyectando a un 100 % se observa que disminuye en un 8 % el peso total de frutos maduros que es de interés, también se observa que la concentración máxima de CO₂ dentro del invernadero disminuye en un 40 %, pero aún se observan concentraciones elevadas lo cual indica que se pierde una buena parte del CO₂ que se inyecta.

Escenario No 4: Se inyecta CO_2 en los periodos 8:00 a 10:00 de la mañana y por la tarde de las 4:00 a las 5:30, **comenzando después de 75 días**, se tomó como base la tasa máxima de inyección, realizando la inyección de la siguiente forma 0 ppm que corresponde al 0% o válvula de inyección o totalmente cerrada, 7 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 25%, 14 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 50%, 20 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 75% y 27 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 100% o válvula de inyección totalmente abierta. Obteniendo los resultados mostrados en la Figura 5.19.

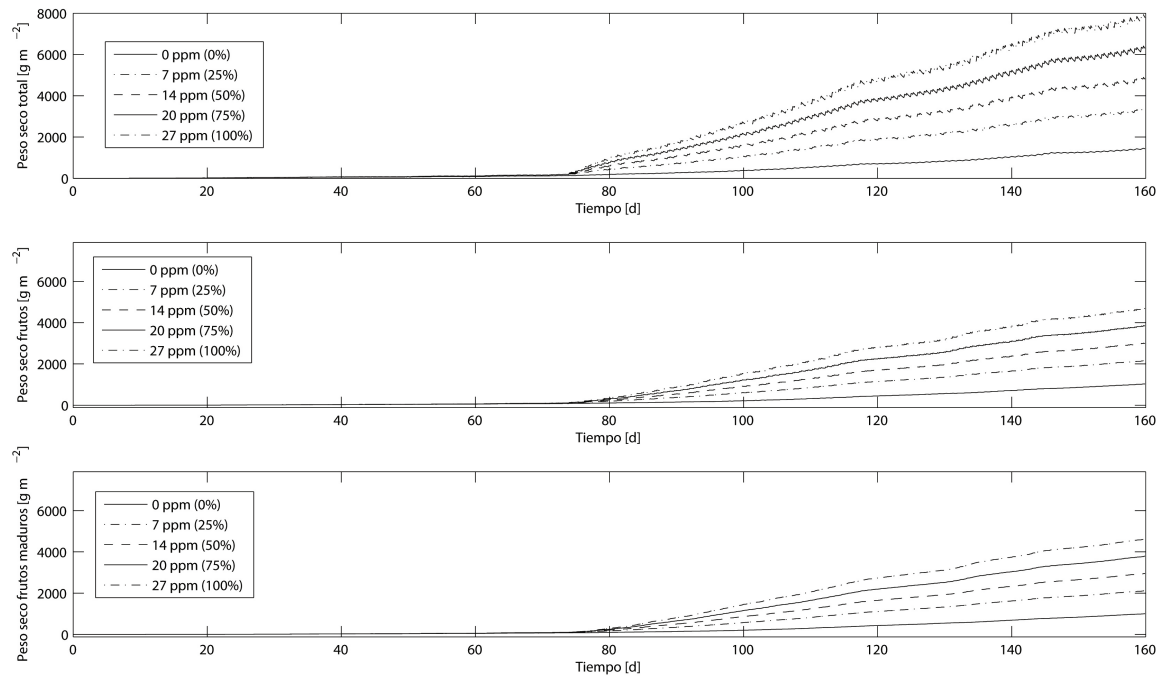


Figura 5.19: Peso seco total, peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros con diferentes tasas de inyección después de 75 días.

En cuanto al comportamiento del CO_2 se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 5.20.

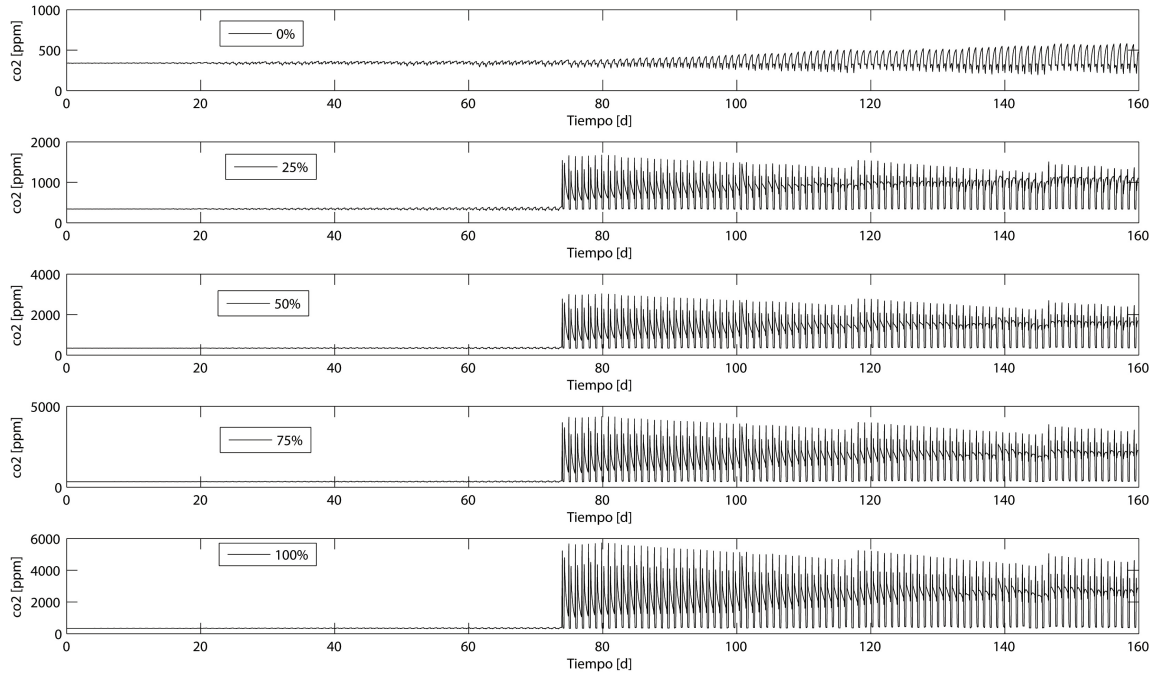


Figura 5.20: Grafica de comportamiento de CO_2 para diferentes tasas de inyección después de 75 días.

