

**EVALUACIÓN DE UN MODELO PARA ESTIMAR LA
TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA EN EL INTERIOR
DE INVERNADEROS**

AUDBERTO REYES ROSAS

TESIS

**Presentada como Requisito Parcial
para Obtener el Grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

Programa de Graduados

**Buenavista, Saltillo, Coahuila.
Octubre, 2009**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIRECCIÓN DE POSTGRADO

**EVALUACIÓN DE UN MODELO PARA ESTIMAR LA TEMPERATURA
Y HUMEDAD RELATIVA EN EL INTERIOR DE INVERNADEROS**

TESIS

POR

AUDBERTO REYES ROSAS

Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría y
aprobada como requisito parcial, para optar al grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN**

COMITÉ PARTICULAR

Asesor principal:

Dr. Raúl Rodríguez García

Asesor:

Dr. Alejandro Zermeño González

Asesor:

Dra. Diana Jasso Cantú

Asesor:

Dr. Martín Cadena Zapata

Dr. Jerónimo Landeros Flores
Director de Postgrado
Buenavista, Saltillo, Coahuila, Octubre de 2009.

AGRADECIMIENTOS

- ❖ A Dios por brindarme la oportunidad de existir en este mundo y con ello poder realizar mis sueños y anhelos durante este tiempo.
- ❖ A la UAAAN, por brindarme los conocimientos y las herramientas necesarias para poder lograr mis metas.
- ❖ Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por el apoyo proporcionado para realización y obtención del grado de Maestro en ciencias.
- ❖ A mis asesores por su tiempo dedicado a la supervisión de este trabajo:
 - Dr. Raúl Rodríguez García
 - Dr. Alejandro Zermeño González.
 - Dra. Diana Jasso Cantú.
 - Dr. Martin Cadena Zapata.
 - Dr. Héctor Burgueño Camacho.
 - Al Ingeniero Tello López por las facilidades prestadas para realización de este trabajo al permitirnos desarrollar esta investigación dentro de las instalaciones del Rancho El Lucero, en Tlahualilo, Durango.

DEDICATORIA

❖ A mi padre y madre:

Sr. Eden Reyes Aguilar y Sra. Aida Rosas Rodríguez.

Por darme la vida y su apoyo para estudiar y prepararme para llegar a ser una mejor persona y un mejor profesionista.

❖ A mis hermanos Enriqueta, Gustavo y Héctor:

Quienes han pasado conmigo buenos y malos ratos pero que a pesar de todo siempre hemos estado juntos.

❖ A mis pequeñines:

Betsabé y Uriel, mis sobrinos queridos.

❖ A mis compañeros y amigos:

Sasirot, Juan, Robertoni, Sandino, Arturo, Jorge, Melesio, Paola, Claudia y Javier por ser mis amigos y estar conmigo siempre.

Estudia no para saber algo más, sino para saber algo mejor. **Lucio Anneo Séneca**

COMPENDIO

**Evaluación de un modelo para estimar la temperatura y humedad relativa
en el interior de invernaderos**

POR

AUDBERTO REYES ROSAS

MAESTRÍA

INGENIERIA DE SISTEMAS DE PRODUCCION

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

Buenavista, Saltillo, Coahuila. Octubre 2009

Dr. Raúl Rodríguez García – Asesor

Palabras clave: temperatura, humedad relativa, invernadero, modelo.

Un modelo climático basado en leyes físicas que además es capaz de trabajar con un bajo número de variables fue evaluado para conocer su nivel de estimación con respecto de la realidad, dicho modelo estima la evolución horaria de la temperatura del aire y la humedad relativa al interior de un invernadero con ventilación de tipo cenital, en función del clima externo. La

evaluación se efectuó en el invierno 2008-2009 en un invernadero comercial con producción de tomate, localizado en Tlahualilo, Durango, México. El modelo incorpora los efectos de la ventilación natural. El resultado de la evaluación en dos días analizados separadamente mostró un buen ajuste para la estimación de la temperatura del aire con un coeficiente de determinación R^2 de 0.930 y 0.984, siendo menor para la humedad relativa con un R^2 de 0.905 y 0.703. De acuerdo a los resultados obtenidos para mejorar la estimación, es recomendable incluir el efecto de la evaporación desde el sustrato para el caso de la humedad relativa y modificaciones a los valores del coeficiente de transferencia de calor del material de cubierta (k_c) para el caso de la temperatura.

ABSTRACT

**Evaluation of a model for estimating temperature and relative humidity
inside of greenhouses.**

**BY
AUSBERTO REYES ROSAS**

**MASTER OF SCIENCE
IN
PRODUCTION SYSTEMS ENGINEERING**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

Buenavista, Saltillo, Coahuila. October 2009

Dr. Raúl Rodríguez García – Adviser

Key words: temperature, relative humidity, greenhouse, model.

A weather model was evaluated to estimate the hourly time temperature and relative humidity inside a zenithal type ventilation greenhouse, as a function of the weather outside of the greenhouse. The study was conducted during the winter of 2008-2009, in a commercial greenhouse under tomato production, located at Tlahualilo, Durango, Mexico. The model considered the effect of natural ventilation. The results of the evaluation for two days showed a good estimation of the air temperature ($R^2 = 0.930$ and 0.984) and a reasonable good

estimation of relative humidity ($R^2=0.905$ and 0.703). According to the results of this study, to improve the estimation of air temperature, the value of heat transfer coefficient (k_c) of the greenhouse cover material must be adjusted. To improve the estimation of relative humidity, the evaporation of the substrate must be included in the model.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo.....	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Tipos de invernaderos.....	4
Climatización de invernaderos.....	7
Calefacción.....	7
Sistemas de calefacción tradicionales.....	8
Sistemas no convencionales que utilizan energía solar.....	9
Sistemas que utilizan otras fuentes de calor.....	10
Control de altas temperaturas.....	11
La ventilación.....	11
La refrigeración.....	11
Sistemas de sombreado.....	14
Abonado carbónico.....	14
Manejo de la luz.....	16
Control de humedad.....	18
Modelos para gestión climática de invernaderos.....	21
Definición y tipos de modelos.....	21
Etapas de desarrollo de un modelo.....	22

Desarrollo del modelo conceptual.....	23
Desarrollo del modelo cuantitativo.....	23
Evaluación del modelo.....	23
Uso del modelo.....	24
Modelación en el ambiente STELLA™.....	24
Variables de estado.....	24
Variables externas.....	25
Constantes.....	25
Variables auxiliares.....	25
Transferencia de material.....	26
Fuentes y sumideros.....	26
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
Descripción del modelo.....	27
Localización del área de pruebas.....	34
Descripción del cultivo y su manejo.....	34
Descripción del invernadero utilizado para evaluar el modelo.....	37
Registro de datos y variables climáticas a medir.....	38
Evaluación del modelo	41
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
Modelo base.....	42

Modelo modificado.....	47
V. CONCLUSIÓN.....	54
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	55

INDICE DE CUADROS

Número de cuadro	Página
Cuadro 3.1 Valores de $A \cdot C_w^{0.5}$ y N_0 para condiciones de ventilas abiertas y cerradas (Sbita <i>et al.</i> , (998)	29
Cuadro 3.2 Programación del fertirriego diario en el invernadero donde se realizaron las mediciones de las variables climáticas para la evaluación del modelo.....	35
Cuadro 3.3 Valores de área de las aberturas de las ventilas y de la relación de área de abertura de ventilas, área del suelo cubierta por el invernadero (s), para los tres niveles de abertura en el invernadero.....	37
Cuadro 4.1 Ecuaciones de regresión lineal para valores medidos (x) y estimados (y) de temperatura del aire y humedad relativa con su respectivo coeficiente de determinación (R^2) y raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) para los días 10 y 13 del mes de enero de 2009. Valores estimados con el modelo base.....	47
Cuadro 4.2 Ecuaciones de regresión lineal para valores medidos (x) y estimados (y) de temperatura del aire y humedad relativa con su respectivo coeficiente de determinación (R^2) y la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) para los días 10 y 13 del mes de enero de 2009. Valores estimados mediante el modelo modificado.....	51

INDICE DE FIGURAS

Número de figura	Página
Figura 2.1 Algunos tipos de invernaderos de cubierta curva: semicircular (A), semielíptica (B), en arco gótico u ojiva (C), asimétrica (D), moncapilla adosada (E) y túnel simple(F).....	5
Figura 2.2 Esquemas de algunos tipos de invernaderos de cubierta recta: multicapilla simétrico (A), multicapilla asimétrico (B), moncapilla simple (C) y moncapilla adosado (D).....	6
Figura 2.3 Diagrama que muestra el principio de funcionamiento del sistema cooling.....	12
Figura 2.4 Riego de la cubierta.....	13
Figura 2.5 Gráfico de los distintos componentes en el software STELLA™.....	26
Figura 3.1 Cultivo de tomate en el invernadero del rancho El Lucero sobre fibra de coco mezclada con perlita como sustrato.....	36
Figura 3.2 Sección del invernadero que muestra las dimensiones y características más generales de la estructura (Figura no a escala).....	39
Figura 3.3 Vista del invernadero, junto con la estación climática Davis Vantage Pro2 utilizada en la medición de la radiación solar global.....	40
Figura 4.1 Radiación solar registrada al interior y al exterior del	

invernadero los días 8 y 9 de enero de 2009. (a y b respectivamente)...	42
Figura 4.2 Valores horarios medidos y estimados de la temperatura y humedad relativa al interior del invernadero y de la temperatura exterior en los días 10 (a y b) y 13 (c y d) de enero de 2009 de acuerdo al modelo original.....	44
Figura 4.3 Valores horarios medidos y estimados de la temperatura y humedad relativa al interior del invernadero y de la temperatura exterior en los días 10 (a y b) y 13 (c y d) de enero de 2009 de acuerdo con el modelo modificado.....	49

I. INTRODUCCIÓN

En México desde mediados de los años 90^s la producción de hortalizas en invernadero ha tenido un ritmo acelerado de crecimiento, en 2003 la superficie instalada fue de 950 has y en 2007 fueron 2500 ha (Giancomelli *et al.*, 2008). El factor determinante más relevante de la actividad hortícola es el clima (Castilla, 2005), los altos rendimientos que se obtienen bajo estas estructuras se debe en gran parte a que el clima durante el día y la noche se controla bajo umbrales óptimos de temperatura y humedad relativa o umbrales máximos y mínimos que eviten daño a las plantas (López *et al.*, 2000), aunque esto dependerá del grado de sofisticación de cada invernadero en particular, ya que dicha sofisticación estará frecuentemente relacionada al clima en el cual este es construido (Beytes, 2003).

El control del clima en el invernadero según Alpi y Tognoni (1999) va más allá del punto de vista de la regulación de la temperatura o de otros parámetros ambientales (luz, humedad, etc.), sino que abarca un aspecto mucho más amplio en donde se le da mayor importancia al rendimiento general del sistema. De acuerdo al enfoque dado por Leal (2006), un uso eficiente del invernadero es aquel que considera el operarlo con un mínimo de energía, para ello se requiere de la aplicación de técnicas de control automático, que a su vez requieren el manejar modelos matemáticos que sean capaces de describir las interacciones entre las diferentes variables que determinan su microclima.

