

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”  
DIVISIÓN DE INGENIERIA.**



**Efecto del índice de área foliar (IAF), ventilación natural y velocidad del viento en la temperatura y humedad relativa en el interior de un invernadero.**

**Por:**

**OSCAR BECERRA BARBOSA**

**TESIS**

**Presentada como Requisito Parcial para**

**Obtener el Título de:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México**

**Marzo del 2011**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
"ANTONIO NARRO"  
DIVISIÓN DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE RIEGO Y DRENAJE

Efecto del índice de área foliar (IAF), ventilación natural y velocidad del viento en la temperatura y humedad relativa en el interior de un invernadero.

Por:

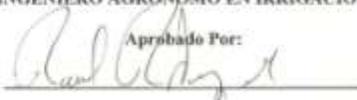
OSCAR BECERRA BARBOSA

Tesis

Que somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACION

Aprobado Por:



Dr. Raúl Rodríguez García

Presidente del Jurado



Dra. Diana Jasso Cantú

Sinodal

Dr. Alejandro Zermeño Gonzales

Sinodal

Universidad Autónoma Agraria  
M.L.H. "Antonio Narro"



M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez

Coordinador de la División de Ingeniería  
Ingeniería  
Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Marzo del 2011

## DEDICATORIA

A mis padres con mucho amor, cariño, admiración y respeto por todo su apoyo incondicional:

**Eulalia Barboza Aldaco:** A ti mamita por brindarme tu cariño, amor, tu confianza, tu tiempo incondicional y estar siempre conmigo.

**J. Soledad Becerra Ayala:** A ti papa por brindarme tu apoyo, tu amor y la confianza que depositaste en mí.

A mis hermanos con mucho cariño por brindarme su apoyo y su confianza:

**Carolina Becerra Barboza.**

**Carlos Eduardo Becerra Barboza.**

**José concepción Becerra Barboza.**

A mi esposa por su amor, comprensión, paciencia y confianza: **Margarita Gonzales Grana**, gracias amor por estar conmigo en todo momento y brindarme los momentos más felices de mi vida, te Amo muchísimo.

A **MIS ABUELITOS** por brindarme su apoyo amor cariño y la confianza que depositaron en mí:

Esteban Becerra

Josefa Ayala

Román Barbosa

Alicia Aldaco

## **AGRADECIMIENTOS**

A la **Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro"** y a todos mis maestros que con su valiosa labor, me transmitieron sus conocimientos a lo largo de mi carrera, para formarme como un profesionalista.

A **Dios Nuestro Señor** por haberme dado salud, paciencia y sabiduría para cumplir mi objetivo.

A **toda mi familia** por haber confiado en mí y apoyarme durante toda mi carrera.

Al **Dr. Raúl Rodríguez García** por brindarme su apoyo, la confianza, disponibilidad y paciencia para desarrollar esta investigación así mismo por guiarme por el buen camino del conocimiento y poder superar cualquier reto que la vida nos ponga enfrente.

A la **Dra. Diana Jasso cantú** por brindarme su apoyo, tiempo y por su colaboración en la presente investigación

Al **Dr. Alejandro Zermeño** por brindarme su amistad, apoyo, tiempo y por su colaboración en la presente investigación.

Al **M.C Oscar Lemus** por brindarme su amistad, apoyo, tiempo y por su colaboración en la presente investigación.

Al **Ing. Arturo Villareal del Bosque** por brindarme su amistad, apoyo, tiempo y por su colaboración en la presente investigación.

A los maestros Raúl Rodríguez García, Gregorio Briones, Manuela Bolívar Duarte, Alejandro Zermeño Gonzales, Oscar Lemus, Sergio Garza Vara, y al personal del departamento de Riego y Drenaje que sin su

comprensión, sus conocimientos y consejos, no sería posible para la culminación de mi formación.

A la **T.A. María Guadalupe Moreno Esquivel** por su tiempo, apoyo y su colaboración en la presente investigación.

A la **T.A. Edith Chaires Colunga** por su tiempo, apoyo y su colaboración en la presente investigación.

**A mis compañeros de generación por su apoyo y amistad:**

Doris, checo, Juan Vargas, Dilmar, mariano, el Tabo, Lucas, Neto, Tono, Lucio, Chico, Peter, el Negro, Fidel.

**A mis amigos:**

Lucio, migue, checo, Paco, migue (sobrino), el bodoque, burro, chava (la polla), ponk, pechón, chivito, pájaro, toto, don lama, chencho, gracias por brindarme su apoyo, confianza y amistad.

## INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIAS -----	i
AGRADECIMIENTOS -----	ii
INDICE DE CONTENIDO -----	iv
INDICE DE TABLAS -----	v
INDICE DE FIGURAS -----	v
INDICE DE GRAFICAS -----	v
INTRODUCCION -----	1
OBJETIVO -----	2
REVISION DE LITERATURA -----	3
Invernaderos -----	3
Tipos de invernaderos -----	3
Climatización de invernaderos -----	5
Calefacción -----	6
Ventilación natural -----	10
La refrigeración -----	12
Nebulización fina (fog) -----	13
El riego de cubierta -----	13
Manejo de luz -----	14
Control de la humedad relativa -----	16
Modelización de invernaderos -----	17
MATERIALES Y METODOS -----	19
Modelo de predicción -----	19
RESULTADOS Y DISCUSION -----	24

CONCLUSIONES -----	43
BIBLIOGRAFIA -----	44

### INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1.- Tabla de las temperaturas optimas de algunos cultivos-----	11
Tabla 2.2.- Humedad relativa de algunos cultivos-----	18

### INDICE DE FIGURAS

	Pág.
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) -----	4
Figura 2.2.- Ventilación natural -----	11
Figura 2.3.- Diagrama que muestra el principio de funcionamiento del sistema cooling -----	12
Figura 2.4.-Riego de la cubierta-----	14
Figura 3.1.- Vista del invernadero -----	24

### INDICE DE GRAFICAS

	Pág.
<b>Grafica 1a.-</b> Temperatura estimada al interior del invernadero (°C), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, a una temperatura externa de 20°C, humedad relativa externa del 50% y radiación solar de 800wm <sup>-2</sup> -----	24
<b>Grafica 1b.-</b> Temperatura estimada al interior del invernadero (°C), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de b) 66%, a una temperatura externa de 20°C, humedad relativa externa del 50% y radiación solar de 800wm <sup>-2</sup> -----	25

**Grafica 1c.-** Temperatura estimada al interior del invernadero ( $^{\circ}\text{C}$ ), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de c) 100%, a una temperatura externa de  $20^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 50% y radiación solar de  $800\text{wm}^{-2}$ ----- 25

**Grafica 2a.-** Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero (%), en función de velocidad del viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, a una temperatura externa de  $20^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 50% y radiación solar de  $800\text{wm}^{-2}$ ----- 28

**Grafica 2b.-** Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero (%), en función de velocidad del viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de b) 66%, a una temperatura externa de  $20^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 50% y radiación solar de  $800\text{wm}^{-2}$ ----- 28

**Grafica 2c.-** Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero (%), en función de velocidad del viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de c) 100%, a una temperatura externa de  $20^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 50% y radiación solar de  $800\text{wm}^{-2}$ ----- 29

**Grafica 3a.-** Temperatura estimada al interior del invernadero ( $^{\circ}\text{C}$ ), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, a una temperatura externa de  $25^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 60% y radiación solar de  $900\text{wm}^{-2}$ ----- 31

**Grafica 3b.-** Temperatura estimada al interior del invernadero ( $^{\circ}\text{C}$ ), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de b) 66%, a una temperatura externa de  $25^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 60% y radiación solar de  $900\text{wm}^{-2}$ ----- 31

**Grafica 3c.-** Temperatura estimada al interior del invernadero ( $^{\circ}\text{C}$ ), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de c) 100%, a una temperatura externa de  $25^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 60% y radiación solar de  $900\text{wm}^{-2}$ ----- 32

**Grafica 4a.-** Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero (%), en función de velocidad del viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, a una temperatura externa de  $25^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 60% y radiación solar de  $900\text{wm}^{-2}$ ----- 34

**Grafica 4b.-** Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero (%), en función de velocidad del viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de b) 66%, a una temperatura externa de 25°C, humedad relativa externa del 60% y radiación solar de 900wm<sup>-2</sup>----- 34

**Grafica 4c.-** Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero (%), en función de velocidad del viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de c) 100%, a una temperatura externa de 25°C, humedad relativa externa del 60% y radiación solar de 900wm<sup>-2</sup>----- 35

**Grafica 5a.-** Temperatura estimada al interior del invernadero (°C), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, a una temperatura externa de 30°C, humedad relativa externa del 70% y radiación solar de 1000wm<sup>-2</sup>----- 37

**Grafica 5b.-** Temperatura estimada al interior del invernadero (°C), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de b) 66%, a una temperatura externa de 30°C, humedad relativa externa del 70% y radiación solar de 1000wm<sup>-2</sup>----- 37

**Grafica 5c.-** Temperatura estimada al interior del invernadero (°C), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de c) 100%, a una temperatura externa de 30°C, humedad relativa externa del 70% y radiación solar de 1000wm<sup>-2</sup>----- 38

**Grafica 6a.-** Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero (%), en función de velocidad del viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, a una temperatura externa de 30°C, humedad relativa externa del 70% y radiación solar de 1000wm<sup>-2</sup>----- 40

**Grafica 6b.-** Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero (%), en función de velocidad del viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de b) 66%, a una temperatura externa de 30°C, humedad relativa externa del 70% y radiación solar de 1000wm<sup>-2</sup>----- 40

**Grafica 6c.-** Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero (%), en función de velocidad del viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de c) 100%, a una temperatura externa de 30°C, humedad relativa externa del 70% y radiación solar de 1000wm<sup>-2</sup>----- 41

## I. INTRODUCCIÓN:

En los últimos años en México se ha impulsado la construcción de invernaderos debido a que en estas estructuras la productividad de los cultivos es mayor que aquellos que se desarrollan a campo abierto, debido a que los cultivos en invernadero crecen bajo un clima controlado para obtener máximos rendimientos.