Cuadro 5.7: Valores máximos del modelo para enriquecimiento después de 75 días.

Parámetro	0 ppm 0 %.	7 ppm 25 %	14 ppm 50 %	20 ppm 75 %	27 ppm 100 %	Unidades
Peso seco total	1613	2513	3584	4655	5726	g m^{-2}
Peso seco de frutos	1246	1833	2510	3187	3864	g m^{-2}
Peso seco de frutos maduros	1227	1508	2077	2847	3416	g m^{-2}
CO ₂	549	1042	1794	2345	3322	ppm

El Cuadro 5.7 muestra los valores máximos de las variables de estado del modelo de crecimiento del cultivo para enriquecimiento después de 75 días. Se puede observar que se incrementa el peso seco total, el peso seco de los frutos y peso seco de frutos maduros en más de 200 % al inyectar en un 100 % con respecto al que no se le inyecta, con respecto al primer escenario e inyectando a un 100 % se observa que disminuye en un 7 % el peso total de frutos maduros que es de interés, también se observa que la concentración máxima de CO₂ dentro del invernadero disminuye en un 40 %, pero aún se observan concentraciones poco elevadas lo cual indica que no se aprovechando una parte del CO₂ que se inyecta.

Escenario No 5: Se inyecta CO_2 en los periodos 8:00 a 10:00 de la mañana y por la tarde de las 4:00 a las 5:30, **comenzando después de 90 días**, se tomó como base la tasa máxima de inyección, realizando la inyección de la siguiente forma 0 ppm que corresponde al 0% o válvula de inyección o totalmente cerrada, 7 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 25 %, 14 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 50 %, 20 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 75 % y 27 ppm $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ que corresponde al 100 % o válvula de inyección totalmente abierta. Obteniendo los resultados mostrados en la Figura 5.21.

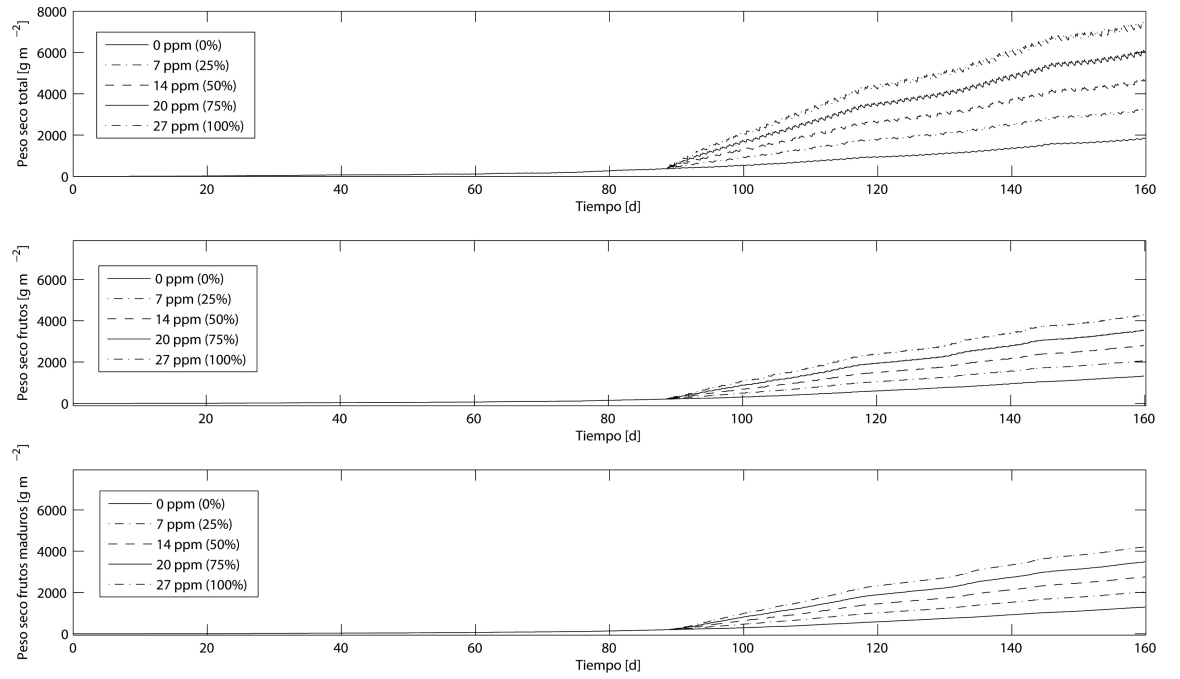


Figura 5.21: Peso seco total, peso seco de frutos y peso seco de frutos maduros con diferentes tasas de inyección después de 90 días.

En cuanto al comportamiento del CO_2 se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 5.22.