Un modelo es aquel que puede estar formado normalmente por un conjunto de ecuaciones matemáticas, y que pueden ser una representación simplificada de un sistema o una parte del mismo. Ahora, dentro de los tipos de modelos existentes se pueden mencionar dos grandes grupos: los de caja negra y los físicos, los primeros según Castañeda (2007) por su naturaleza son de un bajo orden y no incorporan ningún conocimiento directo del sistema, por lo que no son adecuados para usarse en otras configuraciones o tipos de invernaderos. Mientras que los modelos físicos son aquellos basados precisamente en leyes físicas, son de alto orden y mediante estos se puede describir detalladamente el microclima del invernadero, ya que además aquí se pueden examinar los procesos de transferencia de masa y energía entre el invernadero y su entorno, y es precisamente bajo este último concepto en el cual se basa el desarrollo del modelo utilizado en este trabajo.

Los intercambios energéticos entre el interior del invernadero y el clima exterior son complejos a causa de los numerosos factores que intervienen, y además a que dichos factores están relacionados entre sí, y a su vez hacen intervenir los diferentes tipos de transferencia de calor: radiación térmica, conducción y convección (Matallana y Montero, 2001).

Existe variedad de modelos, algunos son complejos a causa del número y tipo de datos que cada uno considera, la presente investigación fue basada en un modelo tal que pudiera mantener el balance entre precisión y simplicidad, es decir, datos de fácil obtención.

El presente trabajo pretende evaluar el modelo basado en las investigaciones desarrolladas previamente por Boulard y Baille (1993), Sbita *et al.* (1998), Sbita *et al.* (1999) y Bouzo *et al.* (2006), para la predicción de la temperatura y la humedad relativa dentro de un invernadero con ventilación natural tipo cenital. Dicha evaluación es necesaria para verificar la capacidad del modelo al estimar el clima al interior del invernadero, esto significa, conocer su nivel de proximidad hacia la realidad, dicha verificación se realiza mediante la obtención de su nivel de ajuste R^2 , esto da un indicador de la confiabilidad del modelo al momento de su utilización. Así, la importancia de la realización de esta investigación consistirá en que un futuro dicho modelo será utilizado como una herramienta de apoyo para el diseño y planeación del control del clima en invernaderos para condiciones de clima cálido que predominan en la región norte del país.

Objetivo

Calibrar y validar un modelo para la predicción de la temperatura y la humedad relativa dentro de un invernadero con ventilación natural tipo cenital. Con la finalidad de utilizarlo como una herramienta de apoyo para el diseño y planeación del control del clima en invernaderos.

II. . REVISIÓN DE LITERATURA

Tipos de invernaderos

Hay diversas clasificaciones de los tipos de invernaderos. Atendiendo a su forma arquitectónica cabe distinguir dos formas básicas (Castilla, 2005):

Invernadero unimodular o monocapilla, constituido por un invernadero aislado de otras estructuras.

Invernadero multimodular o multicapilla, lo forman una serie de invernaderos unidos, en disposición de módulos paralelos asociados. Los tipos multicapilla permiten un mejor aprovechamiento del suelo, siendo además más baratos de construir y de calefactar, al tener menor relación entre superficie de cerramiento y superficie de suelo.

Atendiendo a la geometría de cubierta hay numerosas variantes (Figura 2.1). Las cubiertas de sección curva adoptan forma semicircular, semielíptica o de ojiva (arco gótico) entre otras.

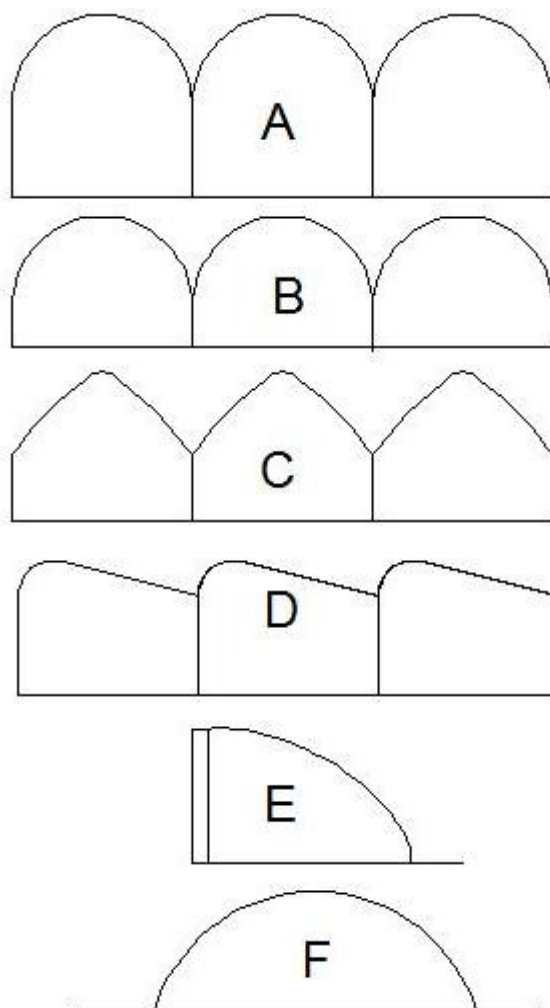


Figura 2.1 Algunos tipos de invernaderos de cubierta curva: semicircular (A), semielíptica (B), en arco gótico u ojiva (C), asimétrica (D), monocapilla adosada (E) y túnel simple(F).

En caso de cubiertas rectas (Figura 2.2), la cubierta a dos aguas puede ser simétrica o asimétrica, con diversidad de angulaciones, según la latitud y condiciones locales. Las paredes laterales, en invernaderos monocapilla o monotúnel, pueden ser verticales o ligeramente inclinadas, siendo estas últimas más ventajosas por su mayor transmisividad de luz (Castilla, 2005).

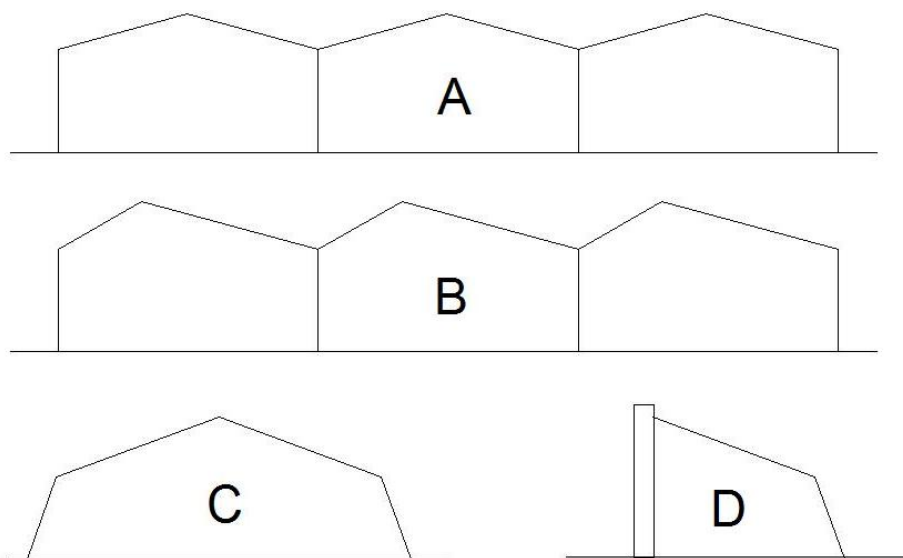


Figura 2.2 Esquemas de algunos tipos de invernaderos de cubierta recta: multicapilla simétrico (A), multicapilla asimétrico (B), monocapilla simple (C) y monocapilla adosado (D).

Según el tipo de cerramiento cabe distinguir invernaderos de:

- Vidrio
- Plástico: Lámina flexible

Placa rígida: - Simple
- Alveolar

Mallas

Aunque hoy día es menos empleada la clasificación de invernaderos atendiendo al nivel de temperatura mínima que pueden mantener, se distingue

entre: invernadero frío (5-8°C), invernadero templado (12-15°C) e invernadero caliente (20-25 °C).

Climatización de invernaderos

En el interior del invernadero, los factores radiación, temperatura y composición de la atmósfera son modificados generando un microclima distinto al local. Las modificaciones dependen esencialmente de la naturaleza y propiedades del material de cerramiento, de las condiciones de renovación de aire, de la forma, dimensiones y orientación del invernadero, de la cubierta vegetal presente y de las posibilidades de evaporación del suelo y de la cubierta (Berninger, 1989).

El invernadero se concibe para proteger al cultivo de los efectos adversos del medio y genera un microclima diferente del existente en el interior. Los problemas de control de la temperatura y humedad del aire se convierten en serios problemas a resolver. La resolución de los mismos es compleja ya que son demasiadas las variables implicadas (Díaz *et al.*, 2001).

Calefacción

Las temperaturas por debajo de un determinado umbral no sólo imposibilitan que los cultivos cubran sus objetivos de producción sino que pueden ser letales para los mismos (Díaz *et al.*, 2001).

La calefacción del invernadero se puede efectuar por dos medios: a través de la atmósfera o a través del suelo, o bien a través de ambos elementos. El aire tiene inercia térmica débil y, por lo tanto, el calor se difunde en su masa

casi exclusivamente por convección, la cual puede ser activada artificialmente; por el contrario, el suelo tiene una gran inercia y el calor se transmite por conducción (Alpi y Tognoni, 1999).

Según FAO (2002) los sistemas de calefacción pueden ser clasificados en tres grupos generales de acuerdo a su fuente energética: Sistemas de calefacción tradicionales, Sistemas no convencionales que utilizan energía solar y Sistemas que utilizan otras fuentes de calor.

Sistemas de calefacción tradicionales.

La calefacción artificial solamente se recomienda en aquellas zonas sometidas a temperaturas invernales especialmente bajas o en la producción de cultivos especiales.

– a) Sistemas de calefacción antiheladas

Si se utilizan puntualmente estos calefactores son muy útiles, puesto que son económicos y usan combustibles disponibles en todas partes. Tienen el inconveniente de que no mantienen la distribución de la temperatura uniforme dentro del invernadero.

– b) Sistemas de calefacción por agua

El sistema es caro de instalación, utiliza agua a temperatura entre 60 y 80 °C, que circula en tubería de acero de 1 a 1.5 pulgadas de diámetro. Se estima que el 45% de la energía cedida, es en forma de radiación, alrededor del 25% llega al suelo y el resto se dirige hacia arriba o hacia los laterales.

– c) Sistemas de aire forzado

Estos equipos se utilizan particularmente en las empresas productoras de menor tamaño. Este sistema produce gradientes de temperatura horizontales y verticales, el gradiente vertical está comprendido entre 2 °C y 3 °C por cada metro de altura y por tanto la temperatura que está cerca del techo puede ser de 5 °C y 10 °C superior a la de la zona de cultivo.

Este sistema económico funciona con cualquier tipo de combustible, fueloil o gas natural, y se adapta tanto a invernaderos grandes con una caldera central e intercambiadores de calor locales como a invernaderos pequeños con quemadores individuales.

Dicho sistema tiene el efecto secundario de aumentar la evaporación y la dificultad de controlar el bióxido de carbono, puesto que aumenta considerablemente el movimiento de aire.

Sistemas no convencionales que utilizan energía solar.

Este tipo de sistema puede clasificarse dentro de aquellos que utilizan fuentes de energía alternativas, sin embargo, en las actuales condiciones de costes energía, la mayor parte de las energías alternativas no son económicamente competitivas.

La calefacción del invernadero por medio de colectores solares externos tiene una serie de desventajas:

- El sistema es difícil de integrar en el invernadero.
- Los materiales y la mano de obra son una carga financiera considerable.