El clima en el invernadero es debido a la interacción de diferentes factores, como son el clima externo, características y operación del invernadero, características y operación del cultivo. Las opciones tecnológicas y estrategias para el control climático son amplias, el tipo de materiales de cubierta, el uso de pantallas térmicas, ventilación natural o forzada, calefacción, nebulización.

La ventilación y la velocidad del viento provocan el enfriamiento del invernadero, evitando daños por altas temperaturas sobre la fisiología de los cultivos para obtener productos de alta calidad (Hanan, 1997). En los países mediterráneos que se caracterizan por tener amplios períodos cálidos, la utilización de la ventilación natural por ventanas cenitales y laterales para enfriar los invernaderos ha reportado ventajas comparadas con los sistemas tradicionales de uso de ventiladores (Fatnassi et al., 2004).

La transpiración es un mecanismo de enfriamiento del ambiente, la energía requerida para vaporizar el agua que está en estado líquido en las hojas es proporcionada por el ambiente, ocasionando una reducción en la temperatura de cierta magnitud. Las características de las hojas influyen en la cantidad de

agua transpirada, considerando el número y tipo de estomas, el tamaño y número de hojas. El índice de área foliar es uno de los parámetros más utilizados para caracterizar la vegetación, se define como la superficie de hoja verde por unidad de superficie de terreno ( $m^2/m^2$ ), a mayor superficie de hoja o índice de área foliar mayor número de estomas y mayor transpiración en condiciones potenciales de disponibilidad de agua, por lo cual el índice de área foliar puede ser utilizado como un indicador de la transpiración, entre mayor índice de área mayor transpiración y viceversa.

**PALABRAS CLAVE:** Invernadero, ventilación natural, temperatura y humedad relativa.

### **OBJETIVO.**

Evaluar el efecto del índice de área foliar (IAF), ventilación natural y velocidad del viento ( $V_v$ ) en la temperatura y humedad relativa en el interior de un invernadero con ventilación natural.

#### **Objetivo particular:**

Simular la temperatura y humedad relativa en el interior de un invernadero con ventilación natural con tres porcentajes de apertura y diferentes valores de índice de área foliar y la velocidad del viento.

Utilizar la información como una herramienta de apoyo para una propuesta de diseño y planeación del control del clima en invernaderos.

## II. REVISION DE LITERATURA.

### **Invernaderos**

Los invernaderos son crecientemente utilizados en nuestro país como parte de una estrategia para aumentar la productividad de diversos cultivos, o bien, para extender su establecimiento a regiones con características climáticas poco propicias o a épocas del año en las que es imposible sin condiciones controladas. Esto es así por la principal características de los invernaderos, que constituye también el principal beneficio que trae su uso: el control del clima interno (Steta-Gándara, 2004).

### **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.

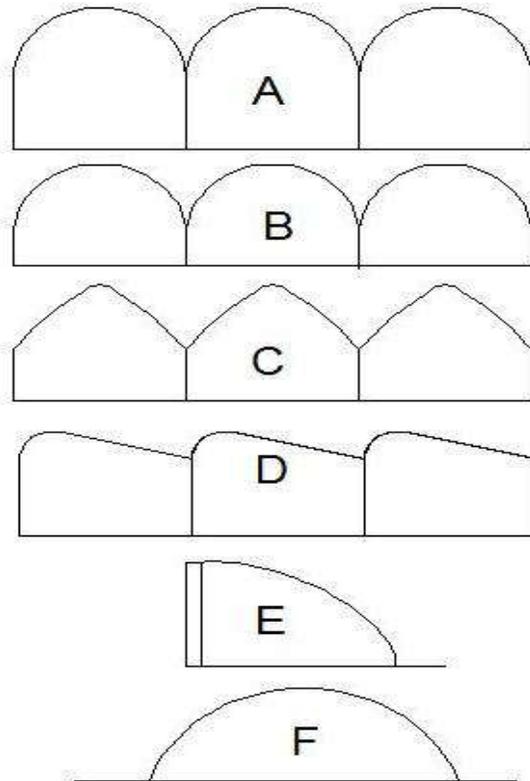


Figura 2.1.- Algunos tipos de invernaderos de cubierta curva: semicircular (A), semielíptica (B), en arco gótico u ojiva (C), asimétrica (D), monocapilla adosada (E) y túnel simple (F).

Según el tipo de cerramiento cabe distinguir invernaderos de:



## **Climatización de invernaderos**

Los aspectos del clima que principalmente interesa controlar en un invernadero son los más influyentes en el desarrollo de las plantas: la temperatura, la radiación solar, la humedad y la concentración de CO<sub>2</sub>. El comportamiento de estos factores es el resultado de una compleja interacción entre las condiciones climáticas externas y el diseño del propio invernadero y el cultivo. En ese sentido, Bot (1989) afirma que los fenómenos más determinantes en la evolución del clima interno de los invernaderos y en el comportamiento del cultivo son la radiación, la ventilación, los flujos de energía y materia entre el cultivo y el entorno, los flujos de calor entre los elementos estructurales del invernadero, los fenómenos de convección y la conducción de calor del suelo.

En el interior del invernadero, los factores radiación, temperatura y composición de la atmósfera son modificadas 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 exterior. 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 et al., 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. Algunas características del sistema son:

- La distribución de la temperatura dentro del invernadero es mucho más uniforme en comparación con la calefacción tradicional por tubo caliente colgado del techo.
- Para calentar el suelo se puede utilizar agua entre 30 °C y 40 °C y por tanto es una forma de aplicación de energías alternativas como la geotérmica, calor residual industrial y solar de baja temperatura.
- Los costos por bombeo de agua caliente son mayores.
- En general, los sistemas de calefacción de suelo representan un ahorro de energía, frente a los aerotermos se puede ahorrar el 10% con velocidades

de viento débiles y hasta un 15-20% con velocidades de viento superiores a los 30 km/hr.

- Un inconveniente de estos sistemas es que son insuficientes para calentar los invernaderos de zonas frías y es entonces que se tiene que hacer uso de algunos sistemas de calefacción por aire y se emplean cortinas térmicas, dobles cubiertas, etc. para ahorrar el máximo de energía.

#### 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, fuel, oíl 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 costos 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 el 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.

### **Ventilación natural**

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 y rendijas). 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 principal ventaja de la ventilación natural como método de enfriamiento de un invernadero es su bajo costo de operación (Baptista et al., 2001).

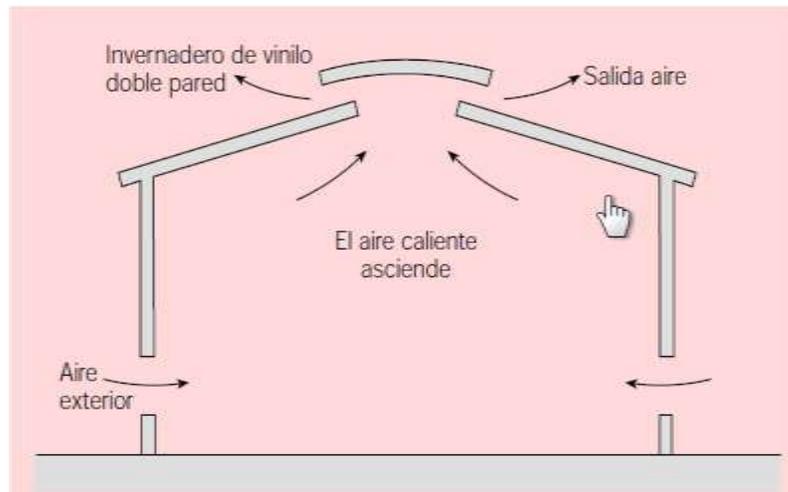


Figura 2.2- Ventilación natural

PRODUCTO	TEMP. OPTIMA
Lechuga	14-18 °C
Espinacas	15-18
Guisantes	16-20
Acelgas	18-22
Apio	18-25
Judías	18-30
Tomates	20-24
Pimiento	20-25
Pepino	20-25
Berenjena	22-27
Sandía	23-28
Melón	25-30
Calabacín	25-35

Tabla 2.1.- Tabla de las temperaturas optimas de algunos cultivos.

## 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

b) Nebulización fina (fog)

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

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., 2001). Este sistema permite reducir la temperatura del invernadero hasta en 3 °C (Breuer et al., 1995) y es solo usual en invernaderos sofisticados.



Figura 2.4.-Riego de la cubierta

### **Concentración de CO<sub>2</sub>**

El carbono es un nutriente esencial de los vegetales. Existen estudios que demuestran que alrededor del 40 % de la planta seca se compone de carbono. La planta obtiene el carbono presente en el CO<sub>2</sub> atmosférico a través de la fotosíntesis. La concentración ideal del CO<sub>2</sub> depende de los requerimientos, pero para todos existe un punto óptimo. La mayoría de cultivos requieren de concentraciones de CO<sub>2</sub> entre 1000-1500 ppm (partes por millón). Existiendo algunas especies que responden de manera positiva a concentraciones de hasta 1800 ppm (Berninger, 1989).