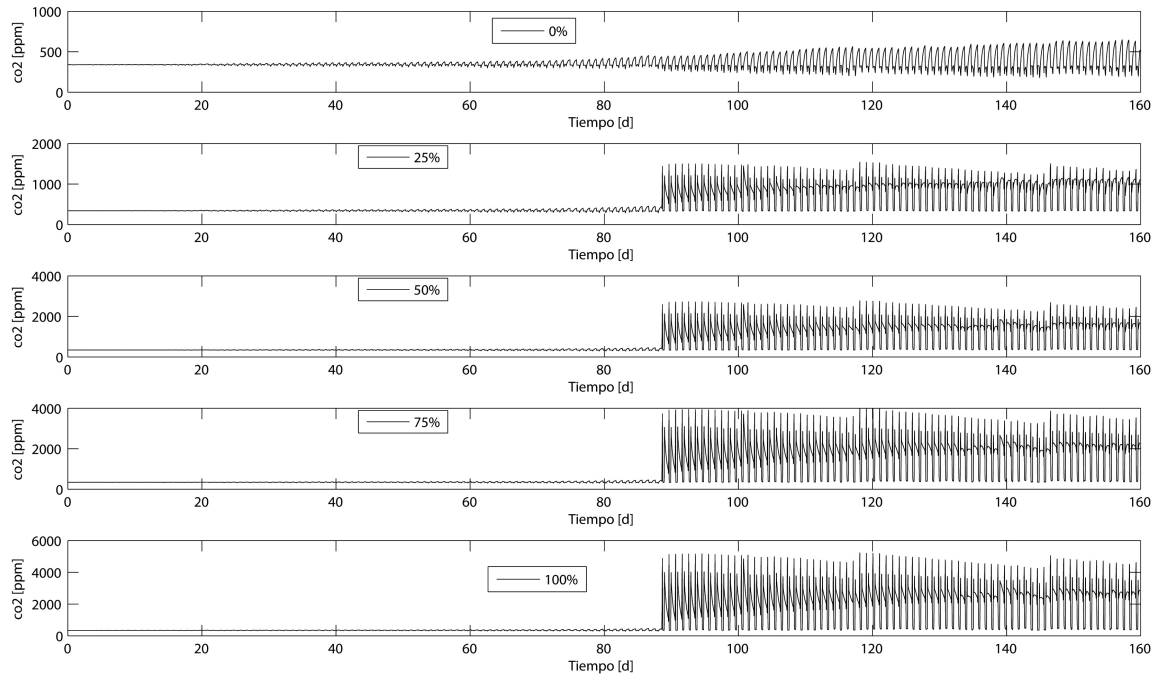


Figura 5.22: Grafica de comportamiento de CO_2 para diferentes tasas de inyección después de 90 días.

Cuadro 5.8: Valores máximos del modelo para enriquecimiento después de 90 días.

Parámetro	0 ppm 0 %.	7 ppm 25 %	14 ppm 50 %	20 ppm 75 %	27 ppm 100 %	Unidades
Peso seco total	1613	2147	2929	3111	3993	g m^{-2}
Peso seco de frutos	1246	1521	2068	2414	2845	g m^{-2}
Peso seco de frutos maduros	1227	1396	1834	2072	2910	g m^{-2}
CO ₂	549	1116	2064	2712	3661	ppm

El Cuadro 5.8 muestra los valores máximos de las variables de estado del modelo de crecimiento del cultivo para enriquecimiento después de 75 días. Se puede observar que se incrementa el peso seco total, el peso seco de los frutos y peso seco de frutos maduros en más de 180 % al inyectar en un 100 % con respecto al que no se le inyecta, con respecto al primer escenario e inyectando a un 100 % se observa que disminuye en un 17 % el peso total de frutos maduros que es de interés, también se observa que la concentración máxima de CO₂ dentro del invernadero disminuye en un 58 %, pero aún se observan concentraciones elevadas lo cual indica que no se aprovecha una buena parte del CO₂ que se inyecta.

Las comparaciones en el peso seco de frutos maduros en las diferentes tasas de inyección para el 25 %, 50 % y 75 % se muestra en el cuadro 5.9.

Cuadro 5.9: Valores de peso seco de frutos maduros con las diferentes estrategias de inyección.

Estrategia	7 ppm 25 %	14 ppm 50 %	20 ppm 75 %
Para todo el ciclo	1669	2346	3023
Después de 30 días	1659	2326	2992
Después de 60 días	1610	2228	2945
Después de 75 días	1508	2077	2847
Después de 90 días	1396	1834	2072

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Se desarrollo un modelo dinámico del clima del invernadero en función de las variables climáticas externas, las características del invernadero y prácticas de manejo, el cual simula de manera aceptable para propósitos de control la temperatura del aire, el contenido de humedad y el contenido de CO₂.

El modelo del cultivo de tomate TOMGRO reducido se integró al modelo del clima lo que permite estudiar diferentes estrategias de inyección de CO₂ y su efecto sobre el rendimiento de materia seca total de frutos.

Al estudiar los diferentes escenarios de inyección de CO₂ tomando como base 0% de inyección se encontró que en todos se aumenta el peso seco de frutos, no cambiando el número de nodos y el LAI, los máximos rendimientos se obtuvieron inyectando durante todo el ciclo pero también se tiene las mayos concentraciones de CO₂ el cual se pierde por la ventilación, para el escenario donde se inyecta a partir del día 90 se observan menores incrementos.

Inspeccionando las gráficas de concentración de CO₂ y peso seco de frutos maduros en los diferentes escenarios, comparando entre escenarios y entre concentración de inyección dentro del mismo escenario se observa: Las inyecciones de 25 % y 50 % presentan mejores aprovechamientos de CO₂ e inyectando a partir del día 75 tenemos los mejores rendimientos del cultivo.

Se necesita realizar un experimento para validar los resultados del presente trabajo, para tal efecto es de vital importancia contar con un invernadero donde se puedan realizar mediciones del clima y del cultivo.

El modelo desarrollado es una herramienta útil para el estudio de diferentes estrategias del manejo integrado del clima en el cultivo de tomate para la región centro de México.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Azcon-bieto J.; Talon M. (1993). Fisiología y bioquímica vegetal. Interamericana McGraw-hill, Madrid España. 135-146 pp.
- [2] Bot G. P. A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. PhD thesis, Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 240 p.
- [3] Bot G.P.A.; Van De Braak. (1995). Physics of greenhouse climate. En: Greenhouse climate control. 125-160.
- [4] Boulard T. (1993). Etude expérimentale et modelisation de l'aération naturelle des serres. Recapitulatif des résultats des études conduites de 1988 a 1992 [Experimental and modelling study on greenhouse natural ventilation: recapitulative of 1988-1992 experiments] Note interne I.N.R.A. 93-1, station de bioclimatologie de Monthavet, France.
- [5] Chalabi Z.S.; Biro A. ; Bailey B. J.; Aikman D.P.; Cockshull K.E. (2002). Optimal Control Strategies for Carbon Dioxide Enrichment in Greenhouse Tomato Crop- Part 1: Using Pure Carbon Dioxide. Silsoe research Institute. UK.
- [6] Chalabi Z.S.; Biro A.; Bailey B. J.; Aikman D.P.; Cockshull K.E. (2002). Optimal Control Strategies for Carbon Dioxide Enrichment in Greenhouse Tomato Crop- Part 2: Using the Exhaust of Natural Gas Fires Boilers. Silsoe research Institute. UK.
- [7] Corvalan C. (1997). El sistema invernadero. Empresa y Avance Agrícola 19: 8-10.