- Los colectores y los invernadero pueden competir entre sí en la captación de energía solar.

–

Sistemas que utilizan otras fuentes de calor.

- a) Energía geotérmica

El agua caliente de fuentes naturales o de pozos profundos se usa actualmente como fuente energética en países mediterráneos como Francia, España, Grecia y Bulgaria.

El gradiente geotérmico es de 1°C por 30 m, aproximadamente. Hay que profundizar 1000-2000 m para tener aguas de 40-70°C. Esas aguas suelen estar muy cargadas de sales y ser corrosivas. Las instalaciones son costosas, aunque la energía térmica sea gratuita, y los costos de amortización altos (Castilla, 2005).

- b) Utilización de calores residuales

Si existe una zona hortícola en la vecindad de unidades industriales de gran tamaño, como pueden ser las centrales generadoras de electricidad, el calor residual producido por las mismas puede ser una fuente energética para los invernaderos. La mayor barrera para el uso de calor industrial (FAO, 2002) son los factores ecológicos, como el miedo a encontrar residuos nucleares en los cultivos.

Control de altas temperaturas

La ventilación

La aireación o ventilación es el intercambio de aire entre el invernadero y el exterior. Este intercambio de aire se efectúa a través de las aperturas del invernadero (ventanas). La renovación de aire permite evacuar calor en exceso y reducir la temperatura del aire, modificar la humedad atmosférica, evacuando el aire interior enriquecido de vapor de agua por la transpiración de las plantas y modificar la composición gaseosa de la atmósfera (Castilla, 2005)

La refrigeración

La condensación de vapor de agua procedente del aire cálido y húmedo sobre la superficie fría del material de cerramiento del invernadero, supone una forma de pérdida de calor. El cambio de estado de vapor de agua a líquido va asociado a la emisión de una cantidad de energía denominada calor latente. La energía perdida en el proceso convectivo de calor. La vaporización absorbe calor del aire del invernadero, haciendo que baje su temperatura ambiente (Díaz *et al.*, 2001).

Los sistemas de refrigeración del invernadero son esencialmente tres:

a) Cooling

En un invernadero con cooling system (sistema de enfriamiento en inglés), uno de los laterales está equipado con ventiladores de extracción de aire, y el otro posee unos paneles porosos, que se mantienen húmedos (Figura 2.3).

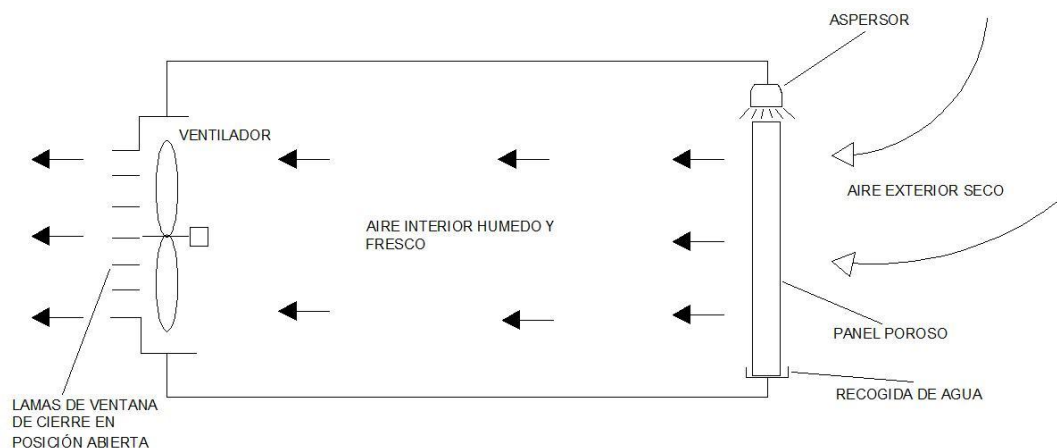


Figura 2.3 Diagrama que muestra el principio de funcionamiento del sistema cooling (Castilla, 2005).

b) Nebulización fina (fog)

Los sistemas de nebulización tienen por fin crear una niebla para refrigerar el interior del invernadero.

Las gotas de agua han de ser lo suficientemente pequeñas para que no lleguen a mojar las plantas, para evitar el desarrollo de enfermedades y el depósito de las sales de agua, al evaporarse desde la superficie de las hojas entre dos nebulizaciones.

Las gotas deben producirse a cierta altura por encima de las plantas, para que por su tamaño y altura caigan lentamente y se evaporen antes de alcanzar las plantas, absorbiendo energía y reduciendo la temperatura.

El primer efecto de la nebulización de agua es el enfriamiento del aire por evaporación al extraer $2.45 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ de energía calorífica. El aire enfriado (más denso) desciende e induce movimiento convectivo. Si el sistema está bien regulado, el agua no llega a tocar las plantas (Castilla, 2005).

c) El riego de la cubierta.

No parece un método muy adecuado para reducir la temperatura, ya que su reducción no supera a la que se consigue con otras técnicas más sencillas y baratas y, además, tiene el inconveniente del desarrollo de algas y la formación de depósitos sobre la cubierta del invernadero que van a disminuir su transmisividad (Díaz *et al.*, 2000). Este sistema permite reducir la temperatura del invernadero hasta en 3 °C (Breuer *et al.*, 1995) y es solo usual en invernaderos sofisticados.

Este sistema tan sencillo parece dar mejores resultados para calentar que para enfriar el invernaderos (Figura 2.4), como ejemplo, en Italia se logró salvar a los cultivos bajo invernaderos sin calefacción, regando la cubierta cuando la temperatura exterior fue de -8 °C. En estas condiciones se forma una capa de hielo sobre el invernadero que lo aísla del medio exterior (Matallana y Montero, 2001).



Figura 2.4 Riego de la cubierta.

Sistemas de sombreado

El sombreado es la técnica de refrigeración más usada en la práctica, pero no está libre de problemas. Uno de ellos es que gran número de productos no son selectivos. La reducción de temperatura se logra a base de cortar más de lo conveniente el porcentaje de radiación fotoactiva, mientras que el infrarrojo corto llega en exceso a los cultivos. En otros casos la reducción de la radiación no causa descenso térmico, por ejemplo cuando se utilizan pantallas de ahorro de energía durante el verano con el objetivo de sombrear, ya que dichas pantallas pueden reducir mucho la renovación de aire (Matallana y Montero, 2001).

Se pueden dividir los distintos sistemas de sombreado en dos grupos:

1. *Sistemas estáticos*. Son aquellos que una vez instalados sombrean al invernadero de una manera constante, sin posibilidad de graduación o control. Como ejemplo se encuentra el encalado o blanqueo de las paredes y mallas de sombreado.
2. *Sistemas dinámicos*. Son aquellos que permiten un control más o menos perfecto de la radiación solar en función de las necesidades climáticas de invernadero. Como ejemplo de este sistema se encuentran las cortinas móviles.

Abonado carbónico

En invernadero la cantidad de CO_2 durante la noche es alta, debido a la respiración de las plantas. Durante el día, la fotosíntesis hace que disminuya su concentración hasta el punto que limita la intensidad de producción de los cultivos. La ventilación facilita la renovación de aire del invernadero permitiendo que la concentración de CO_2 se aproxime a la del exterior.

Técnicas de enriquecimiento de CO_2

a) CO_2 puro

Es el método ideal, pudiendo aportarse cuando se quiera y en la cantidad deseada, solo limitada por la capacidad del equipo. Por desgracia, el costo del CO_2 puro es muy superior al de otros orígenes pero es el procedimiento más seguro (Díaz *et al.*, 2001).

b) Gases de combustión

El enriquecimiento carbónico puede realizarse mediante la combustión de hidrocarburos como propano, gas natural, queroseno y otros, pero plantean problemas como la generación de gases tóxicos (NO_x , CO y otros) por problemas en la combustión. Además, estos sistemas que están pensados para producir CO_2 y calor no son adecuados para zonas templadas ya que en estas, por lo general, no se requiere suministro de calor en las horas diurnas. Según Castilla (2005) las técnicas de aportación de CO_2 mediante gases de combustión son:

1. Enriquecimiento con pequeños quemadores

El uso de quemadores que envían los gases de combustión directamente dentro del invernadero puede tener como finalidad el aporte de CO₂ solamente o el aporte de este último y calefacción de aire simultáneos.

El empleo de pequeños quemadores suele ser poco preciso. Si se usan para calentar el aire, puede llevar a niveles de CO₂ muy altos, indeseables a veces, mientras que si no hay necesidad de calentar su empleo implica un aporte térmico no deseado.

2. Enriquecimiento con CO₂ desde caldera central

Cuando se produce CO₂ por combustión en caldera central, el destino del calor puede ser: 1) usarlo directamente en calefacción, 2) disiparlo en invernadero como medio de deshacerse de él (manteniendo una baja temperatura en tubería), 3) almacenarlo de día y emplearlo en calefacción de noche. Disiparlo al exterior (aire, agua freática) no es recomendable por su impacto ambiental.

Manejo de la luz

La habilidad de las plantas para modificar su patrón de desarrollo apropiadamente en respuesta a los cambios en el ambiente aéreo es una importante característica en su adaptación a hábitats específicos (Jones, 1992).

De acuerdo a Alpi y Tognoni (1999) este elemento del clima, la luz, debe relacionársele con su intensidad y duración, puesto que estas, junto con el fotoperiodo son en gran parte las que determinan el resultado de los cultivos en los invernaderos.

La importancia del papel que juega la luz en la producción hortícola está fuera de duda. Los invernaderos deben conectar el máximo de radiación solar durante todo el día en invierno y durante el resto del año deben aprovechar la radiación de la mañana y de la tarde, para lograr un balance térmico favorable y activar la fotosíntesis al transmitir parte del espectro visible (FAO, 2002).

La regulación de la luz es posible en invernadero para alterar la duración del día o para interrumpir la de la noche (mediante iluminación artificial o pantallas de oscurecimiento), para aumentar la fotosíntesis (complementando la luz natural y/o prolongando la duración del día con luz artificial y para disminuir la intensidad de luz (con pantallas de sombreo).

La iluminación artificial suplementaria es frecuente en invernaderos sofisticados para cultivos de alto valor añadido, en latitudes superiores a 40° N en América y 50° N en Europa. De acuerdo a Castilla (2005) la iluminación suplementaria tiene como finalidades principales el aumento de fotosíntesis (iluminación de día) y la prolongación del período de luz (fotoperíodo) que permiten incrementar la radiación acumulada diaria.

Dentro del invernadero, se han empleado técnicas para mejorar la disponibilidad de luz para el cultivo, como pintar de blanco las superficies de la estructura o emplear acolchado de suelo con lámina de plástico blanco u otros materiales reflectantes.

El encalado o blanqueo de cubierta es eficaz para reducir las temperaturas excesivas en época de alta radiación pero limita notablemente la radiación lo que implica reducción de potencial productivo (Morales *et al.*, 2000). Además el uso de esta técnica no permite un control adecuado de la reducción de la luz.

Para conseguir noches largas se emplean pantallas de oscurecimiento situadas sobre los cultivos, para obtener condiciones lumínicas de día corto. La transmisión de radiación solar en estas pantallas debe ser inferior al 0.1%, lo que se consigue con láminas de polietileno negro con tejidos negros (Bakker, 1995).

Control de humedad

La contribución más importante a los intercambios de vapor de agua en un invernadero la efectúa la transpiración del cultivo, aunque también tienen influencia la evaporación de agua desde el suelo húmedo, si se produce, y la condensación del vapor de agua en las diversas superficies del invernadero al enfriarse (Day y Bailey, 1999).