### **Manejo de la luz**

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. Existen también influencias constructivas además de las

ambientales, es por eso se han elaborado sistemas para averiguar la luminosidad en los invernaderos para de este modo poder mejorar la orientación y la forma de 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).

Cuando existe el caso de que la radiación solar es insuficiente, puede recurrirse a complementarla con luz artificial, para elevar los niveles de radiación PAR por encima del punto de compensación de radiación y mantener un crecimiento.

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 et al., 1995).

### **Control de humedad relativa**

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 et al., 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).

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.

<u>PRODUCTO</u>	<u>HUMEDAD</u>
Tomate y pimiento	50-60%
Berenjena	50-60
Melón y acelga	60-70
Judías	60-75
Lechuga	60-80
Sandía	65-75
Guisantes	65-75
Calabacín y apio	65-80
Fresones	70-80
Pepino	70-90

Tabla 2.2.- Humedad relativa de algunos cultivos

## **MODELIZACION DE INVERNADEROS.**

Existen diversas estrategias de modelación del clima de los invernaderos; una de ellas, el uso de modelos físicos, pues este tipo de modelos se construyen en base a la consideración de las leyes de la física y a la inferencia estadística de algunos parámetros, con lo que arroja no solo información del clima interno aproximada a la real, sino que la propia estructura del modelo tiene un

significado físico, lo que hace sencillo la simulación de los efectos de la adopción de una estrategia para el control climático. Sin embargo, ya que el cultivo juega un papel muy importante en el clima del invernadero, es forzoso considerarlo como factor del clima; a diferencia del resto de los factores, el comportamiento del cultivo es significativamente complejo y es imposible utilizar un modelo físico que simule con precisión aceptable su comportamiento, por lo que generalmente se integra al modelo propiamente físico un modelo parcialmente empírico para simular el comportamiento del cultivo (Schrevens et al, 2008).

Modelos que se basan en leyes físicas permiten examinar los procesos responsables de la transferencia de energía y masa (Castañeda *et al.*, 2007). La razón principal del lento desarrollo de este tipo de modelos se debe a la complejidad del clima en un invernadero.

Es así entonces, el presente trabajo pretende el uso de un modelo para la predicción de la temperatura y la humedad relativa dentro de un invernadero con ventilación cenital. La aplicación en el futuro de dicho modelo será el utilizarlo como una herramienta de apoyo para el diseño y planeación del control del clima en invernaderos.

El modelo está basado en las investigaciones desarrolladas previamente por Boulard y Baille (1993), Sbita *et al.* (1998), Sbita *et al.* (1999) y Bouzo *et al.* (2007). El presente trabajo hace uso de dos ecuaciones, una de balance de energía y una segunda para el balance de vapor de agua en el invernadero.

Con ello después de parametrizarla se obtiene un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas dando como resultado un diferencial de temperatura y un diferencial de humedad relativa entre el interior y el exterior del invernadero.

El establecimiento de las ecuaciones que conforman el modelo posteriormente se trasladan al programa STELLA™ v9.0.2.

### III. MATERIALES Y METODOS

Este trabajo se realizó en la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro” (UAAAN) ubicada en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. La simulación de las condiciones del invernadero se efectuaron a partir de los datos climáticos obtenidos en el proyecto de investigación “Adecuación de un modelo físico para el uso eficiente de energía en un invernadero” en el periodo julio- octubre del 2009 en la unidad de producción denominada Agroindustrias el Centenario SRP de RL, ubicadas en San Rafael, municipio de Galeana, Nuevo León, en Carretera a la Hediondilla s/n, la cual se encuentra a los 25° 01’ 35” de latitud norte y 100° 32’ 55” de longitud oeste y una altitud de 1855 msnm.

#### **Modelo de predicción**

La temperatura interna del invernadero es estimada en el modelo a través de la Ecuación 1 (modificada de Boulard y Baille, 1993, para no considerar el efecto de el enfriamiento que resulta de la nebulización de agua), en la que representa la diferencia entre la temperatura interna del invernadero estimada y la temperatura externa real, mientras que el déficit de presión de vapor es

estimado con la Ecuación 2, en la que representa la diferencia entre la presión de vapor dentro del invernadero estimada y la presión de vapor externa real.

$$\Delta T = \frac{\left[ \left( \frac{b + K_l}{K_l} \eta G_o - b D_o - a \alpha \tau G_o \right) \right]}{b \delta_{(T_e)} + \left( \frac{(b + K_l)(K_s + K_c)}{K_l} \right)} \dots\dots\dots 1$$

$$\Delta e = \eta G_o - \Delta T (K_s + K_c) / K_l \dots\dots\dots 2$$

$\Delta T$ = diferencia temperatura entre la temperatura interna del invernadero y la temperatura externa real.

$\Delta e$ = Diferencia entre la presión de vapor dentro del invernadero estimada y la presión de vapor externa real.

**Datos del clima externo**

- $G_o$  representa la radiación externa en W m<sup>-2</sup>
- $D_o$  representa el déficit de presión de vapor externo
- $T$  representa la temperatura externa en °C
- $V$  representa la velocidad del viento externo en m s<sup>-1</sup>
- $\delta_{(T_e)}$  representa la pendiente de la curva de déficit de presión de vapor externo a la temperatura. Tiene unidades de Pa °K<sup>-1</sup>.

**Datos de características del invernadero y datos de operación**

- $\eta$  Representa la eficiencia térmica de la radiación solar. Es a dimensional. Se utilizó el valor de 0.65.

- $\tau$  Representa la transmitancia global del invernadero, la fracción de radiación externa que incide en el cultivo; adimensional. Se utilizó el valor de 0.65.
- $k_c$  Representa el coeficiente total de pérdida de energía del invernadero; sus unidades son  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ; este parámetro tiene una relación aproximadamente lineal con la velocidad exterior del viento, por lo que se puede estimar con la ecuación  $K_c = A + BV$ , en donde **A** y **B** toman, en invernaderos con doble capa, los valores de 4 y 0.2, respectivamente (Bailey y Cotton, 1980).
- $K_l$  Representa el coeficiente de intercambio de calor latente por ventilación y tiene unidades de  $\text{W m}^{-2} \text{Pa}^{-1}$ . Está determinado por la ecuación
- $K_l = (\gamma\rho\lambda V_g N)/(3600S_g)$
- $k_s$  Representa el coeficiente de intercambio de calor sensible por ventilación y tiene unidades de  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ . Está determinado por la ecuación  $K_s = (\rho C_p V_g N)/(3600S_g)$
- **N** Representa la tasa de renovación del viento dentro del invernadero; tiene unidades de  $\text{h}^{-1}$  Se determina por la ecuación  $N = \left(\frac{S_o}{2}\right) \left(A \sqrt{C_w V} \left(\frac{3600}{h}\right) + N_o\right)$
- $S_o$  Representa el cociente entre el área total de ventilas abiertas sobre la superficie del invernadero. Es adimensional.
- El producto entre  $\zeta$ —coeficiente aerodinámico y  $C^{0.5}$ —coeficiente de viento, adimensionales ambos, es reportado en diversas investigaciones empíricas e indica *qué tanto* del viento externo se transforma en flujos que renuevan el aire interno del invernadero. Para esta investigación, se utilizó un valor reportado

por Sbita y Boulard (1992), considerando las características de diseño del invernadero en el que se llevaron a cabo las pruebas. Este valor fue de 0.161.

- $S_g$  es la superficie del invernadero, mientras que es el volumen. Se utilizan valores en  $m^2$  y  $m^3$ , respectivamente.

- 

### Datos sobre el cultivo

$b$  caracteriza la influencia del déficit de vapor sobre la transpiración. Tiene unidades de  $W m^{-2} Pa^{-1}$  y se deduce con la Ecuación

$$b = 1.65IAF(1 - 0.56e^{\left(\frac{-nG_0}{13}\right)})/\gamma$$

$a$  Caracteriza la influencia de la radiación sobre la transpiración. Es adimensional y se obtiene con la ecuación  $a = 0.154 \ln(1 + 1.1IAF^{1.13})$

$IAF$ , índice de área foliar, adimensional.

$\alpha$  Representa la absorción de radiación por el cultivo. Se utilizó el valor de 0.95.

### Constantes físicas

- $\gamma$  es la constante psicométrica ( $66 Pa K^{-1}$ )
- $\rho$  es la densidad del aire ( $1.3 kg m^{-3}$ )
- $\lambda$  es el calor latente de vaporización del agua ( $2500 KJ kg^{-1} K^{-1}$ ).
- $C_p$  es la capacidad térmica del aire ( $1.012 \times 10^4 J Kg^{-1} K^{-1}$ ).

Estas ecuaciones fueron trasladadas al programa STELLA™ v9.0.2.