- [8] Gevers M. (1991). Connecting identification and robust control: a new challenge. In: 9th IFAC Symposium on Identification and System Parameter Estimation. Budapest.
- [9] Marí J. Estrela; Millón. (1994). Manual práctico de introducción a la meteorología. CEAM (Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo). Madrid, Esp. 23-25 pp.
- [10] Meyer B. S.; Anderson D. B.; Böhning R. H. (1976) Introducción a la fisiología vegetal. Editorial universitaria de buenos aires, Buenos Aires Argentina. 80-106 pp.
- [11] Jong, T. (1990). Natural ventilation of large multi-span greenhouses. PhD thesis. Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- [12] Jones J. W.; Dayan E.; Allen L.H.; van Keulen, H. (1991). A dynamic tomato growth and yield model (Tomgro). *Transactions of ASAE* 34:663-672.
- [13] Jones J. W.; Kenig A.; Vallejos C.E. (1999). reduce state-variable tomato growth model. *Transactions of ASAE* 42:255-265.
- [14] Kittas C.; Boulard T.; Papadakis G. (1997). Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings: sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the ASAE*, 40(2), 415-425
- [15] Price K. V.; Storn R.; Lampinen J.; Differential Evolution - A Practical Approach to Global Optimization, Springer, Berlin, 2005.
- [16] Roy J. C.; Boulard T.; Kittas C.; Wang S. (2002). Convective and ventilation transfer in Greenhouse part 1: The greenhouse considered as a perfectly stirred tank. Silsoe Research Institute. Published by Elsevier Science Ltd.
- [17] Sirovich, L. (1991). Empirical eigenfunctions and low-dimensional systems. In: New Perspective in Turbulence (L. Sirovich, Ed.). Springer - Verlag

- [18] Sanchez-guerrero M. C. (1999). Enriquecimiento carbónico en cultivos hortícola bajo invernadero de polietileno. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. 266 p.
- [19] Sanchez-guerrero M. C.; Lorenzo P.; Medrano E.;Castilla N.; Soriano T.; Baile A. (2005). Effect of variable CO₂ enrichment on greenhouse production in mild climates Elsevier B.V. Agricultural and Forest Meteorology.
- [20] Tremblay N.; Gosselin A. (1998). Effect of Carbon Dioxide Enrichment and Light. HortTechnology, Canada.
- [21] Thornley J. H. M.; Johnson I. R. (1990). Plant and crop modeling(A mathematical approach to plant and crop physiology). Clarendon press. Oxford, New York, USA. 213-285 pp.
- [22] Walker J. G. C. (1994). Global Geochemical Cycles of Carbon. In: Tolbert, N. E. and J. Preiss (editors). Regulation of atmospheric CO₂ and O₂ by photosynthetic Carbon metabolism. Oxford University Press. pp 75-89.

ANEXOS

A. MODELO ACOPLADO CLIMA-CULTIVO

a.1 Programa principal (m. file)

```
celayatomgro.m
Time=[0 : 200 : 163 * 4 * 200 * 24 - 200]';
EjeX=(7/(135)*Time)/1000;
%Parametros del modelo:
T0 = 273.15; % Para convertir grados celsius a Kelvin
msnm = 1650; % [m] Altitud de celaya
PAtm = 101325; % Pa
leerdatos;
Vgrh = 9900; % Volumen del invernadero
Asuelo = 1890; % Area del suelo del invernadero
Hvent = 2.65;
ROaire = 1.204; % Densidad del aire
CPaire = 1000; % Calor especifico del aire
CONSTpsi = 66.1; % Constante psicometrica, 66.1 Pa grad
CalorLat = 2450000; %
rb = 190;
CPSuelo = 1286790; % Valor propuesto, no calibrado
tasamaxco2=5*10^(-5) *Asuelo; %tasa maxima de flujo de co2
conextco2=340*1.83*1e-6 ; %concentracion exterior de co2
TRANSinv = 0.63;
Coef_AbsRad = 0.96;
Coef_RnCrop = 0.45;
Cw = 0.263;
Cd = 0.0986;
Coef_Q_a_e = 20.72;
Coef_inflt = 0.00085;
CapCalorMasa = 500000;
Coef_AbsMasa = 0.01;
Coef_CndMasaAire = 13.299;
Coef_CndMasaSuelo = 0.5;
Tref = 288.937;
Prof_Ref = 1.5;
Nm=0.00039583/60; %Tasa max de nodos
p1=2.0;
Rho=2.01; %Densidad de plantas
LAIMax=8;
Delta=0.062;
Beta=0.5;
D=0.00183;
Tau=0.12;
K=0.61;
E=0.74; % 0.85 para Jones et al.
Alfa=0.09;
Alfaf=0.95;
Cm=0.10;
Nu=0.43;
NFF=18/60;
```

```

Q10=1.4;
rm=0.14/1440;
Tcrit=26;
Km=0.0006;
Kf=21.0/60;
Nb=7.0;
cs1 = 610.780; cs2 = 17.08085; cs3 = 234.175;
% Convierte datos de HR exterior a Humedad Abs
pTo_H2Os = cs1*exp( (cs2*(TempAire-T0))./(cs3+(TempAire-T0)) );
CTo_H2Os = (pTo_H2Os*18e-3)./(8.314*TempAire);
pTo_H2O = pTo_H2Os.*(HumRel/100);
CTo_H2O = CTo_H2Os.*(pTo_H2O./pTo_H2Os); % kg[H2O] m-3
%Condiciones iniciales
TInt0 = 20+T0;
HumedInt0 = CTo_H2O(1,1);
Tmt0 = 20+T0;
CO20 = 340*(1.83*1e-6);
Nn0=3.5;
LAI0=0.0106;
W0=0.60;
Wf0=0.0;
Wm0=0.0;
Datos = [Time TempAire CTo_H2O VelViento RadSolar VentLateral VentCenital Td Tdia posvalvula];
Parametros = [TInt0,HumedInt0,Tmt0,CO20,Coef_RnCrop,TRANSinv,Hvent,Cw,Cd,Asuelo,Coef_AbsRad...
Coef_inflt,ROaire,CPaire,rb,Coef_Q_a_e,CalorLat,Coef_CndMasaAire,Coef_CndMasaSuelo...
Coef_AbsMasa,Tref,Prof_Ref,tasamaxco2,conextco2,Vgrh,CapCalorMasa,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];
MyOpts = simset('Solver','ode45','RelTol',1e-10);
[t, x, y] = sim('sco2mastomgro',Time,MyOpts,Datos);