La influencia de la humedad no ha sido investigada con la misma profundidad que la de otros factores ambientales, quizás debido a la dificultad del control y de la medida precisa de esta variable (FAO, 2002).

De noche al enfriarse el invernadero, la humedad relativa (HR) crece pudiendo alcanzar la saturación y entonces se produce condensación sobre las superficies del invernadero, empezando por la más fría que es la cubierta. Si el invernadero tiene suficiente pendiente, el agua condensada resbalará sobre la

superficie del techo, por otro lado, con poca pendiente de cubierta goteará sobre el cultivo.

Si la cubierta es doble, la pared interior está menos fría (que con la cubierta simple) y tarda más en condensarse el vapor de agua.

De acuerdo a FAO (2002) la condensación que se forma en las plantas causa infecciones y difusión de enfermedades. En invernaderos sin calefacción este problema puede evitarse por:

- El aumento de la temperatura del aire y de las plantas.
- La mejora de la distribución del calor entre las plantas utilizando pantallas térmicas.
- Instalando sistemas de riego que ahorren agua.

En el caso de los invernaderos de plástico que no cuentan con calefacción la condensación puede reducirse de la siguiente manera:

- Para aumentar la temperatura del cultivo se pueden utilizar materiales de cubierta de baja transmitancia al infrarrojo o paredes dobles.
- Para evitar la caída del condensado sobre el cultivo se pueden utilizar productos con tratamiento antigoteo.
- Para reducir la zona de alta humedad ambiental se pueden defoliar las partes bajas de los tallos, para favorecer la circulación del aire y en caso de que se disponga de calefacción por aire, distribuir este en la base de las plantas por medio de tubos perforados de plástico.

La humedad relativa del invernadero tiende a hacer subir los niveles de saturación cuando la temperatura del aire exterior se aproxima o excede al aire interior y el potencial de condensación es nulo. En estas condiciones la HR se controla por ventilación hasta que cae por debajo del nivel requerido.

Durante los periodos cálidos la humedad relativa en el invernadero cae por debajo de los niveles deseados, para aumentarla se pueden usar las siguientes técnicas:

- Sombreo (el descenso de la temperatura del aire va compensado con al aumento de la humedad relativa).
- El riego por aspersion del suelo, de las plantas y de los materiales de cubierta con agua, con lo que se consiguen dos beneficios: aumentar la humedad y disminuir la temperatura.
- Mejorar el movimiento del aire. Con ello se consigue aumentar la evapotranspiración y la humedad relativa de los invernaderos cerrados.
- Utilizar pantallas de evaporación y ventiladores eléctricos. De esta manera se evapora agua y aumenta la humedad relativa.
- Quemar gas para producir CO_2 con lo que se añade humedad al aire interior.
- Utilizar nebulizadores que hacen bajar la temperatura y aumentan la humedad relativa.

Modelos para gestión climática de invernaderos

Dentro de los tipos de modelos de clima en invernaderos se pueden mencionar a los modelos de caja negra, los cuales están basados en el análisis de los datos de entrada y salida del proceso, sin embargo, estos por su naturaleza son de un bajo orden y no incorporan ningún conocimiento directo del sistema, por lo que no son adecuados para utilizarse en otras configuraciones o tipos de invernadero (Castañeda *et al.*, 2007). Se encuentran también los modelos basados en principios físicos, estos tienen la ventaja proporcionar una información más detallada del proceso en cuestión y permiten una mejora de la herramienta desarrollada de manera tal que se pueden utilizar en el diseño de algoritmos de control en distintas estructuras de invernadero (Guzmán *et al.*, 2005). Aunque los modelos que han despertado mayor interés son los de control de riego y análisis del potencial productivo de cultivos (Challa, 2001).

Definición y tipos de modelos

De acuerdo a Donald (1995) un modelo es una abstracción de la realidad que captura la esencia funcional del sistema, con el detalle suficiente como para que pueda utilizarse en la investigación y la experimentación en lugar del sistema real, con menos riesgo, tiempo y coste. En la medida que un modelo particular es una representación apropiada del sistema, puede ser una ayuda

muy valiosa para el análisis de políticas, la toma de decisiones y la resolución de problemas.

En invernaderos se pueden distinguir dos grupos de modelos: físicos, que se centran en el microclima del invernadero en función del clima exterior, y los fisiológicos que se centran en la planta y sus relaciones con el microclima del invernadero.

Según Castilla (2005) dentro de los tipos de modelos se pueden mencionar los siguientes:

- a) Modelo estocástico. Es un conjunto de ecuaciones de relacionan los diversos aspectos, por ejemplo, de pérdidas de calor o de ventilación, este puede considerarse también como un modelo estacionario, y ya que en estos modelos las ecuaciones están basadas en leyes físicas se denominan también mecanicistas.
- b) Modelo dinámico. Esta incorpora la variable tiempo y son necesarios cuando se representa un proceso cuya respuesta es lenta, estos son llamados también modelos estocásticos, el término estocástico o heurístico hace referencia a los medios empleados en la resolución de los modelos, así, los modelos heurísticos se resuelven por exploración o mediante prueba y error, mientras que los modelos estocásticos se resuelven empleando métodos estadísticos.

Etapas de desarrollo de un modelo

De acuerdo a Grant *et al.* (1997) se han identificado 4 etapas fundamentales en el proceso de desarrollo y uso de un modelo: a) desarrollo del

modelo conceptual, b) desarrollo del modelo cuantitativo, c) evaluación del modelo y d) uso del modelo.

Desarrollo del modelo conceptual

El objetivo de la primera etapa del análisis de sistemas es desarrollar un modelo conceptual o cualitativo del sistema de interés. En base a los objetivos del proyecto se debe decidir cuáles y como se relacionan entre ellos los componentes del mundo real que se desean incluir en el sistema de interés. Estos componentes y sus relaciones forman lo que se denomina modelo conceptual, y se representa gráficamente usando símbolos que indican la naturaleza específica de cada relación.

Desarrollo del modelo cuantitativo

Durante este proceso se traduce el modelo conceptual (representado grafica y verbalmente) a una serie de ecuaciones matemáticas que en conjunto forman el modelo cuantitativo. Posteriormente se resuelven todas las ecuaciones del modelo para cada periodo de tiempo durante el periodo completo de la simulación.

Evaluación del modelo

Castañeda (2007) realiza la calibración y validación del modelo utilizando para ello datos experimentales independientes. Los parámetros que se escogen para la calibración se seleccionan por inspección de papel, se seleccionan aquellos que son inciertos y sensibles y afectan en mayor medida el comportamiento del sistema. En la validación del modelo se verifica su

capacidad de estimación, obteniendo su nivel de ajuste al comparar sus predicciones contra datos reales considerando para ello datos diferentes a los utilizados para la calibración.

Uso del modelo

Esta etapa implica diseñar y simular con el modelo los mismos experimentos que se realizarían en el mundo real. Así entonces se analiza, interpreta y se comunican los resultados de las simulaciones usando los mismos procedimientos generales que se usarían para analizar, interpretar y analizar los resultados de un experimento realizado en el mundo real.

Modelación en el ambiente STELLA™

Los componentes de la modelación en STELLA se pueden describir de la misma manera en que se describe la clasificación de los componentes de un sistema planteada por Forrester (1961) y Grant (1986). En STELLA™ tal como en la clasificación de los componentes hecha por los autores antes mencionados se pueden describir al menos siete categorías diferentes de componentes: variables de estado, variables externas, constantes, variables auxiliares, transferencias de material, transferencias de información y fuentes y sumideros (Figura 2.5).

Variables de estado

Según Grant (1997) estas representan puntos de acumulación del material en el sistema. Si se estuviera interesado en desarrollar un modelo del flujo

energético en un ecosistema, se podría incluir tres variables de estado para representar la energía contenida en las plantas, en los herbívoros y en los carnívoros.

Variables externas

Las variables externas afectan el sistema pero no están afectadas por el resto del sistema. Por ejemplo, si se quisiera representar la transferencia de energía del sol a las plantas en función de la precipitación, se puede dar cuenta de que la precipitación no está afectada por las plantas ni por ningún otro componente del sistema.

Constantes

Las constantes corresponden a valores numéricos que describen aquellas características del sistema que no cambian bajo ninguna de las condiciones simuladas por el modelo.

Variables auxiliares

Las variables auxiliares se crean para representar cálculos intermedios realizados para determinar el valor de alguna otra variable, y representan conceptos que se quiere identificar explícitamente en el modelo. Las variables auxiliares también se usan para representar el resultado final de cálculos de interés en el modelo.

Transferencias de material

Una transferencia de material representa el movimiento de material durante un intervalo de tiempo específico. Este movimiento puede ser entre: dos variables de estado, una fuente y una variable de estado o una variable de estado y un sumidero.

Fuentes y sumideros

Las fuentes representan puntos de origen del material que entra al sistema y los sumideros representan los puntos de salida de material del sistema.

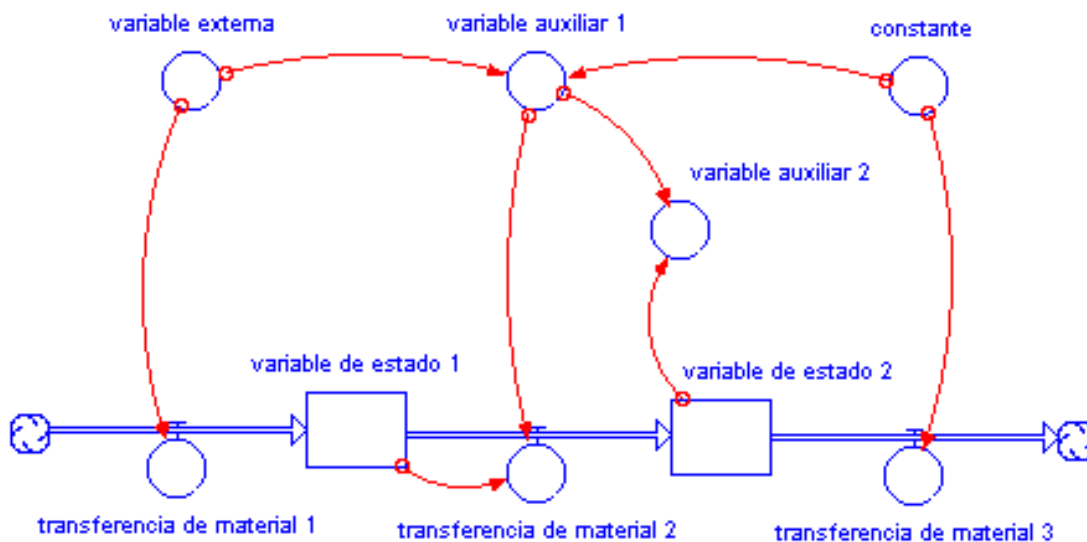


Figura 2.5 Gráfico de los distintos componentes en el software STELLA™.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología del desarrollo de esta investigación consistió en cuatro etapas: la primera fue el establecimiento de las ecuaciones que conforman el modelo, dichas ecuaciones están basadas en el modelo desarrollado por Boulard y Baille (1993) incluyendo además las consideraciones hechas por Sbita *et al.* (1998), Sbita *et al.* (1999) y Bouzo *et al.* (2006), posteriormente se realiza el traslado del modelo al programa STELLA™ v9.0.2, en la segunda etapa se efectuó durante varios días el registro de los datos climáticos en el interior y exterior de un invernadero en producción, en la tercera se efectuó la calibración del modelo y en la cuarta su validación.