Los datos climáticos utilizados fueron tomados en el proyecto adecuación de un modelo físico para el uso eficiente de energía en un invernadero. Se utilizaron

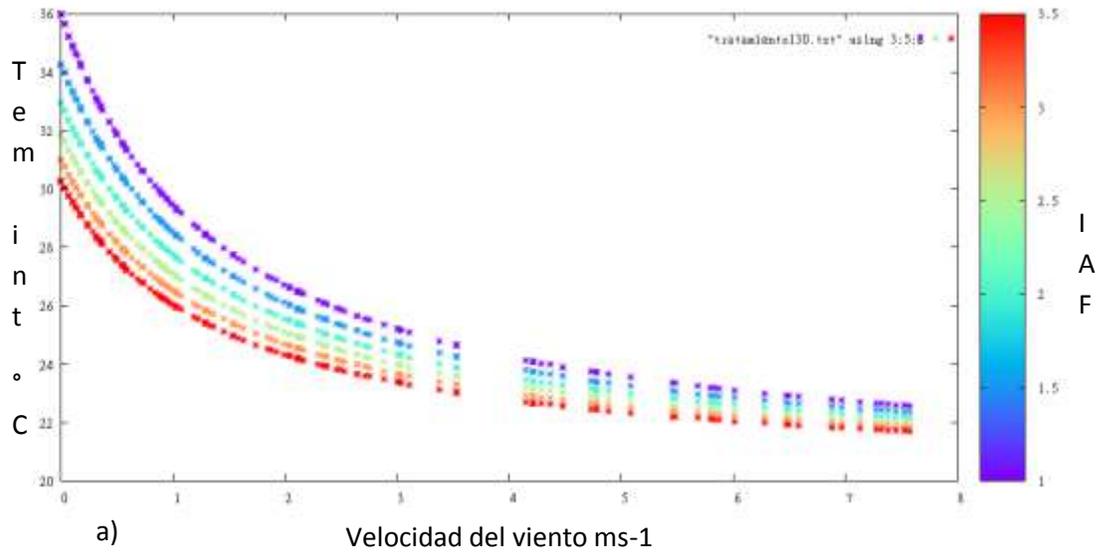
los datos climáticos de una semana durante el periodo más cálido que ocurrió en el mes de julio de 2009. En el programa se simuló el comportamiento de la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) y humedad relativa (%) en el interior de un invernadero en función de: velocidad del viento (1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 m/s), diferentes índices de área foliar (1,1.5, 2,2.5, 3 y 3.5) y tres porcentajes de apertura de ventilas (33%, 66% y 100%). Se consideraron los datos climáticos externos más críticos, el primer tratamiento fue utilizando temperatura exterior  $20^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa de 50% y radiación solar de  $800\text{wm}^{-2}$ . Segundo tratamiento utilizando temperatura exterior  $25^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa de 60% y radiación solar de  $900\text{wm}^{-2}$ . Tercer tratamiento utilizando temperatura exterior  $30^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa de 70% y radiación solar de  $1000\text{wm}^{-2}$ .

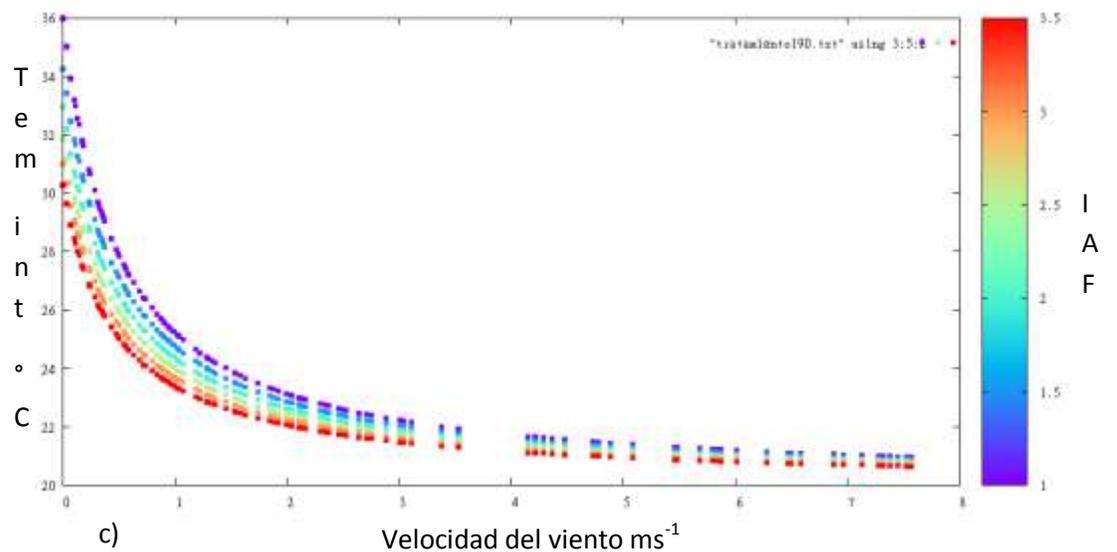
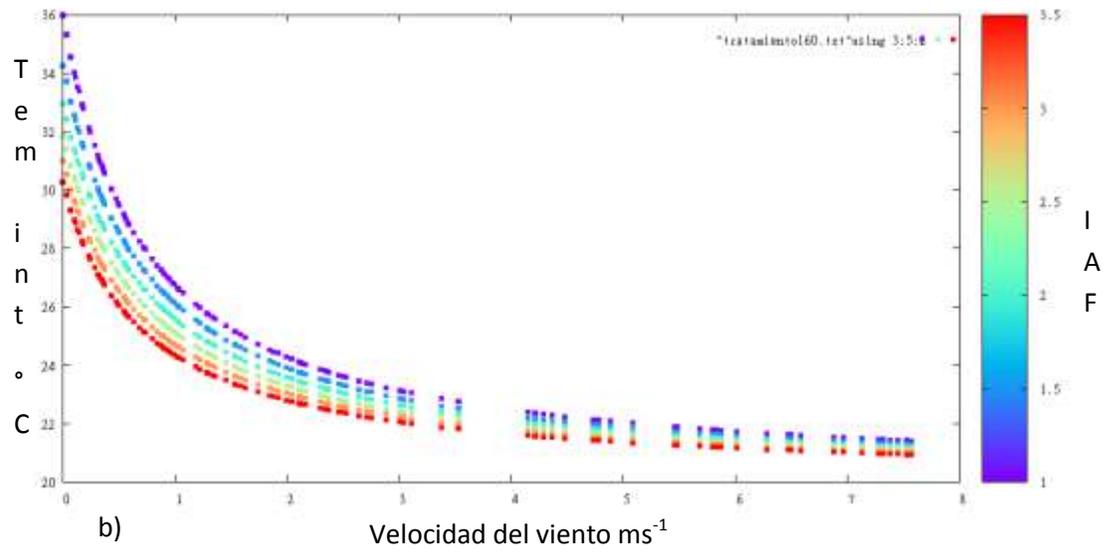
EL invernadero es de tipo multitunel con ventilación natural, para lo cual cuenta con ventilas cenitales a un solo lado de los arcos y ventilas laterales al este y al oeste. Tiene cuatro metros de altura y la longitud del arco es de nueve metros. Las ventilas cenitales tienen, cada una, una área de  $300\text{ m}^2$  (1.5 m X 200 m), por lo que el área total de ventilas cenitales es de  $300\text{m}^2 \times 22 = 6600\text{m}^2$ . La ventila lateral tiene un área total de  $600\text{m}^2$  (3m X 200m). Los dos tipos de ventilas pueden ser abiertas en su totalidad o en una fracción porcentual (la apertura varía entre 0 y 100%).



Figura 3.1.- Vista del invernadero

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSION





Grafica 1.- Temperatura estimada al interior del invernadero ( $^{\circ}\text{C}$ ), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, b) 66%, c) 100%, a una temperatura externa de  $20^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 50% y radiación solar de  $800\text{wm}^{-2}$