```

a.2 Modelo en SIMULINK

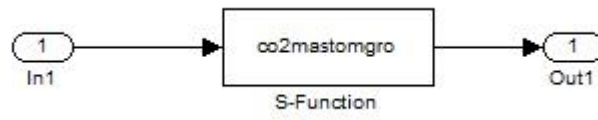


Figura 6.1: Gráfica del modelo implementado en SIMULINK.

a.3 Subrutina en lenguaje C (Mex-function).

```
co2mastomgro.c
#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME co2mastomgro
#include "simstruc.h"
#include <math.h>
#define max(A,B) ((A) > (B) ? (A) : (B))
#define min(A,B) ((A) < (B) ? (A) : (B))
#define u(element)(*uPtrs[element])
double humrel(double , double );
/*Used to read the parameter number 1*/
#define TInt0 p[0]
#define HumedInt0 p[1]
#define Tmt0 p[2]
#define CO20 p[3]
#define Coef_RnCrop p[4]
#define TRANSinv p[5]
#define Hvent p[6]
#define Cw p[7]
#define Cd p[8]
#define Asuelo p[9]
#define Coef_AbsRad p[10]
#define Coef_inflt p[11]
#define ROaire p[12]
#define CPaire p[13]
#define rb p[14]
#define Coef_Q_a_e p[15]
#define CalorLat p[16]
#define Coef_CndMasaAire p[17]
#define Coef_CndMasaSuelo p[18]
#define Coef_AbsMasa p[19]
#define Tref p[20]
#define Prof_Ref p[21]
#define tasamaxco2 p[22]
#define conextco2 p[23]
#define Vgrh p[24]
#define CapCalorMasa p[25]
#define Nn0 p[26]
#define LAI0 p[27]
#define W0 p[28]
#define Wf0 p[29]
#define Wm0 p[30]
#define Nm p[31]
#define p1 p[32]
#define Rho p[33]
#define LAIMax p[34]
#define Delta p[35]
#define Beta p[36]
#define D p[37]
#define Tau p[38]
#define K p[39]
#define E p[40]
#define Alfa p[41]
#define Alfaf p[42]
#define Cm p[43]
#define Nu p[44]
#define NFF p[45]
#define Q10 p[46]
#define rm p[47]
#define Tcrit p[48]
#define Km p[49]
#define Kf p[50]
#define Nb p[51]
static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
```

```

{
ssSetNumSFcnParams(S, 1); /* Number of expected parameters */
if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
return;
}
ssSetNumContStates(S, 9);
ssSetNumDiscStates(S, 0);
if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
/*Entradas del modelo*/
ssSetInputPortWidth(S, 0, 9);
ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);
if (!ssSetNumOutputPorts(S, 1)) return;
ssSetOutputPortWidth(S, 0, 9);
ssSetNumSampleTimes(S, 1);
ssSetNumRWork(S, 0);
ssSetNumIWork(S, 0);
ssSetNumPWork(S, 0);
ssSetNumModes(S, 0);
ssSetNumNonsampledZCs(S, 0);
ssSetOptions(S, 0);
}
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 */v
#if defined(MDL_INITIALIZE_CONDITIONS)
static void mdlInitializeConditions(SimStruct *S)
{
real_T *x0=ssGetContStates(S);
double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));
x0[0] = TInt0; /* Temperatura del aire interior */
x0[1] = HumedInt0; /* Humedad interior */
x0[2] = Tmt0; /* Temperatura de masa termica */
x0[3] = CO20; /* CO2 del aire */
x0[4] = Nn0;
x0[5] = LAI0;
x0[6] = W0;
x0[7] = Wf0;
x0[8] = Wm0;
}
#endif /* MDL_INITIALIZE_CONDITIONS */

#define MDL_START /* Change to #undef to remove function */

#if defined(MDL_START)

static void mdlStart(SimStruct *S)

{

}

#endif /* MDL_START */

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];

y[5] = x[5];

y[6] = x[6];

y[7] = x[7];

y[8] = x[8];

}

#define MDL_UPDATE /* Change to #undef to remove function */

#if defined(MDL_UPDATE)

static void mdlUpdate(SimStruct *S, int_T tid)

{

}

#endif /* MDL_UPDATE */

#define MDL_DERIVATIVES /* Change to #undef to remove function */

#if defined(MDL_DERIVATIVES)

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;

double Qsol, Qa_s, Qa_e, Qven, Qtra, M_transp_Rad, M_transp_Humd;

double M_transp, Cvapo, M_vent, FlujoVent, Flujo_viento, Flujo_infilt;

double Coef_CndCnv_a_e, RatioHeat, VaporCncntrSat;

double Qsm, Qmm, Qfm, FlujoAux1, FlujoAux2, rs, RadNeta;

double T0, cs1, cs2, cs3, pTa_H2Os;

double ftfot, Fmax ,radPAR;

double M_co2_iny, M_co2_vent, M_co2_fot_rep;

T0 = 273.16; cs1 = 610.780; cs2 = 17.08085; cs3 = 234.175;

Cvapo = 1.0;

RatioHeat = 0.7584*exp(0.051*(x[0]-T0));

pTa_H2Os = cs1*exp( (cs2*(x[0]-T0))/(cs3+(x[0]-T0)) );

VaporCncntrSat = (pTa_H2Os*18e-3)/(8.314*x[0]);

RadNeta = Coef_RnCrop*(1 - exp(-K*x[5]))*TRANSinv*u(3);

/* Tasa de ventilacion */

if ( (u(4) + u(5)) <= 0) {

FlujoAux1 = 0.0;

FlujoAux2 = 0.0;

} else {

FlujoAux1 = (pow(u(4)*u(5),2)/(pow(u(4),2) + pow(u(5),2)))*2*9.81*((x[0] - u(0))/u(0))*Hvent;

FlujoAux2 = pow((u(4) + u(5))/2,2)*Cw*pow(u(2),2);

}

if ((FlujoAux1 + FlujoAux2) <= 0)

Flujo_viento = 0.0;

else

Flujo_viento = Cd*sqrt(FlujoAux1 + FlujoAux2);

Flujo_viento = Cd*sqrt(max(FlujoAux1 + FlujoAux2,0));

/* Infiltracion */

Flujo_infilt = Asuelo*Coef_inflt;

FlujoVent = (Flujo_viento + Flujo_infilt);