El modelo incluye las variables más importantes, aquellas que se cree influyen en mayor medida en las condiciones del microclima del invernadero. En este caso se trabaja despreciando el efecto chimenea así como el efecto de la evaporación del suelo y la condensación sobre el material de cubierta en el techo.

Descripción del modelo

La base para el modelo lineal de balance de energía (Boulard y Baille, 1993) es el siguiente:

$$\eta G_0 - K_s \Delta T - K_l \Delta e - K_c \Delta T - Q_m = 0 \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (1)$$

Donde los parámetros considerados son: un coeficiente de utilización de la energía solar, η , que toma valores de 0.65 para cubierta simple y 0.6 para cubierta doble (Pilatti, 1997); la radiación solar global en el exterior, G_0 ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), la diferencia entre la temperatura interior y exterior del invernadero, ΔT (K); la diferencia de presión de vapor de agua entre el interior y el exterior, Δe (Pa) y el calor almacenado por el suelo del invernadero, Q_m ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$).

El primer término de la ecuación 1 representa la ganancia de energía radiante, los dos siguientes el intercambio de calor sensible y latente por ventilación, los coeficientes K_s y K_l son proporcionales a la tasa de intercambio de aire en el invernadero. El cuarto representa la transferencia de calor sensible de la superficie de la cubierta e incluye las pérdidas por convección y radiación. Un quinto término que se podría incluir a la ecuación original de Boulard y Baille (1993) es el de Q_{calef} que representa la energía calorífica proporcionada por el sistema de calefacción del invernadero si es que cuenta con ello, lo cual fue así en este caso.

El invernadero cuenta con ventilación natural de tipo cenital, en base a ello se estiman las renovaciones de aire horarias (N). Para dicho cálculo se hace uso de una ecuación propuesta por Sbita *et al.* (1998):

$$N = \frac{3600}{h} \frac{s}{2} A_l \sqrt{C_w} U + N_0 \quad (\text{h}^{-1}) \quad (2)$$

U representa la velocidad del viento exterior ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), s representa la relación entre el área de las aperturas de las ventilas y el área de suelo cubierta por el invernadero ($\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$); h la altura promedio de las aberturas de las ventilas con respecto del suelo; A_l coeficiente aerodinámico y C_w coeficiente de viento. N_0 representa la ocurrencia de ventilación (o fugas) cuando las ventilas están cerradas, $s=0$. Es también agregado cuando la velocidad del viento es menor a $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Bouzo *et al.*, 2006). Los valores del parámetro N_0 son los que se muestran en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 Valores de $A\cdot C_w^{0.5}$ y N_0 para condiciones de ventilas abiertas y cerradas (Sbita *et al.*, 1998).

Invernadero abierto	Invernadero cerrado
$A\cdot C_w^{0.5}=0.157\pm 0.026$	$C_w^{0.5}=0.18\pm 0.032$
$N_0= 4.7 \pm 1.5$	$N_0= 0.1 \pm 0.017$

Los coeficientes y variables que se calculan a partir de los datos de entrada son:

$$K_s = \frac{\rho C_p V_g N}{3600 S_g} \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}) \quad (3)$$

ρ representa la densidad del aire ($1.29 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$); C_p es el calor específico del aire a presión constante ($1005 \text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$); V_g el volumen del invernadero (m^3) y S_g es la superficie de suelo cubierta por el invernadero (m^2).

$$Kl = \frac{F_c \rho \lambda V_g N}{3600 S_g} \quad (\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Pa}^{-1}) \quad (4)$$

Donde F_c es el factor de conversión entre el contenido de vapor y la presión de vapor del agua del aire ($6.25 \cdot 10^{-6} \text{ kg}_w \cdot \text{Kg}_a \cdot \text{Pa}$) y λ es el calor latente de vaporización del agua ($2500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

$$Kc = A + B * U \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (5)$$

A es un coeficiente que toma valores de 6 para cubierta simple y 4 para cubierta doble y B toma valores de 0.5 en cubierta simple y 0.2 para cubierta doble.

El invernadero cuenta con cuatro calefactores (N_{calef}) de combustión indirecta, el aire caliente se distribuye mediante mangas de plástico flexible perforada colocadas sobre el suelo, el calor que este aporta está representado por Q_{calef} :

$$Q_{calef} = \frac{N_{calef} * T_{operacion} * C_{calorifica}}{S_g} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (6)$$

Para su estimación se considera el tiempo total que permanece encendido el equipo en cada hora, $T_{operación}$ (hr); la capacidad calorífica del equipo, $C_{calorifica}$ (J); el área de suelo cubierta por el invernadero y suponiendo que el calor se distribuye de manera uniforme sobre dicha área.

La variable Q_m se calcula con la ecuación utilizada por Sbita *et al.* (1998).

$$Q_m = \eta F_s G_0 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (7)$$

Donde F_s representa la fracción de radiación absorbida por el suelo.

El balance de vapor de agua es calculado con la siguiente ecuación (Jolliet, 1994):

$$\alpha \eta G_0 + b \delta_{(T_e)} \Delta T - (b + Kl) \Delta e + b D_{(e)} + \lambda W = 0 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (8)$$

α es el coeficiente de absorción de la radiación por el dosel de las plantas (0.95-0.97), $\delta_{(T_e)}$ es la pendiente de la curva de vapor a saturación a la temperatura externa del invernadero ($\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$), $D_{(e)}$ es el déficit de presión de vapor al exterior del invernadero (Pa), τ la transmitancia del material de cubierta y λW es la energía disipada debido a la evaporación de la fracción de agua agregada a través de la nebulización ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

Se hace el cálculo de los parámetros a y b , donde a caracteriza la influencia de la radiación solar sobre la transpiración y b caracteriza la influencia del déficit de saturación sobre la transpiración en el cultivo del tomate, esto se hace mediante las siguientes ecuaciones de acuerdo a Jolliet (1994):

$$a = 0.154 \ln(1 + 1.1 * IAF^{1.13}) \quad (\text{Adimensional}) \quad (9)$$

$$b = \frac{1.65 IAF(1 - 0.56 e^{\left(\frac{-\eta G_0}{13}\right)})}{\gamma} \quad (\text{Adimensional}) \quad (10)$$

Los dos parámetros anteriores dependen de IAF (índice de área foliar) del cultivo. Se estimó el área de las hojas de 20 plantas seleccionadas al azar por la ecuación propuesta por Astegiano *et al.* (2001) y se calculó el IAF . Para ello

se obtiene un promedio general AF_m considerando la separación entre líneas (SL) y entre plantas (SP).

$$AF = 0.34 (Largo_{maximo} \times Ancho_{maximo}) - 9.3 \quad (m^2) \quad (11)$$

$$IAF = AF_m / (SL \times SP) \quad (m^2 \cdot m^{-2}) \quad (12)$$

A partir de las ecuaciones de balance de energía y de vapor de agua (1 y 8) se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, los cuales permiten calcular los diferenciales de temperatura y presión de vapor entre el interior y exterior del invernadero (ΔT y Δe) tal como se muestra en las ecuaciones 17 y 18.

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{b+kl}{kl}\right)(\eta G_0 - Q_m) - bD_{(e)} - \alpha \times \eta G_0 - \lambda W}{b\delta_{(T_e)} + \left(\frac{(b+kl)(k_c+k_s)}{kl}\right)} \quad (K) \quad (13)$$

$$\Delta e = \frac{\eta G_0 - Q_m + \Delta T(k_c+k_s)}{kl} \quad (Pa) \quad (14)$$

Posterior a la corrida del modelo y con la finalidad de mejorar el ajuste entre los datos estimados y los datos medidos se procedió a realizar adecuaciones al modelo anteriormente descrito y ampliar su aplicación también a periodos nocturnos, característica con la que no cuenta.

Las modificaciones que se efectuaron al modelo anterior son las siguientes:

Incluir una relación empírica para estimar el flujo de calor del perfil superior del suelo hacia el interior del invernadero, ya que es la principal fuente de

aportación de calor al invernadero durante la noche (Hölscher, 1989), dicho parámetro se agrega a la ecuación 1 como una entrada de energía:

$$Q_{suelo} = \frac{G_{0\ max}}{F_r} \quad (W \cdot m^{-2}) \quad (15)$$

En donde $G_{0\ max}$ será la radiación máxima promedio horaria registrada para un día específico, F_r es un factor que se determinó de manera experimental (Jabulani y Zermeño, 2003) y que representa la relación del flujo de calor durante el día con respecto al que ocurre durante la noche. Para este caso el resultado de esa relación fue de $F_r=33$.

Se hace una modificación en el cálculo de N , variando el valor de N_0 de acuerdo al nivel de apertura de las ventilas. Cuando las ventilas estén abiertas al 100% se consideran los mismos valores de N_0 del Cuadro 1 y el valor disminuirá en la misma proporción en que se cierren dichas ventilas.

Además se realizó una modificación a la ecuación 2 recomendada por Sbita *et al.* (1998), en la que se incluyó el parámetro s_0 ($m^2 \cdot m^{-2}$) el cual representa la relación del área de las fugas en el material de cubierta y el área de la superficie de suelo cubierta por el invernadero.

$$N = \frac{3600}{h} \frac{s_0 + s}{2} A_1 \sqrt{C_w} U + N_0 \quad (h^{-1}) \quad (16)$$

Se agregó un coeficiente de inercia térmica ($F_{inercia}$) al cálculo final de ΔT para amortiguar los incrementos acentuados de temperatura cuando las ventilas se encuentran cerradas en presencia de radiación solar (al amanecer y al

atardecer), ya que el modelo no considera los elementos de almacenaje térmico los cuales describen los efectos retardados de condiciones previas (Hölscher, 1989) .

$$\Delta T_1 = F_{\text{inercia}} \cdot \Delta T \quad (\text{K}) \quad (17)$$

Otra propuesta de adaptación es un factor de sombreado C_s que se agrega a la ecuación 7, esta representa la relación entre la sombra proyectada por las plantas sobre el área de suelo del invernadero:

$$Q_m = \eta F_s G_0 C_s \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (18)$$

Localización del área de pruebas.

El invernadero en el cual se realizó el registro de las correspondientes variables climáticas necesarias para parametrizar el modelo se ubica en el Rancho El Lucero, en Tlahualilo, Durango, México a $103^\circ 23''$ longitud oeste y $25^\circ 52''$ latitud norte.

Descripción del cultivo y su manejo

El cultivo de tomate se encontraba en la etapa de quinto racimo, las líneas separadas a 2.02 m y las plantas a 0.31 m en doble hilera, para una densidad de población de 31 903 plantas ha^{-1} . Las plantas estaban instaladas en canaletas teniendo como sustrato una mezcla de fibra de coco (70%) y perlita (30%), la fertilización y riego se realizan por medio de un sistema automatizado.

Dicho cultivo es de la variedad Sahel de crecimiento indeterminado. La operación de la fertirrigación, aspecto de suma importancia para la determinación de las condiciones microclimáticas del invernadero y principalmente de la HR, era realizada por personal designado especialmente para dicha actividad, su programación es mostrada en el Cuadro 3.2. En este último se observa el momento exacto de inicio de la acción y su respectiva duración, además de apreciarse también la cantidad de agua aplicada en ese intervalo de tiempo y el porcentaje de agua que se drena y que es cuantificada manualmente al final de la línea de riego por parte del personal.