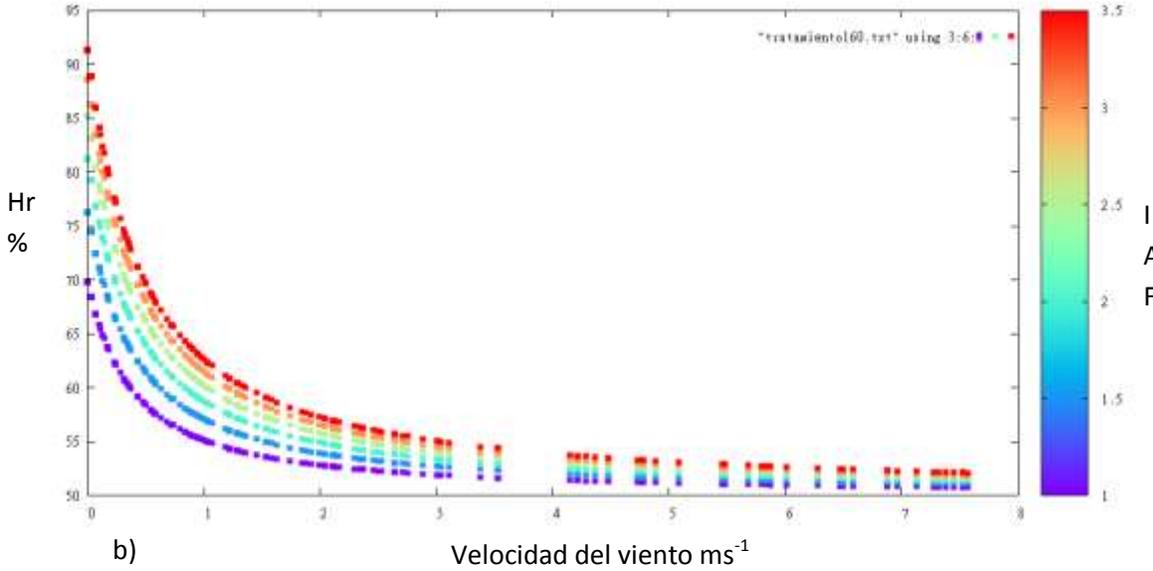
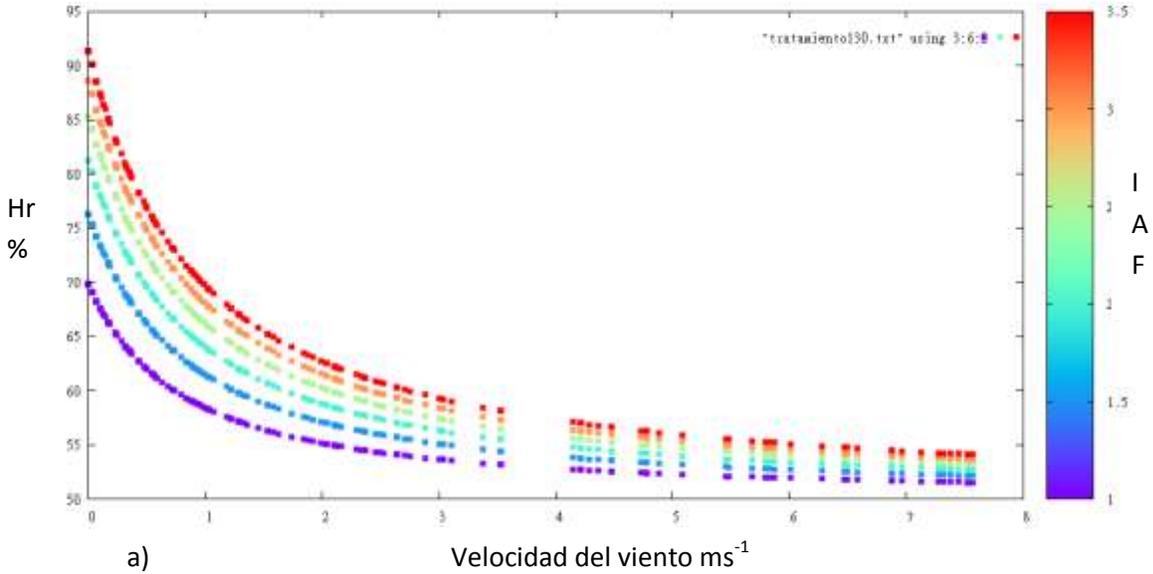
La grafica 1 presenta el valor estimado de la temperatura del aire al interior del invernadero para diferentes valores de IAF y de velocidad del viento a tres aperturas de ventila. En el caso de la grafica 1a cuando las ventilas están cerradas la temperatura alcanza un valor de 36°C para un IAF de 1, a medida que se incrementa el IAF o aumenta la transpiración la temperatura desciende, para un IAF de 3.5 la temperatura es de 30°C, una diferencia de 6°C entre el menor y mayor IAF, lo cual indica la acción de enfriamiento de una mayor transpiración debido a un IAF superior. Cuando la ventila se abre a un 33% y al incrementarse la velocidad del viento a 1m/s provoca el enfriamiento acentuado del invernadero, la temperatura descendió a 29.5°C y 26°C para IAF de 1 y 3.5 respectivamente, la apertura de ventilas y la velocidad del viento provocan la renovación del aire interno por el externo. Con respecto a la ventila cerrada la temperatura descendió 6.5°C y 6°C para el IAF de 1 y 3.5 respectivamente. A una velocidad del viento de 2 m/s la temperatura en el invernadero es de 27°C y 24°C a IAF de 1 y 3.5. Al incrementarse la velocidad del viento la temperatura sigue descendiendo aunque las reducción entre velocidades para un mismo valor de IAF es de menor magnitud observándose a partir de una velocidad de 4 m/s un comportamiento lineal, la reducción de temperatura en promedio es de 0.6°C por unidad de velocidad, a esta velocidad la diferencia entre el menor y mayor índice es de 2°C, para una velocidad de 7 m/s la temperatura es de 23°C y 21°C a IAF de 1 y 3.5. Con respecto al invernadero completamente cerrado para un IAF de 1 la reducción es de 13°C y para 3.5 de 8°C.

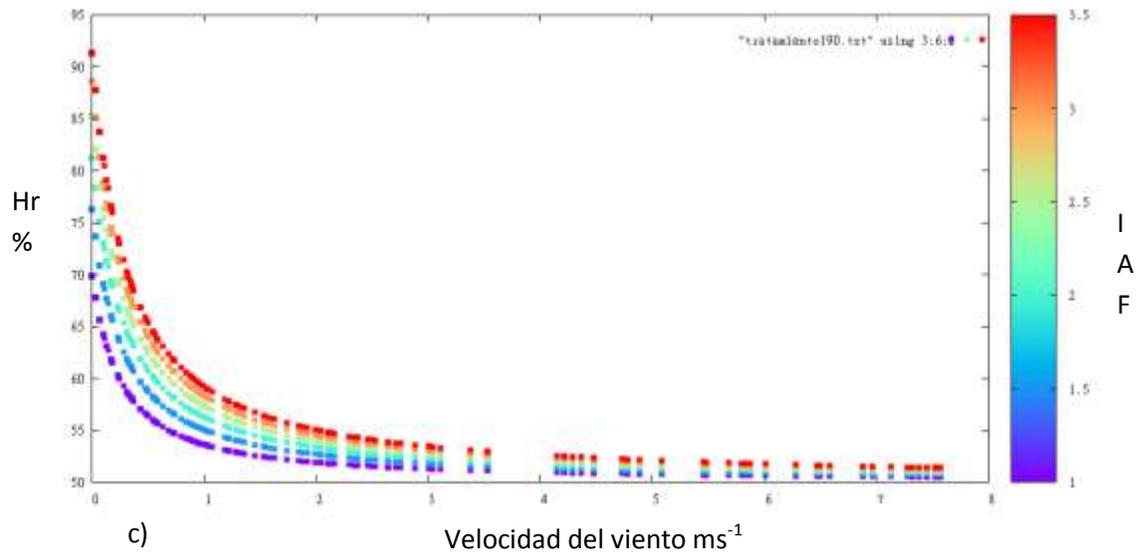
Cuando la ventila se abre un 66% el invernadero tiene un mayor enfriamiento para las diferentes valores de velocidad del viento e IAF que en el caso de una apertura de 33%. A una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la temperatura descendió a 27°C y 24°C respectivamente, a una velocidad de 2 m/s la temperatura en el invernadero es de 24.5°C y 23°C. Al incrementarse la velocidad del viento la temperatura sigue descendiendo, la reducción de temperatura entre velocidades se hace constante de 0.4°C/m/s a partir de una velocidad de 3 m/s a 7 m/s, la diferencia entre índices es mayor a tres cuartos grado centígrado (21.7°C-21°C).

Cuando la ventila se abre un 100% el invernadero tiene un mayor enfriamiento que en el caso de una apertura de 66%, para una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la temperatura descendió a 25°C y 23°C respectivamente, a una velocidad de 2 m/s la temperatura en el invernadero es de 23.5°C y 22°C. Al incrementarse la velocidad del viento la temperatura sigue descendiendo, la reducción de temperatura entre velocidades se hace constante a partir de 3 m/s. a una velocidad de 7 m/s ocurre la mayor reducción de temperatura de las tres aperturas, 21°C.

Los resultados muestran que el enfriamiento del invernadero es mayor a medida que se incrementa la apertura de las ventilas, el índice de área foliar y la velocidad del viento, las mayores reducciones de temperatura ocurren a bajas velocidades de viento, 1m/s y 2 m/s. El efecto de la apertura de las ventilas y la velocidad en la reducción de la temperatura dentro del invernadero

es debido a al incremento en la remoción del aire, el efecto del IAF es debido a la transpiración de las hojas.





Grafica 2.- Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero (%), en función de velocidad del viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, b) 66%, c) 100%, a una temperatura externa de 20°C, humedad relativa externa del 50% y radiación solar de  $800\text{wm}^{-2}$