```

```

/* Coef. global de transferencia de calor cubierta - aire exterior */
Coef_CndCnv_a_e = Coef_Q_a_e;

/* Evapotranspiracion el cultivo */

/* resistencia interna o estomatica, Wang and Boulard (2000) */
rs = 200*( 1 + 1/( exp( 0.05*(TRANSinv*u(3)-50) ) ) );

M_transp_Rad = ( (RatioHeat*RadNeta)/CalorLat )/( (1+RatioHeat) + (rs/rb) );
M_transp_Humd = (2*x[5]*(VaporCncntrSat - x[1]))/((1+RatioHeat)*rb + rs);

/* Flujo de masa de vapor por transpiracion */
M_transp = max( M_transp_Rad + M_transp_Humd, 0);

/* M.transp = max(( M.transp_Rad ), 0); */

/* Hay transpiracion si concentracion de humedad < concentracion humedad a saturacion */
if (x[1] <= VaporCncntrSat){
Cvapo = 1.0;
} else {
Cvapo = 0.0;
}

/* Balance de energia */
Qsol = Coef_AbsRad*TRANSinv*u(3);
Qa_s = Coef_CndMasaAire*(x[2] - x[0]);
Qa_e = Coef_CndCnv_a_e*(x[0] - u(0));
Qven = ((ROaire*CPaire*FlujoVent)/Asuelo)*(x[0] - u(0));
Qtra = CalorLat*M_transp;
Qsm = Coef_AbsMasa*TRANSinv*u(3);
Qmm = Coef_CndMasaAire*(x[2] - x[0]);
Qfm = Coef_CndMasaSuelo*((x[2]-Tref)/Prof.Ref);

/* Flujo de masa de vapor por ventilacion */
M_vent = (FlujoVent/Asuelo)*(x[1] - u(1));

/*fotosistesis*/
if ((x[0] - T0 )<0)
ftfot=0;

```

```

else if (((x[0] - T0 )>=0 ) &&((x[0] - T0)<9))

ftfot=0.0744*(x[0] - T0 );

else if (((x[0] - T0)>=9 ) && ((x[0] - T0 )<12))

ftfot=0.67+0.11*((x[0] - T0 )-9);

else if (((x[0] - T0 )>=12 ) && ((x[0] - T0 )<28))

ftfot=1;

else if (((x[0] - T0 )>=28 ) & ((x[0] - T0 )<35))

ftfot=1- 0.1429*((x[0] - T0 )-28);

else

ftfot=0;

Fmax=Tau*x[3]/(1.83*1e-6);

radPAR=0.45*TRANSinv*u(3)/(1.83*1e-6);

FotosintesisBruta =(D*Fmax*ftfot/K)*(log(((1.0-Cm)*Fmax+Alfa*K*radPAR)...

/(Alfa*K*radPAR*exp(-K*x[5])+(1.0-Cm)*Fmax)));

/*respiracion */

Respiracion=pow(Q10,((x[0]-20-T0)/10))*rm*((x[6]-x[8]));

/*balance co2 */

M_co2_iny= tasamaxco2 *u(8);

M_co2_vent= FlujoVent *(x[3] - conextco2);

M_co2_fot_rep=(1e-3/60)*Asuelo*( FotosintesisBruta - Respiracion );

/* ecuaciones de estado */

dx[0] = (Asuelo/(ROaire*CPaire*Vgrh))*(Qsol + Qa_s - Qa_e - Qven - Cvapo*Qtra);/*temperatur*/

dx[1] = (Asuelo/Vgrh)*( Cvapo*M_transp - M_vent ); /*Humedad*/

dx[2] = (1/CapCalorMasa)*(Qsm - Qmm - Qfm);

dx[3] = (1/Vgrh)*( M_co2_iny - M_co2_fot_rep - M_co2_vent); /*CO2*/

/*Funcion de crecimiento de nodos dependiente de la temperatura

de acuerdo a Ramirez-Arias 2005. Pag 44.*/

if ((x[0] - T0 ) < 9.0 or (x[0] - T0 ) >= 50.0)

TempNodos= 0;

else if ((x[0] - T0 ) >= 9.0 & (x[0] - T0 ) < 12.0)