Cuadro 3.2 Programación de la fertirrigación diaria en el invernadero donde se realizaron las mediciones de las variables climáticas para la evaluación del modelo.

Inicio del riego	Duración del riego (min)	Cantidad de agua regada (m ³)
7:30 a.m.	8	5.33
8:45 a.m.	4	2.66
10:00 a.m.	3	2
11:15 a.m.	3	2
12:15 p.m.	3	2
13:15 p.m.	3	2
14:30 p.m.	3	2
15:45 p.m.	3	2
17:00 p.m.	3	2

En cuanto a aspectos generales de las labores en el cultivo aunque hechas antes de dar inicio al registro de las variables climáticas se encuentran: la poda, polinización utilizando abejorros, fertirriego, aplicación de pesticidas mediante bombas manuales (mochilas), deshoje y cosecha del producto, esta última se realiza en el momento del inicio del registro de los datos. La manera en cómo se encontraba el arreglo del cultivo se muestra en la Figura 3.1.



Figura 3.1 Cultivo de tomate en el invernadero del rancho El Lucero sobre fibra de coco mezclada con perlita como sustrato.

Las plantas alcanzaron una altura promedio al momento de iniciar el registro de datos de 2.30 m, esto mediante el tutorado tal y como lo muestra la figura 3.1.

Descripción del invernadero utilizado para evaluar el modelo.

Las características del invernadero (Figura 3.2) son: antigüedad de cinco años, 80 m de ancho por 120 m de largo, altura cenital de 6.27 m, tipo túnel modificado multicapilla (10 capillas por nave), con policarbonato de doble capa en las paredes y polietileno de doble capa en el techo, dispone de ventilas cenitales (doble ventila) y laterales. Durante el desarrollo de la investigación solo estuvieron operando las ventilas cenitales, funcionando de manera automatizada en base a umbrales de velocidad y dirección del viento y a humedad relativa. Los cambios en la apertura de las ventilas fueron registrados manualmente durante el transcurso del día debido a que no se tenía acceso al dispositivo automático, estas ventilas contaban con tres niveles de abertura diferentes, dichos datos se muestran en el Cuadro 3.3. Al ser periodo de invierno las ventilas se cerraban a las 16 hr y se abrían entre las 8 y 10 hr.

Cuadro 3.3 Valores de área de las aberturas de las ventilas y de la relación de área de abertura de ventilas con el área del suelo cubierta por el invernadero (s), para los tres niveles de abertura de ventilas.

Nivel de la abertura	Área total de las aberturas (m ²)	S (m ² ·m ⁻²)
1	988	0.1029
2	1482	0.1543
3	2099.5	0.2186

En la Figura 3.2 se muestran aspectos generales de la estructura del invernadero. Además de la conformación y localización de las ventilas sobre la estructura.

Registro de datos y variables climáticas a medir

El registro de los datos climáticos se efectuó en el interior y exterior del invernadero en producción y se realizó del 29 de diciembre de 2008 al 14 de enero de 2009. Se dispuso de dos estaciones, Davis Vantage Pro2 de fabricación estadounidense, una colocada en el interior a 2.30 m justo al centro del invernadero y otra al exterior del invernadero a 2 m de altura, con ellas se registró la radiación solar y la precipitación (Figura 3.3).

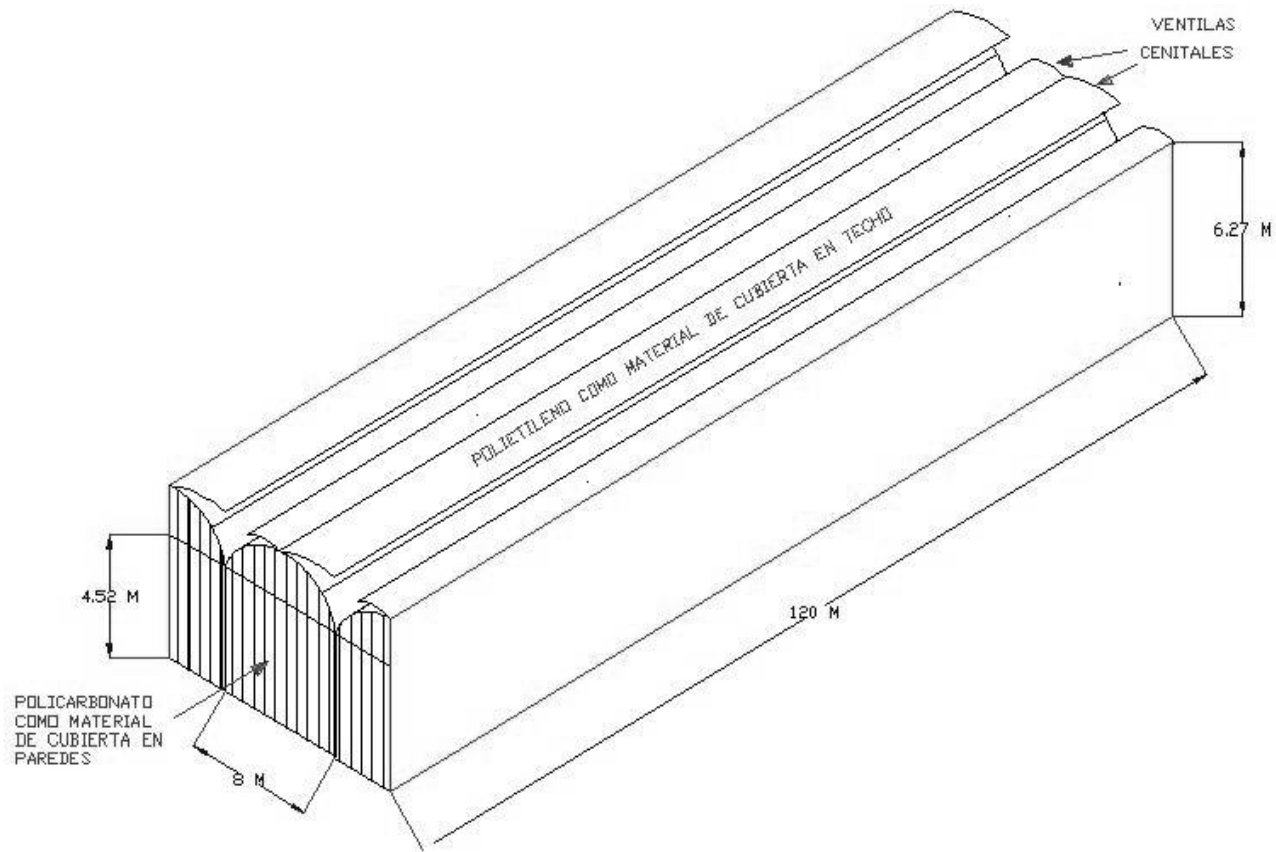


Figura 3.2 Sección del invernadero que muestra las dimensiones y características más generales de la estructura (Figura no a escala).

También se utilizaron dos estaciones Eldar Shany instaladas al interior y exterior, la externa estuvo colocada a 7 m y la interior a 2.30 m con respecto del suelo del invernadero, con ellas se registró la dirección y velocidad del viento al exterior, y la temperatura del aire y la humedad relativa al interior y exterior. En las estaciones Davis, con los datos de radiación solar se estimó el coeficiente de transmitancia (τ) de la cubierta. Ambos tipos de estaciones registraron los datos a intervalos de 5 minutos, con ello se estima el promedio horario para así ser utilizados en el modelo.



Figura 3.3 Vista del invernadero, junto con la estación climática Davis Vantage Pro utilizada en la medición de la radiación solar global.

Evaluación del modelo

Posterior al registro se realiza el análisis de los resultados arrojados por el modelo corrido en STELLA™, de dichos resultados se obtienen de los coeficientes de determinación (R^2) producto de una regresión lineal que determina el ajuste entre los datos medidos y los calculados y la determinación de la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) de acuerdo a Gijssman *et al.* (2002). Los parámetros del modelo para su calibración se eligen en base a cuáles de ellos afectan más el comportamiento del sistema (Castañeda *et al.*, 2006; Aracil, 1995). Para realizar la calibración se utilizan datos de los días 8 y 9 de enero de 2009. Para la realización de la validación se corre el modelo con datos de días diferentes a los utilizados para la calibración, para evaluar la precisión de la estimación del modelo se obtienen los mismos indicadores estadísticos que se obtuvieron en la calibración, para dicha etapa se utilizan los datos de los días 10 y 13 de enero de 2009.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las graficas a y b de la Figura 4.1 se observa la evolución horaria de la radiación solar en el interior y exterior del invernadero, mediante estos datos se calcula el valor τ (transmitancia del material de cubierta del invernadero) el cual fue de 0.55, este es similar al propuesto por Pilatti (1997) para cubierta doble.

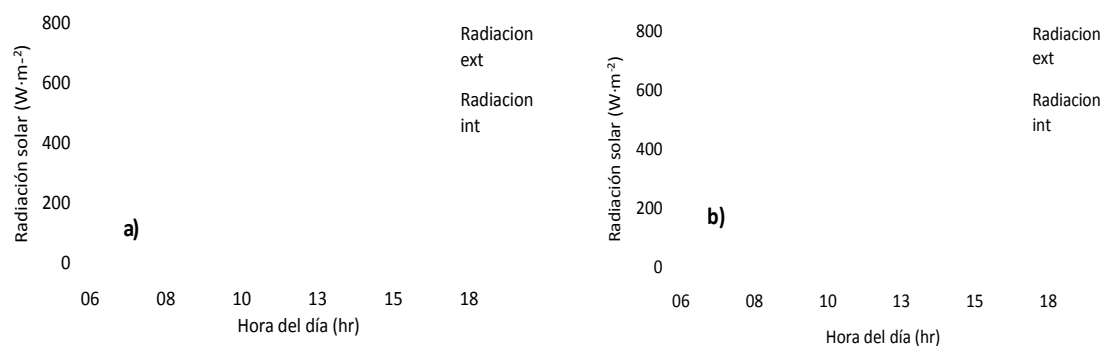


Figura 4.1 Radiación solar registrada al interior y al exterior del invernadero los días 8 y 9 de enero de 2009. (a y b respectivamente).

Modelo base

La Figura 4.2 muestra los valores horarios medidos y estimados de la temperatura del aire y humedad relativa generados por el modelo de Boulard y Baille (1993). El día 10 se observa que durante el periodo de las 0 a las 7 hr el modelo subestima la temperatura del aire, posteriormente al momento de la aparición de la radiación solar (8 hr) cuando las ventilas se encuentran todavía

cerradas se detecta incremento de 4.1 °C en la temperatura estimada, en el resto del día los valores de temperatura estimada tienen un ajuste cercano a los valores medidos, excluyendo un periodo de dos hora donde se observa que el modelo sobrestima la temperatura del aire a partir que las ventilas se cierran por la tarde (16 hr) observando un incremento de 6.6 °C. En el día 13 se observó el mismo comportamiento, en la noche el modelo subestima la temperatura, por la mañana cuando las ventilas se encuentran todavía cerradas en presencia de radiación solar se denota un incremento de 7.4 °C y durante la mayor parte del día se observa subestimación de la temperatura a excepción del periodo en donde se cierran las ventilas denotándose elevada sobrestimación, con un incremento de 18.1 °C.