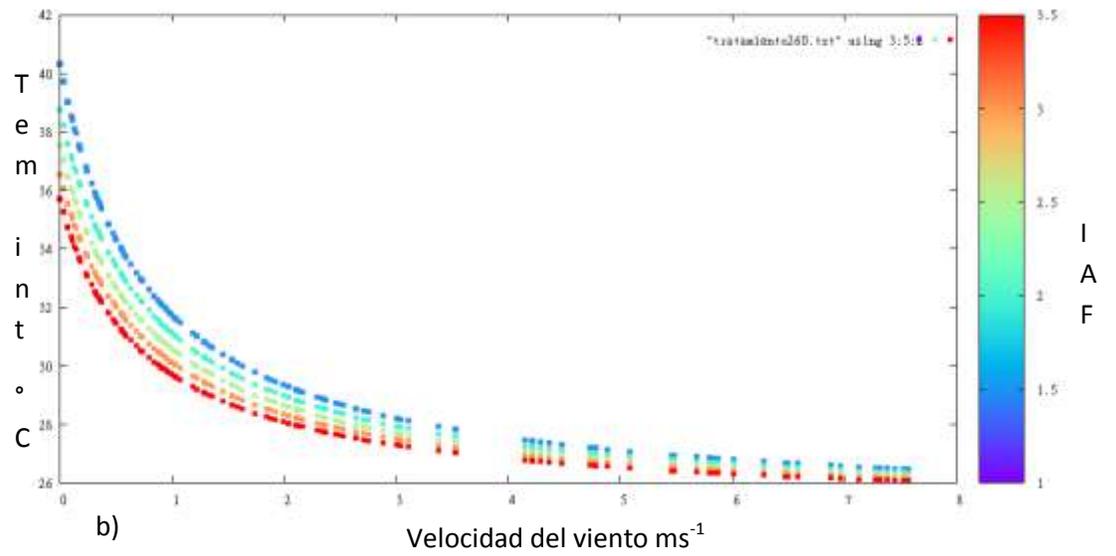
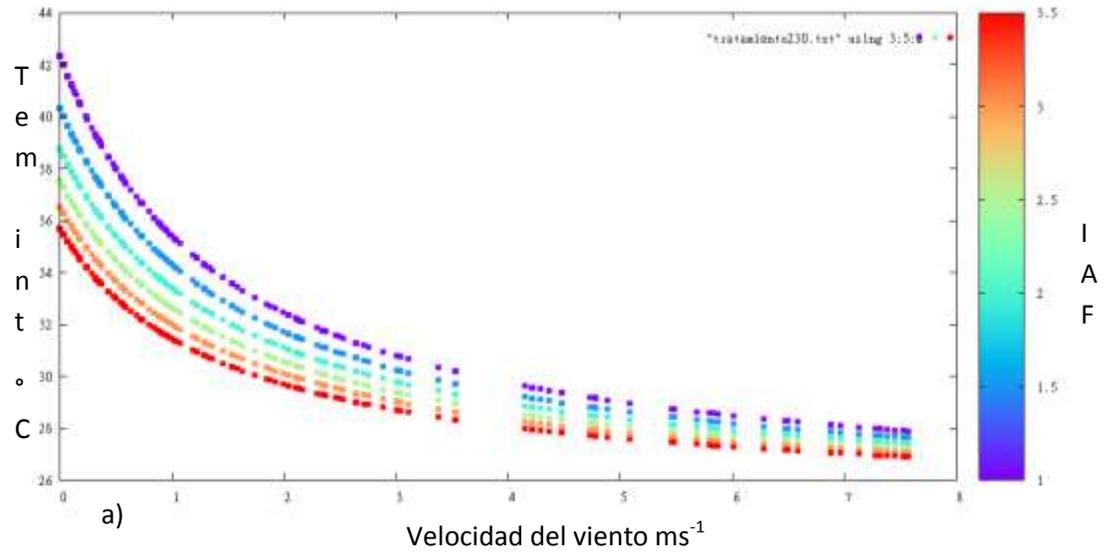
La grafica 2 presenta el valor estimado de la humedad relativa al interior del invernadero para diferentes valores de IAF y de velocidad del viento a tres apertura de ventila. En el caso de la grafica 2a cuando las ventilas están cerradas la humedad relativa alcanza un valor de 70% y 92% para un IAF de 1 y 3.5 respectivamente, una diferencia de 22% entre el menor y mayor IAF, y esto es debido a que entre mayor IAF lo será también la transpiración incrementándose la humedad al interior del invernadero. Cuando la ventila se abre a un 33% y al incrementarse la velocidad del viento a 1m/s ocasiona una fuerte disminución de la humedad relativa valores de 58% y 70% para IAF de 1 y 3.5, la apertura de las ventilas y el incremento de la velocidad del viento permite la renovación del aire en el invernadero con menor humedad. A partir

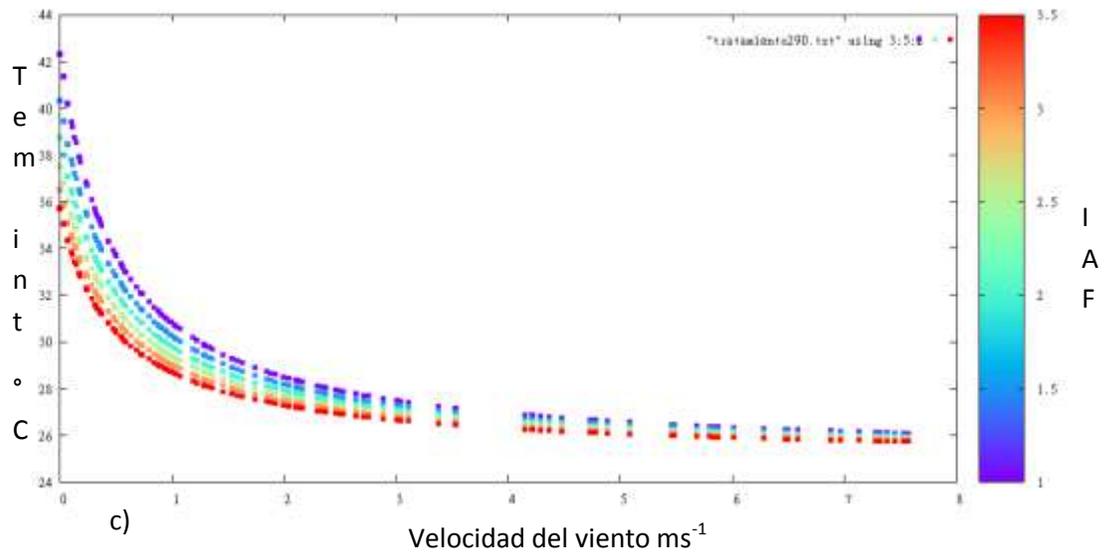
de 3 m/s hasta 7 m/s la humedad relativa disminuye de 60% a 55% para un IAF de 3.5 y de 54% a 51% para un IAF de 1, el poco cambio en la HR es debido al incremento en el numero de renovaciones de aire, por la cual la HR al interior tiende a ser muy cercana a la del exterior.

Cuando la ventila se abre un 66% la HR tiene un mayor descenso que en el caso de una apertura de 33%, para una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la humedad relativa descendió a 55% y 64% respectivamente, a una velocidad de 2 m/s la humedad relativa en el invernadero es de 53% y 58%. A partir de 3 m/s hasta 7 m/s la humedad relativa disminuye de 55% a 52.5% para un IAF de 3.5 y de 51.5% a 50% para un IAF de 1, el incremento en el numero de renovaciones de aire, ocasiona que la humedad relativa al interior tienda a ser muy cercana a la del exterior.

Cuando la ventila se abre un 100% el invernadero tiene un mayor enfriamiento que en el caso de una apertura de 66%, para una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la humedad relativa descendió a 54% y 59% respectivamente. Entre una velocidad de 3 m/s y 7 m/s la humedad relativa desciende de 54% a 51% para un IAF de 3.5 y para un IAF de 1 de 51% a 50%. La humedad relativa al interior tienda a ser muy cercana a la del exterior por las renovaciones de aire.

Los resultados muestran que a medida que se incrementa la apertura de las ventilas y la velocidad del viento se reduce la humedad relativa en el interior del invernadero, debido a que se incrementa las renovaciones de aire, entre mayor es el IAF aumentara la transpiración y por consecuencia la humedad relativa.





Grafica 3.- Temperatura estimada al interior del invernadero ( $^{\circ}\text{C}$ ), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, b) 66%, c) 100%, a una temperatura externa de  $25^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 60% y radiación solar de  $900\text{w}\text{m}^{-2}$

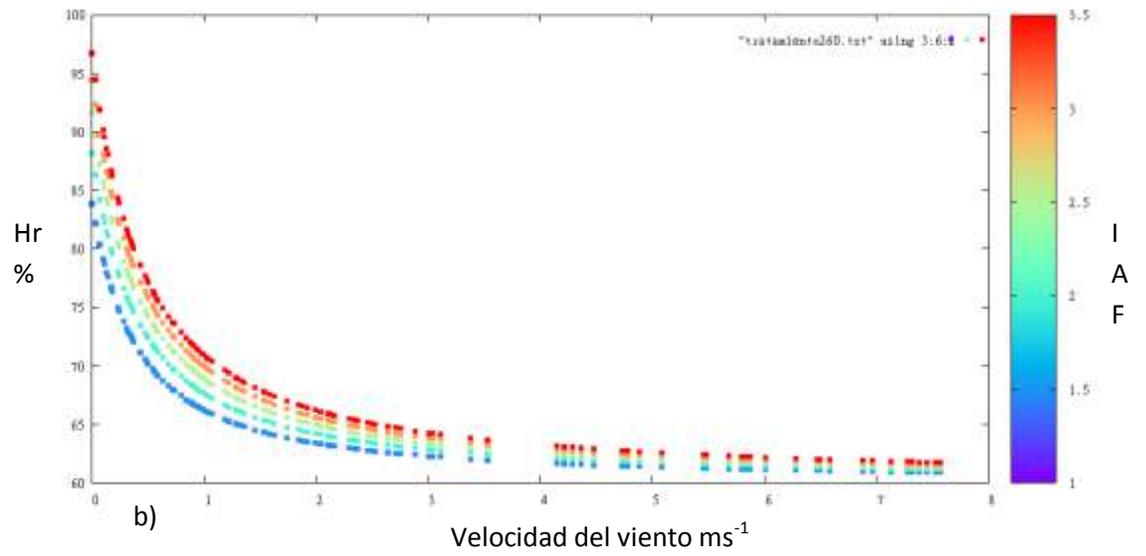
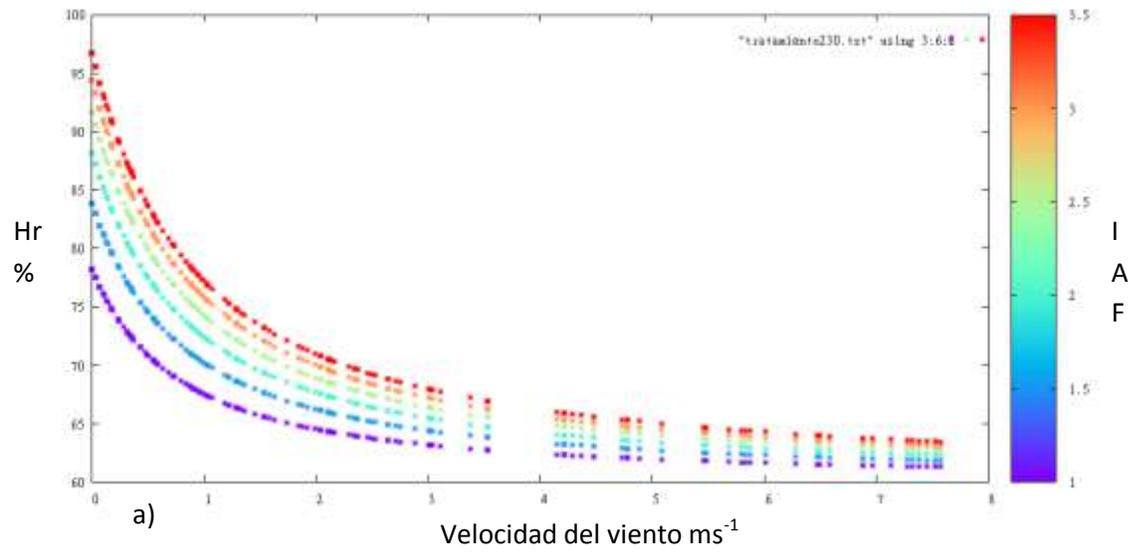
En la grafica 3 presenta el valor estimado de la temperatura del aire al interior del invernadero para diferentes valores de IAF y de velocidad del viento a tres apertura de ventila para incrementos de temperatura del aire ( $25^{\circ}\text{C}$ ), humedad relativa (60%) y radiación solar ( $900\text{ w}\text{m}^{-2}$ ) con respecto a la simulación anterior. En el caso de la grafica 3a cuando las ventilas están cerradas la temperatura alcanza un valor de  $42.5^{\circ}\text{C}$  y  $36^{\circ}\text{C}$  para un IAF de 1 y 3.5 respectivamente, una diferencia de  $6.5^{\circ}\text{C}$  entre el menor y mayor IAF. Cuando la ventila se abre a un 33% y al incrementarse la velocidad del viento a 1m/s provoca el enfriamiento del invernadero, la temperatura descendió a  $35.5^{\circ}\text{C}$  y  $31.5^{\circ}\text{C}$  para IAF de 1 y 3.5 respectivamente, a una velocidad del viento de 2 m/s la temperatura en el invernadero es de  $32.5^{\circ}\text{C}$  y  $29.5^{\circ}\text{C}$  a IAF de 1 y 3.5. Al incrementarse la velocidad del viento la temperatura sigue descendiendo