```

```

TempNodos = 0.1833*((x[0] - T0 )-9);

else if ((x[0] - T0 ) >=12 & & (x[0] - T0 ) < 28)

TempNodos = 0.028125*((x[0] - T0 )-12)+0.55;

else

TempNodos = 1 -0.4545*((x[0] - T0 )-28);

/*Funcion Nb de acuerdo con Ramirez-Arias, 2005, pag 45*/

if ((x[0] - T0 ) < 8.5)

NbTemp=46;

else if ((x[0] - T0 ) >=8.5 & & (x[0] - T0 ) < 12.5)

NbTemp=46.5 - 4*((x[0] - T0 ) - 8.5);

else if ((x[0] - T0 ) >=12.5 & & (x[0] - T0 ) <16.5)

NbTemp=30.5 - 2*((x[0] - T0 ) - 12.5);

else if ((x[0] - T0 ) >=16.5 & & (x[0] - T0 ) < 20.5)

NbTemp=22.5 - 1*((x[0] - T0 ) - 16.5);

else if ((x[0] - T0 ) >= 20.5 & & (x[0] - T0 ) < 24.5)

NbTemp=18.5 - 0.5*((x[0] - T0 ) - 20.5);

else if ((x[0] - T0 )>=24.5 & & (x[0] - T0 ) < 28.5)

NbTemp=16.5 - 0.25*((x[0] - T0 ) - 24.5);

else if ((x[0] - T0 ) >=28.5 & & (x[0] - T0 ) < 32.5)

NbTemp=15.5 - 0.125*((x[0] - T0 ) - 28.5);

else if ((x[0] - T0 ) >=32.5 & & (x[0] - T0 ) < 40.5)

NbTemp=15 - 0.125*((x[0] - T0 ) - 32.5);

else

NbTemp=14;

/* 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 ((x[0] - T0 ) <= 12.5 or (x[0] - T0 ) >=28.5) FfTd=0;

else if ((x[0] - T0 ) > 12.5 & & (x[0] - T0 ) <=16.5)

FfTd=0.1*((x[0] - T0 )-12.5);

else if ((x[0] - T0 ) > 16.5 & & (x[0] - T0 ) <= 20.5)v FfTd=0.4+ 0.095*((x[0] - T0 )-16.5);

else if ((x[0] - T0 )> 20.5 & & (x[0] - T0 ) <= 24.5)

FfTd=0.78+ 0.055*((x[0] - T0 )-20.5);

else

FfTd=1 + 0.25*((x[0] - T0 )-24.5);

if ((x[0] - T0 ) > Tcrit)

GTdia=1.0-0.154*((x[0] - T0 )-Tcrit);

else

GTdia=1.0;

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

if ((x[0] - T0 ) <= 9 or (x[0] - T0 ) > 50)

DfTd=0;

else if ((x[0] - T0 )> 9 & & (x[0] - T0 ) <=15)

DfTd=0.0025*(x[0] - T0 );

else if ((x[0] - T0 )>15 & & (x[0] - T0 ) <= 21)

DfTd=0.015 + 0.0058*(x[0] - T0 );

else if ((x[0] - T0 ) > 21 & & (x[0] - T0 ) <= 35)

DfTd=0.05;

```

```

else

DfTd=0.05 - 0.0058*(x[0] - T0 );

DfTd=DfTd/1440;

/*Funcion que modifica la fotosintesis para temperaturas suboptimas,
de acuerdo a Ramirez-Arias, 2005. pag. 41

/* Tasa de cambio de nodos*/

dx[4]=Nm*TempNodos;

if (x[5] > LAIMax)

dx[5]=0.0;

else if (t==6096){

x[5]=x[5]-1.445;

dx[5]=0.0;

}

else if (t==10128){

x[5]=x[5]-0.662;

dx[5]=0.0;

}

else if (t==10800)

dx[5]=(Rho*Delta*exp(Beta*(x[4]-Nb))/(1+exp(Beta*(x[4]-Nb))))*Nm*TempNodos;

else

/* Tasa de cambio de indice de area foliar */

dx[5]=60*(Rho*Delta*exp(Beta*(x[4]-Nb))/(1+exp(Beta*(x[4]-Nb))))*Nm*TempNodos;

if (t>=6144)

dx[5]=60*0.28*((Rho*Delta*exp(Beta*(x[4]-Nb))/(1+exp(Beta*(x[4]-Nb))))*Nm*TempNodos);

if (x[5] < LAIMax)

FNodos=0.0;

else

FNodos=p1;

TasaCrecimiento=E/60*(FotosintesisBruta-Respiracion)*(1.0-FrXn);

/* Tasa de cambio de biomasa*/

```

```

dx[6]=TasaCrecimiento-(FNodos*Rho*Nm*TempNodos);

/* Tasa de crecimiento de biomasa de frutos */

if (x[4] > NFF)

dx[7]=TasaCrecimiento*Alfa*fTdT*(1-exp(-Nu*(x[4]-NFF)))*GTdia;

else

dx[7]=0.0;

if (x[4] > (NFF+Kf))

dx[8]=DfTdT*(x[7]-x[8]);

else

dx[8]=0.0;

}

#endif /* MDL_DERIVATIVES */

static void mdlTerminate(SimStruct *S)

{

}

double humrel(double Ta, double CTa_H2O)

{

double HR, T0; double pTa_H2Os, CTa_H2Os;

double cs1, cs2, cs3, Rg, Mh20;

T0 = 273.15; Mh20 = 18e-3; Rg = 8.314;

cs1 = 610.780; cs2 = 17.08085; cs3 = 234.175;

pTa_H2Os = cs1*exp( (cs2*(Ta-T0))/(cs3+(Ta-T0)) );

CTa_H2Os = (pTa_H2Os*18e-3)/(8.314*Ta);

HR = 100*(CTa_H2O/CTa_H2Os); /* HR en porciento */

if (HR <= 0) {

HR = 0.0;

}

if (HR >= 100) {

HR = 100.0;

}

}

```



```
return HR;

}

#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
```

B. NOTACIÓN

b.1 Variables de estado del modelo clima-cultivo.

Símbolo	Descripción	Unidades
C_{a-H_2O}	Cantidad absoluta de vapor de agua	$\text{kg}[\text{H}_2\text{O}] \text{ m}^{-3}$
T_a	Temperatura	K
C_{a-CO_2}	Dióxido de carbono en el aire	$\text{kg}[\text{CO}_2] \text{ m}^{-3}$
X_F	Materia seca de frutos	g m^{-2}
X_{IAF}	Índice de área foliar	$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$
X_M	Materia seca de frutos maduros	g m^{-2}
X_N	Cantidad de nodos	nodo
X_{PS}	Materia seca total	g m^{-2}

b.2 Variables y parámetros del modelo clima-cultivo.