La subestimación del modelo durante el periodo nocturno es debido a que en la propuesta original de Boulard y Baille (1993) solo se considera a la radiación solar como única entrada de energía al sistema invernadero, resultando que durante el periodo nocturno, el modelo estime reducción progresiva de la temperatura del aire, tendiendo a igualarse a la temperatura exterior de las 0 a las 6 hr del día siguiente (Figura 4.2). Para corregir la subestimación de la temperatura durante la noche se efectuó una adecuación al modelo, agregando al sistema el calor que el suelo absorbe en el día y que libera por la noche (Q_{suelo}), dicho término fue descrito en la ecuación 15.

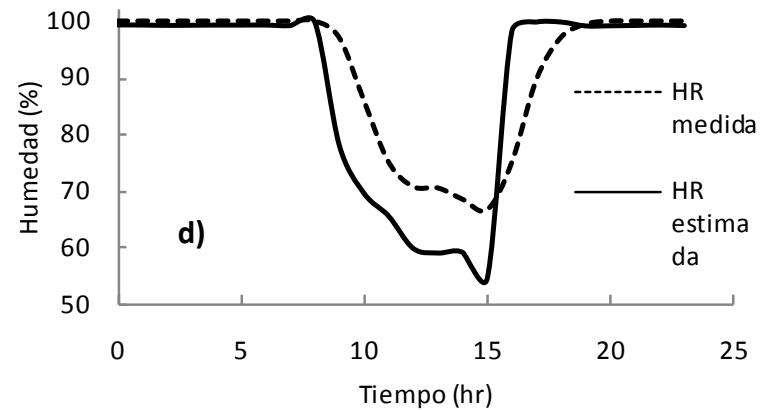
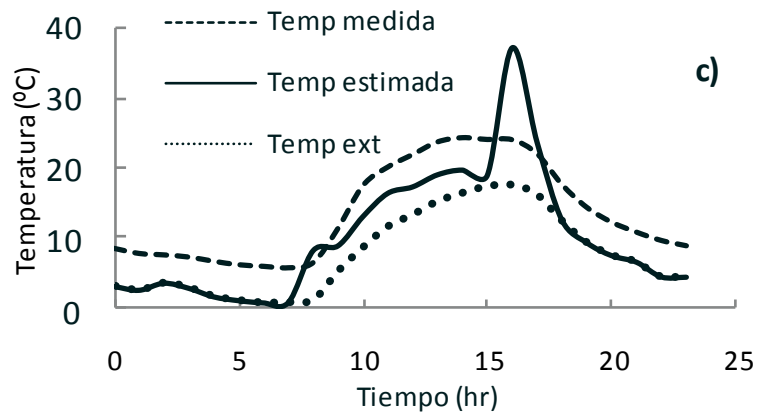
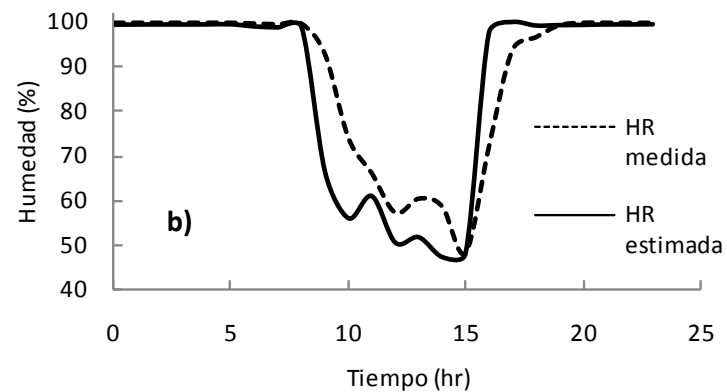
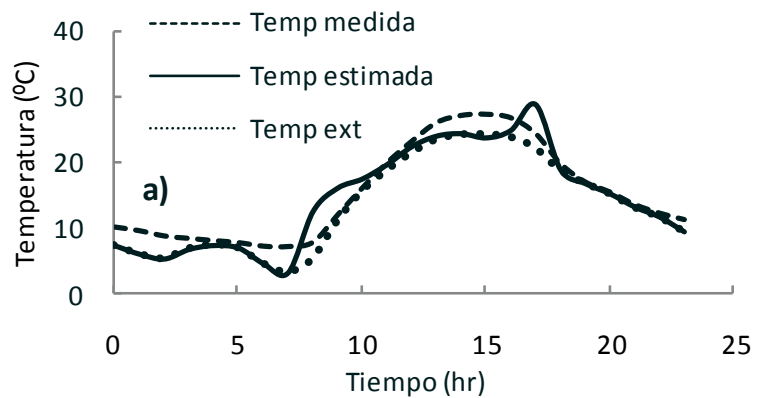


Figura 4.2 Valores horarios medidos y estimados de la temperatura y humedad relativa al interior del invernadero y de la temperatura exterior en los días 10 (a y b) y 13 (c y d) de enero de 2009 de acuerdo al modelo original.

El fuerte incremento de temperatura observado por la mañana (entre las 7 y 8 hr) y en la tarde (de las 16 hr a las 18 hr) cuando las ventilas están cerradas y hay presencia de radiación solar es debido a que la renovación horaria de aire (N) es reducida a su mínimo valor, disminuyendo los coeficientes de transferencia de calor sensible (K_s) y calor latente (K_l), quienes a su vez determinan un fuerte incremento de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero (ΔT). El modelo no considera la inercia térmica al interior del invernadero (Díaz *et al.*, 2001) que impide los cambios acentuados de temperatura del aire. Para corregir los incrementos en la temperatura, se propuso la modificación del cálculo y uso de N (renovaciones horarias) descritos anteriormente en la ecuación 16, además de incluir un factor de inercia térmica ($F_{inercia}$) que tendrá la función de retardar la estimación del calentamiento y enfriamiento del sistema de manera inmediata en las primeras 2 horas de radiación por la mañana mientras las ventilas permanecen todavía cerradas y en la primera y segunda hora a partir del cierre de ventilas por la tarde cuando aún existe presencia de radiación, dicho término es descrito en la ecuación 17. Se establecieron para este caso los valores de $F_{inercia} = 0.8$ y 0.6 para la primera y segunda hora respectivamente.

En lo que respecta a la humedad relativa en los dos días el modelo subestima los valores en la mayor parte del día y al atardecer los sobrestima (de las 16 hr a las 19 hr). El modelo no considera los aportes debido a la evaporación desde el sustrato, esto podría explicar la subestimación de la humedad relativa (HR). También influye el hecho de que el valor de la presión

de vapor de agua entre el interior y el exterior (Δe) está en función de ΔT , provocando que los posibles errores relativos de este último afecten a Δe (Castañeda *et al.*, 2007). Por lo cual al mejorar el ajuste en la temperatura del aire se podría obtener mejor ajuste en la HR.

La regresión lineal obtenida entre los valores medidos y estimados para las dos variables climáticas muestra un ajuste aceptable para la temperatura y en menor grado para la humedad relativa. El resultado del nivel de ajuste observado en el Cuadro 4.1 es similar al encontrado por Sbita *et al.* (1998) y Bouzo *et al.* (2006).

Para la calibración del modelo base se ajustó únicamente el valor de η (coeficiente de utilización de la energía solar) mediante las salidas del modelo hasta obtener un ajuste aceptable entre los valores medidos y estimados (Sbita *et al.*, 1998), para este caso el valor encontrado fue de $\eta=0.55$.

Cuadro 4.1 Ecuaciones de regresión lineal para valores medidos (x) y estimados (y) de temperatura del aire y humedad relativa con su respectivo coeficiente de determinación (R^2) y raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) para los días 10 y 13 del mes de enero de 2009. Valores estimados con el modelo base.

	1er día	2do día
Temperatura		
Ecuación de regresión	$y=1.010x-1.199$	$y=1.164x-5.532$
Coeficiente R^2	0.899	0.826
RMSE	2.590	9.232
Humedad relative		
Ecuación de regresión	$y=1.0875x-9.874$	$y=1.180x-18.95$
Coeficiente R^2	0.819	0.764
RMSE	5.074	8.800

Modelo modificado

En la Figura 4.3 se observan los valores de temperatura y humedad relativa simulados por el modelo modificado. La correspondiente comparación entre ambas corridas del modelo para su validación se realiza para los mismos días, es decir, para los días 10 y 13 de enero de 2009.

Se observa además en la Figura 4.3 que con las modificaciones efectuadas en el modelo se eliminaron los incrementos acentuados de

temperatura cuando las ventilas estuvieron cerradas en presencia de radiación solar, además las diferencias entre la temperatura estimada y medida son menores en el transcurso del día (-2 °C en promedio). En cuanto a la HR gráficamente no se observa una mejora relevante. El ajuste entre las variables medidas y estimadas se presenta en el Cuadro 4.2, observándose una mejora en el ajuste en la temperatura (R^2 de 0.93 y 0.98) con respecto al obtenido con el modelo original (R^2 de 0.89 y 0.82). En cuanto a la HR no hubo mejora significativa en el ajuste.

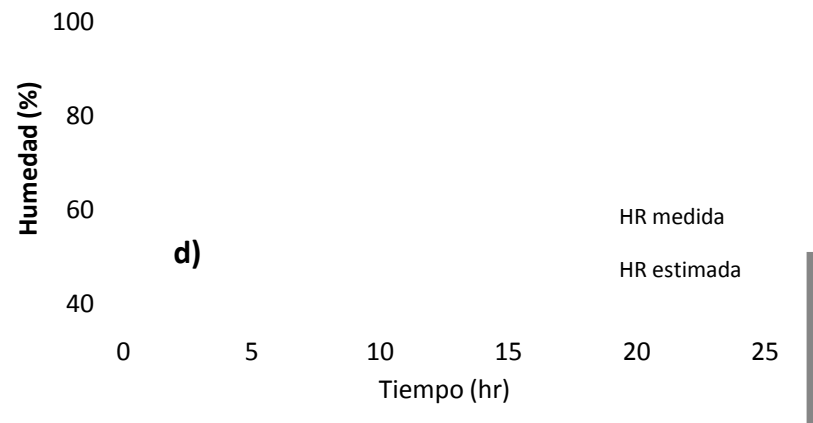
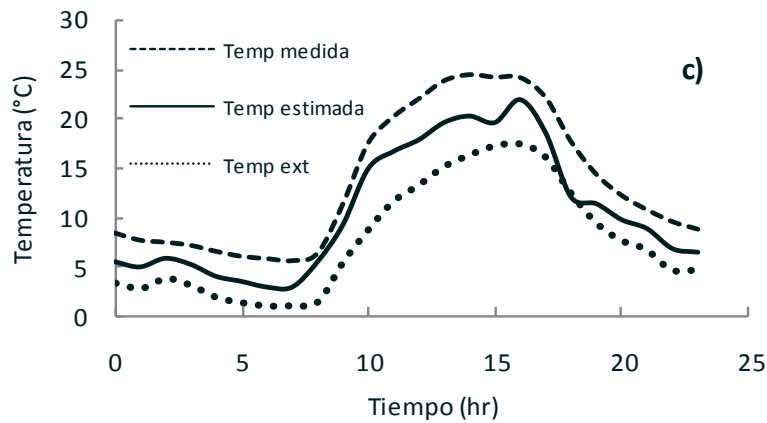
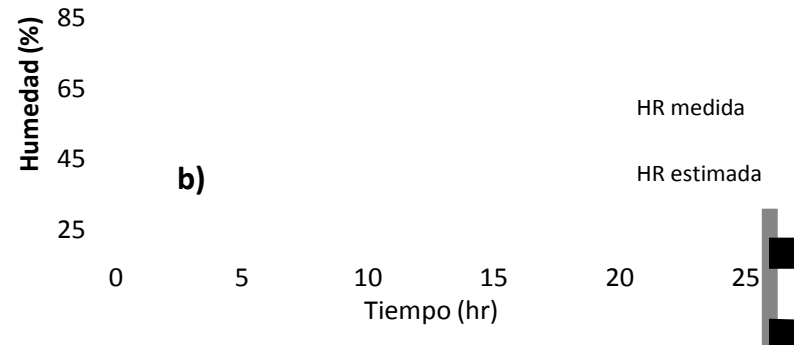
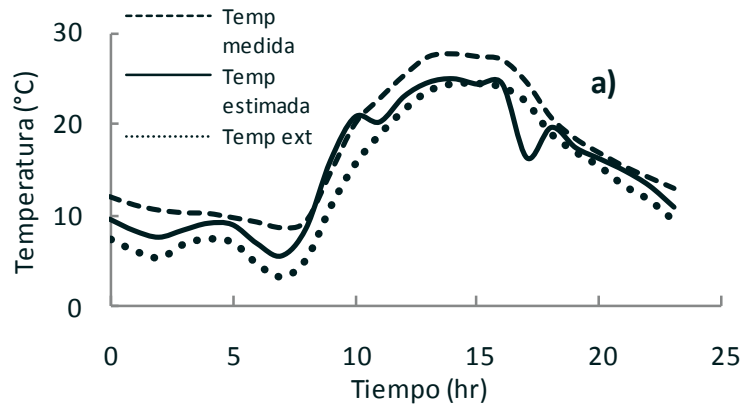