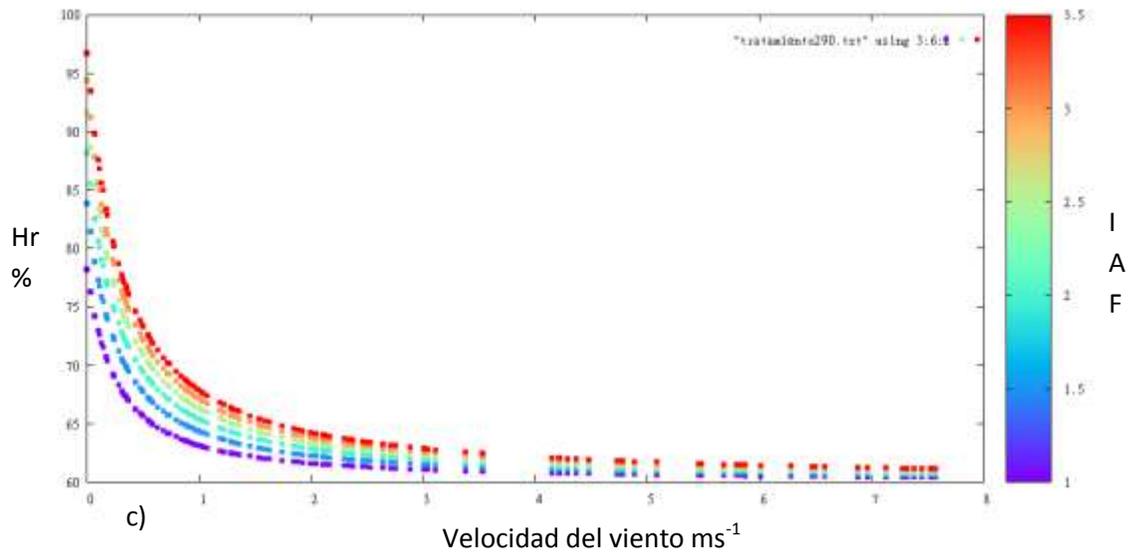
aunque la reducción de temperatura entre velocidades e IAF disminuye, para una velocidad de 7 m/s la diferencia entre índices es de un grado centígrado (28°C-27°C).

Cuando la ventila se abre un 66% el invernadero tiene un mayor enfriamiento que en el caso de una apertura de 33%, para una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la temperatura descendió a 32°C y 29.5°C respectivamente, a una velocidad de 2 m/s la temperatura en el invernadero es de 29.5°C y 27.5°C. Al incrementarse la velocidad del viento la temperatura sigue descendiendo, las diferencias entre velocidades e IAF se reduce a una velocidad de 7 m/s la diferencia entre índices es mayor a tres cuartos grado centígrado (26.7°C-26°C).

Cuando la ventila se abre un 100% el invernadero tiene un mayor enfriamiento que en el caso de una apertura de 66%, para una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la temperatura descendió a 30.5°C y 28°C respectivamente, a una velocidad de 2 m/s la temperatura en el invernadero es de 28.5°C y 27°C. Al incrementarse la velocidad del viento la temperatura sigue descendiendo, a una velocidad de 7 m/s la diferencia entre índices es de medio grado centígrado (26.5°C-26°C).

Bajo condiciones de mayores valores exteriores de temperatura del aire, humedad relativa y mayor radiación, la temperatura se incrementa entre 5°C y 6°C con respecto a valores de velocidad del viento e IAF de la anterior simulación donde el valor de las variables climáticas antes citadas es menor.





Grafica 4.- Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero ( $^{\circ}\text{C}$ ), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, b) 66%, c) 100%, a una temperatura externa de  $25^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 60% y radiación solar de  $900\text{wm}^{-2}$

En la grafica 4 presenta el valor estimado de la humedad relativa al interior del invernadero para diferentes valores de IAF y de velocidad del viento a tres apertura de ventila para las mismas condiciones climáticas que la anterior simulación para estimar la temperatura. En el caso de la figura 4a cuando las ventilas están cerradas la humedad relativa alcanza un valor de 78% y 97% para un IAF de 1 y 3.5 respectivamente, una diferencia de 19% entre el menor y mayor IAF. Cuando la ventila se abre a un 33% y al incrementarse la velocidad del viento a  $1\text{m/s}$  provoca la renovación del aire en el invernadero, la humedad relativa disminuye a 67% y 78% para IAF de 1 y 3.5. Al incrementarse la velocidad del viento la humedad relativa sigue disminuyendo

aunque la reducción entre velocidades e IAF se hace constante, para una velocidad de 7 m/s la diferencia entre índices es de un 4% (64%-60%).

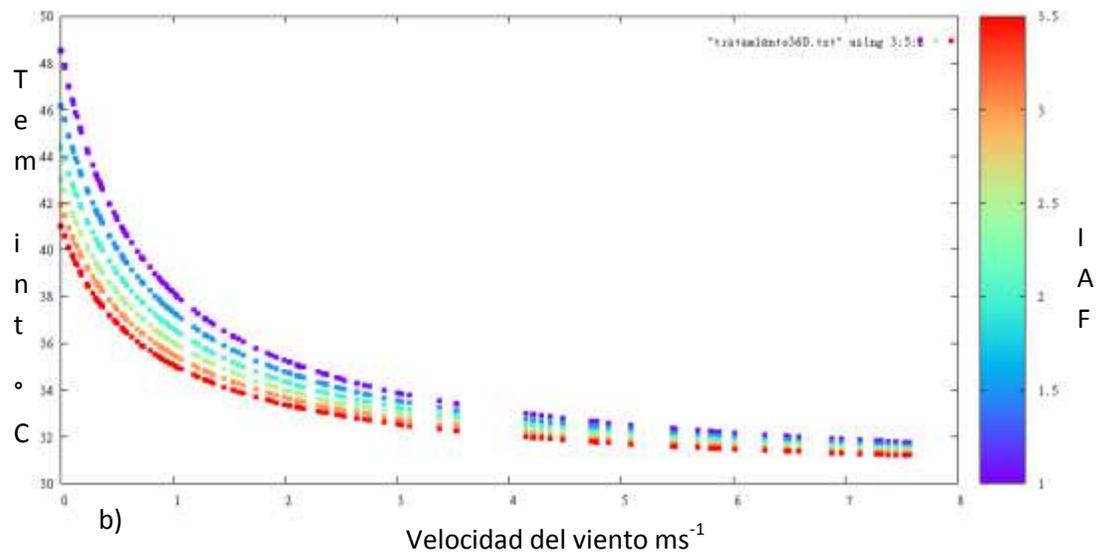
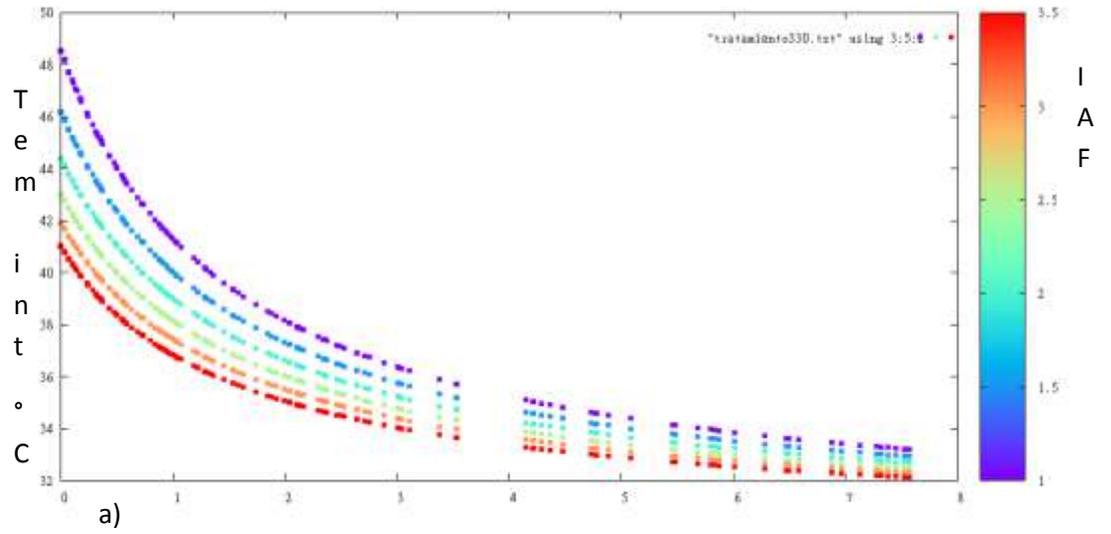
Cuando la ventila se abre un 66% el invernadero tiene incremento en la renovación del aire que en el caso de una apertura de 33%, para una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la humedad relativa descendió a 65% y 70% respectivamente, a una velocidad de 2 m/s la humedad relativa es de 62% y 65%. Al incrementarse la velocidad del viento la humedad relativa sigue descendiendo, la reducción entre velocidades e IAF se hace constante a una velocidad de 7 m/s la diferencia entre índices es del 2% (62.5%-60.5%).