Símbolo	Descripción	Unidades
$\Phi_{m-c-a-H_2O}$	Tasa de vapor de agua por transpiración	$\text{kg}[\text{H}_2\text{O}] \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$
$\Phi_{m-c-o-H_2O}$	Tasa de vapor de agua por ventilación	$\text{kg}[\text{H}_2\text{O}] \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$
h	Altura promedio del invernadero en	m
$S_\epsilon = \frac{s}{\gamma}$	Cambio de contenido de calor latente	—
r_{cl}	Resistencia de la capa límite	s m^{-1}
r_h	Resistencia interna de la hoja	s m^{-1}
R_n	Radiación neta disponible para el dosel	W m^{-2}
λ	Calor latente de evaporación	J kg^{-1}
$C_{a-H_2O}^*$	Contenido de agua en condiciones de saturación	$\text{kg}[\text{H}_2\text{O}] \text{ m}^{-3}$
s	Pendiente de la curva de presión de vapor a saturación	K Pa^{-1}
γ	Constante psicométrica termodinámica	Pa K^{-1}
LAI	Índice de área foliar	$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$
τ_{inv}	Transmisividad de la cubierta del invernadero	—
I_0	Radiación global exterior	W m^{-2}
$r_{cl} = 200$	Resistencia en la capa límite	s m^{-1}
R_n	radiación neta	W m^{-2}
$\Phi_{m-a-o-H_2O}$	Flujo de ventilación	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$
C_{a-H_2O}	Concentración de agua del aire interior	kg m^{-3}
C_{o-H_2O}	Concentración de agua del aire exterior	kg m^{-3}
A_T	Superficie total de ventanas abiertas	m^2
g	Constante de gravedad	9.81 m s^{-1}
T_e	Temperatura de aire exterior en	K
h_{vt}	Altura entre las ventanas cenital y lateral	m
C_d	Coefficiente empírico de descarga	—
C_w	Coefficiente empírico por efecto del viento	—
v_ϵ	Velocidad del viento exterior	m s^{-1}
A_{cen}	Superficie de apertura cenital	m^2
A_{lat}	Superficie de apertura lateral	m^2
ρ_a	Densidad del aire	$\text{kg}[\text{aire seco}] \text{ m}^{-3}$
h	Altura promedio del invernadero	m
C_{p-a}	Capacidad de calor específica del aire	$\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Q_{rd-a}	Radiación solar absorbida por el aire interior	W
Q_{s-a}	Transferencia por convección entre suelo y aire	W
Q_{a-e}	Transferencia por convección entre el aire exterior e interior	W

Símbolo	Descripción	Unidades
Q_{vent}	Transferencia de calor por ventilación e infiltración	W
Q_{Tra}	Transferencia de calor latente por transpiración del cultivo	W
η_{Ia}	Coefficiente de absorción de radiación de onda corta	—
τ_{cb}	Coefficiente de transmisión de radiación de onda corta	—
V_s	Coefficiente de transferencia de calor aire interior y superficie	W m ⁻²
T_s y T_a	Temperaturas de la superficie del suelo y del aire interior	K
U_s	Transferencia de calor entre el aire interior y la cubierta	W m ⁻² K ⁻¹
a_{c1} , a_{c2} y a_{c3}	Son parámetros a estimar	—
λ	Calor latente de vaporización del agua	J kg ⁻¹ [H ₂ O]
$\Phi_{m-c-a-H_2O}$	Tasa de transpiración de las plantas	kg ⁻¹ [H ₂ O] m ⁻² s ⁻¹
V_a	Volumen que ocupa el aire del invernadero	m ³
$\Phi_{m.in.a.CO2}$	Tasas de flujos de dióxido de carbono aportado	kg[CO ₂] s ⁻¹
$\Phi_{m.a.c.CO2}$	Tasa de fotosíntesis del cultivo	kg[CO ₂] s ⁻¹
$\Phi_{m.a.o.CO2}$	Tasas de flujos de dióxido de carbono por ventilación	kg[CO ₂] s ⁻¹
$\Phi_{m.CO2}$	Tasa máxima de flujo de CO ₂	kg[CO ₂] s ⁻¹
v_{pCO2}	Posición de la válvula de inyección de CO ₂	—
P_{cg}	Tasa de asimilación bruta del dosel	kg[CO ₂] s ⁻¹
r_c	Tasa de respiración oscura del dosel	kg[CO ₂] s ⁻¹
P_g	Tasa de asimilación bruta del dosel	g[CO ₂] m ⁻² [suelo] min ⁻¹
r_D	Tasa de respiración oscura del dosel	g[CO ₂] m ⁻² [suelo] min ⁻¹
A_s	Área de la superficie del suelo o piso del invernadero	m ²
$\Phi_{a.o}$	Tasa de ventilación	m ³ s ⁻¹
$C_{a.CO2}$	Concentración de dióxido de carbono en el interior	kg m ⁻³
$C_{o.CO2}$	Concentración de dióxido de carbono en el exterior	kg m ⁻³
α	Eficiencia fotoquímica de la radiación	$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \mu\text{mol}^{-1}$
α_F	Máxima distribución de crecimiento de fruto	fracción d ⁻¹
β	Coefficiente en ecuación de índice de área foliar	nodo ⁻¹
δ	Máxima expansión de área foliar por nodo	m ² (hoja) nodo ⁻¹
ρ	Densidad de plantas	plantas m ⁻²
τ	Eficiencia en la utilización de dióxido de carbono	$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$
v	Coefficiente de transición entre crecimiento vegetativo y frutos	nodo ⁻¹
C_{cnvfot}	Coefficiente para conversión de μmol de CO ₂ m ⁻² s ⁻¹	g(CH ₂ O) min ⁻¹
	a g CH ₂ O m ⁻² min ⁻¹	$\mu\text{mol}(\text{CO}_2)^{-1} \text{s}$
C_E	Eficiencia de crecimiento	g (materia seca)
		g ⁻¹ (CH ₂ O)
CK	Coefficiente de extinción de radiación	—