Figura 4.3 Valores horarios medidos y estimados de la temperatura y humedad relativa al interior del invernadero y de la temperatura exterior en los días 10 (a y b) y 13 (c y d) de enero de 2009 de acuerdo con el modelo modificado.

Cuadro 4.2 Ecuaciones de regresión lineal para valores medidos (x) y estimados (y) de temperatura del aire y humedad relativa con su respectivo coeficiente de determinación (R^2) y la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) para los días 10 y 13 del mes de enero de 2009. Valores estimados mediante el modelo modificado.

	1er día	2do día
Temperatura		
Ecuación de regresión	$y=0.934x-1.199$	$y=0.900x-5.532$
Coeficiente R^2	0.930	0.984
RMSE	2.648	3.112
Humedad relative		
Ecuación de regresión	$y=1.097x-9.874$	$y=1.180x-18.95$
Coeficiente R^2	0.905	0.703
RMSE	11.285	13.036

Sbita *et al.* (1998) lo mismo que Bouzo *et al.* (2006) encontraron un comportamiento similar aunque ambos en condiciones y conformaciones de invernadero diferentes, en el caso de este último autor, reporta que las temperaturas más bajas del modelo se daban después de cerrar las ventilas ratificando que el modelo es muy sensible a dicho factor. La subestimación de la temperatura que se observa durante el transcurso del día puede ser reducida

reconsiderando los valores del coeficiente de transferencia de calor del material de cubierta (K_c), ya que como lo señala Díaz *et al.* (2001) la extensa combinación de aditivos dan a los materiales de cubierta propiedades muy particulares, haciéndolos capaces de modificar de manera significativa el entorno que protegen.

Así mismo la subestimación de la temperatura puede ser influida en cierto grado por la altura de colocación del sensor (2.3 m), ya que cuando solo existe ventilación cenital la temperatura del aire se incrementa con respecto a la altura del suelo, originado por movimientos convectivos que hacen elevar el aire caliente y descender el aire frío (Castilla, 2005). Por lo anterior para futuras investigaciones sería recomendable evaluar el modelo considerando también la instalación de sensores a la altura del cultivo y en diferentes ubicaciones dentro del invernadero para determinar si es más representativo.

Además, se sugiere considerar los cambios en la densidad del aire (ρ) ya que esto influye en el cálculo de k_l y k_s , y estos a su vez en el cálculo de la temperatura del aire, esto podría permitir mejorar el ajuste del modelo de clima (Leal, 2006).

Para corregir la subestimación de la HR se recomienda que debe ser considerada la evaporación desde el sustrato para con ello elevar los valores de HR.

En resumen, se observa buena exactitud por parte del modelo para estimar la temperatura ($R^2=0.93$ y 0.984) y en menor grado en el caso de la humedad

relativa ($R^2=0.9$ y 0.703) para un invernadero tipo túnel modificado multicapilla en condiciones de estación invernal para la zona norte de México.

V. CONCLUSION

Se evaluó un modelo para estimar las condiciones de humedad relativa y temperatura en el interior de un invernadero en periodo invernal, el ajuste para temperatura del aire se mejoró con las adecuaciones hechas al modelo, las cuales consistieron en considerar el calor aportado por el suelo, un factor de inercia térmica para el sistema invernadero y una modificación al procedimiento para la determinación de las renovaciones de aire, dichas adecuaciones no reflejaron una mejora en el ajuste de la humedad relativa. Para mejorar aún más la estimación de la temperatura se propone el incluir modificaciones al coeficiente de transferencia de calor del material de cubierta y considerar los cambios en la densidad del aire y para HR considerar la evaporación desde el sustrato.

El modelo funciona con pocas variables de fácil obtención. Con ello se consigue una herramienta capaz de ser utilizada como apoyo en la toma de decisiones en cuanto a la conveniencia de instalar invernaderos y para la estimación del comportamiento de su microclima.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Alpi, A. y Tognoni, F. 1999. Cultivo en invernadero. Ed. Mundi-Prensa. 3ª edición. 345 p.
- Aracil, J. 1995. Dinámica de sistemas. Isdefe. Madrid, España. 79 p.
- Astegiano, E.; Favaro, J.; Bouzo, C. 2001. Estimación del área foliar en distintos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) utilizando medidas foliares lineales. Invest. Agr. Prod. Veg. 16(2): 249-256.
- Bakker, J. C. 1995. Greenhouse climate control: Constraints and limitations. Acta Horticulturae. 399:25-35.
- Beytes, C. 2003. Ball redbook: greenhouses and equipment. Vol. 1. Ball Publishing. 17th ed. Illinois, USA. pp: 1-22.
- Boulard, T.; Baille, A. 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. Agric. For. Meteorol. 65: 145-157.
- Bouzo, C.; Gariglio, N.; Pilatti, R.; Grenón, D.; Favaro, J.; Bouchet, E.; Freyre, C. 2006. Inversim: a simulation model for greenhouse. Acta Horticulturae 719: 271-278.

- Breuer, J. J. G. Y Knies, P. 1995. Ventilation and cooling. En: Greenhouse climate control: An integrated approach. Wageningen Pers. Netherlands. pp: 179-185.
- Castañeda, R.; Ventura, E.; Peniche, R.; Herrera, G. 2007. Análisis y simulación del modelo físico de un invernadero bajo condiciones climáticas de la región central de México. *Agrociencia* 41: 317-335.
- Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico: tecnología y manejo. Ed. Mundi-Prensa. España. 459 p.
- Challa, H. 2001. Modelling for present production problems in greenhouse horticulture in mild winter climates. *Acta Horticulturae* 559:431-440.
- Day, W. y Bailey, B. J. 1999. Physical principles of microclimate modification in: Greenhouse ecosystems. Ed. Elsevier. Amsterdam. Netherlands. pp: 71-96.
- Díaz, T., Espí, E., Fontecha, A., Jiménez, J. Y Salmerán, A. 2001. Los filmes plásticos en la producción agrícola. Ed. Mundi-Prensa. 315 p.
- Donald, R. D. 1995. Dinámica de sistemas aplicada. Ed. Isdefe. España. 199 p.
- Fatnassi, H.; Boulard, T.; Lagier, J. 2004. Simple indirect estimation of ventilation and crop transpiration rates in a greenhouse. *Biosystem Engineering* 88(4): 467-478.

- Forrester, J. W. 1961. *Industrial Dynamics*. The MIT Press. Cambridge. 459 p.
- FAO. 2002. *El cultivo protegido en clima mediterráneo*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 318 p.
- Giancomelli, G.; Castilla, N.; Van Henten, E.; Mears, D.; Sase, S. 2008. Innovation in greenhouse engineering. *Acta Horticulturae* 801: 75-88.
- Guzmán, J. L., Rodríguez, F., Berengel, M. y Dormido, S. 2005. Laboratorio virtual para la enseñanza de control climático de invernaderos. *RIAI*. 2(2):82-92.
- Grant, W. E. 1986. *Systems Analysis and Simulation in Wildlife and Fisheries Sciences*. New York. John Wiley. pp:327-331.
- Grant, W. E., Marin, S. L. y Pedersen, K. L. 1997. *Ecología y manejo de recursos naturales: análisis de sistemas y simulación*. College Station. Texas. USA. 379 p.
- Gijsman, A. J.; Hoogenboom, G.; Parton, W. J.; Kerridge, P. C. 2002. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter–residue module from Century. *Agron. J.* 94: 462–474.
- Hölscher, T. 1989. Influence of thermal storage effects of the soil on greenhouse heat consumption. *Acta Horticulturae* 248: 415-422.

- Jabulani, J.; Zermeño, A. 2003. Aplicación del enfoque de evapotranspiración a equilibrio en la agricultura de riego en zonas áridas. *Agrociencia* 37(6): 553-563.
- Jolliet, O. 1994. Hortitrans. A model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *J. Agric. Engng. Res.* 57: 23-37.
- Jones, H. G. 1992. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University Press. Second Edition. USA. 413 p.
- Leal, J. 2006. Efecto de la variación de la densidad del aire en la temperatura bajo condiciones de invernadero. *Ciencia UANL* 9(3): 290-297.
- López, J.; Lorenzo, P.; Medrano, E.; Sánchez-Guerrero, M. C.; Pérez, J.; Puerto, H. M.; Arco, M. 2000. Calefacción de invernaderos en el Sureste Español. Caja Rural de Almería. Junta de Andalucía. Almería, España. 46 p.
- Matallana, A.; Montero, J. I. 2001. *Invernaderos: diseño, construcción y ambientación*. Mundi-Prensa. Madrid, España. 209 p.
- Morales, M. I., Hernández, J., Soriano, M. T., Martínez, F. M., Escobar, I., Berenguer, J. J. y Castilla, N. 2000. Optimización de la radiación en invernaderos mediterráneos para aumentar la calidad de las producciones. VII Jornadas del grupo de Horticultura de la SECH. *Actas de Horticultura*. pp: 123-126.

- Pilatti, R. A. 1997. Cultivos bajo invernaderos. Hemisferio Sur S.A. Argentina. 166 p.
- Sase, S.; Reiss, E.; Both, A. J.; Roberts, W. J. 2002. Developing a natural ventilation model for open-roof greenhouses. *Center for controlled environment agriculture*. Rutgers University. 9 p.
- Sbita, L.; Boulard, T.; Baille, A.; Annabi, M. 1998. A greenhouse climate model including the effects of ventilation and crop transpiration: validation for the South Tunisia conditions. *Acta Horticulturae* 458: 57-64.
- Sbita, L.; Boulard, T.; Mermier, M. 1999. Natural ventilation performance of a greenhouse tunnel in South Tunisia. *Cahiers Options Méditerranéens* 31: 109-118.
- Villele, O. 1983. La serre, agent de modification du climat. L'INRA et les cultures sous serre. INRA. París. pp: 21-27.