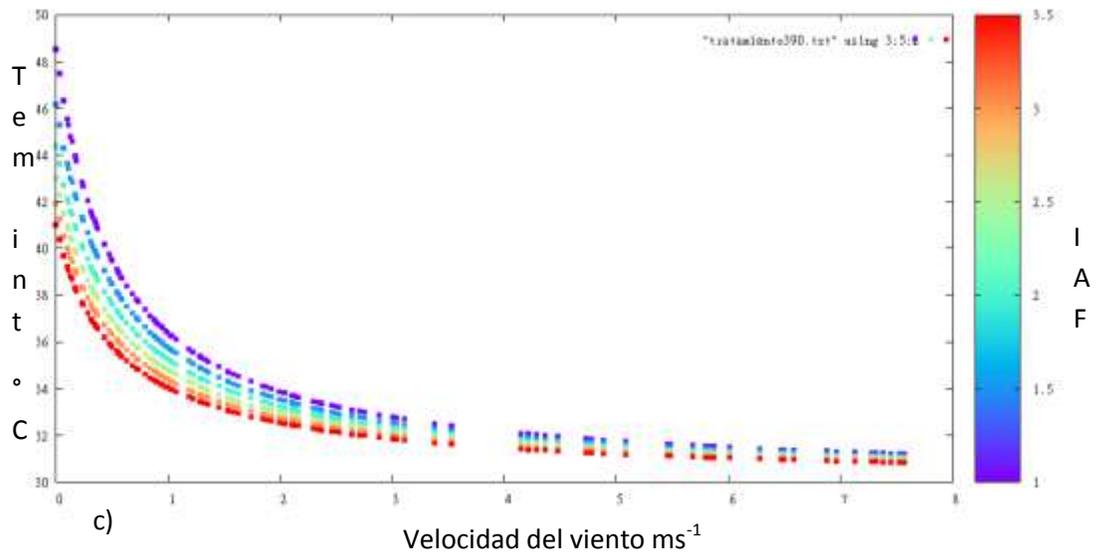
Cuando la ventila se abre un 100% el invernadero tiene una mayor renovación del aire que en el caso de una apertura de 66%, para una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la humedad relativa descendió a 63.5% y 68% respectivamente. Al incrementarse la velocidad del viento la humedad relativa sigue descendiendo, a una velocidad de 7 m/s la diferencia entre índices es de un 1% (61%-60%).

Bajo condiciones de mayores valores externos de temperatura del aire, humedad relativa y de radiación solar los valores de humedad relativa se incrementaron de 5 a 8 unidades a bajas velocidades y de 10 a 12 unidades a

mayores

velocidades.





Grafica 5.- Temperatura estimada al interior del invernadero ( $^{\circ}\text{C}$ ), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, b) 66%, c) 100%, a una temperatura externa de  $30^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 70% y radiación solar de  $1000\text{w}\text{m}^{-2}$

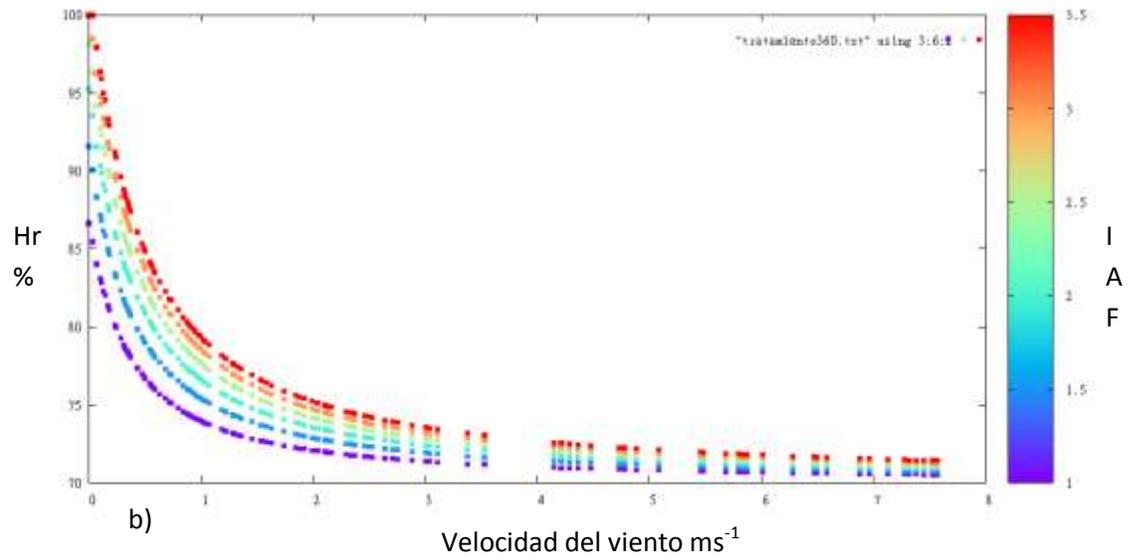
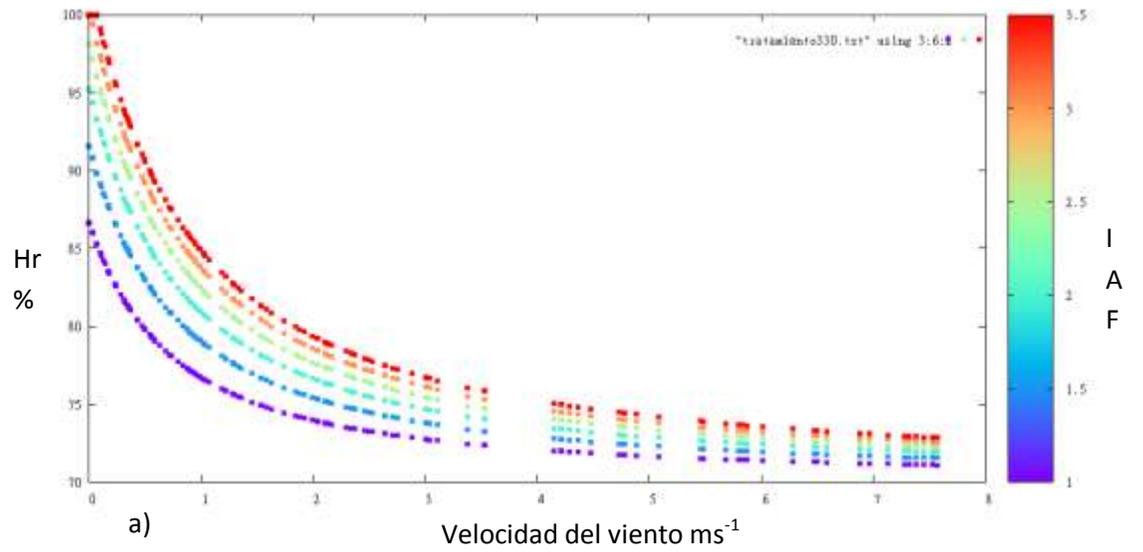
En la grafica 5 presenta el valor estimado de la temperatura del aire al interior del invernadero para diferentes valores de IAF y de velocidad del viento a tres apertura de ventila para mayores valores externos de temperatura del aire ( $30^{\circ}\text{C}$ ), humedad relativa (70%) y radiación solar ( $1000\text{ w}\text{m}^{-2}$ ). En el caso de la figura 5a cuando las ventilas están cerradas la temperatura alcanza un valor de  $48.5^{\circ}\text{C}$  y  $41^{\circ}\text{C}$  para un IAF de 1 y 3.5 respectivamente, una diferencia de  $7.5^{\circ}\text{C}$  entre el menor y mayor IAF. Cuando la ventila se abre a un 33% y al incrementarse la velocidad del viento a 1m/s provoca el enfriamiento del invernadero, la temperatura descendió a  $36.5^{\circ}\text{C}$  y  $41.5^{\circ}\text{C}$  para IAF de 3.5 y 1 respectivamente, a una velocidad del viento de 2 m/s la temperatura en el invernadero es de  $38.5^{\circ}\text{C}$  y  $35^{\circ}\text{C}$  a IAF de 1 y 3.5 respectivamente. Al incrementarse la velocidad del viento la temperatura sigue descendiendo

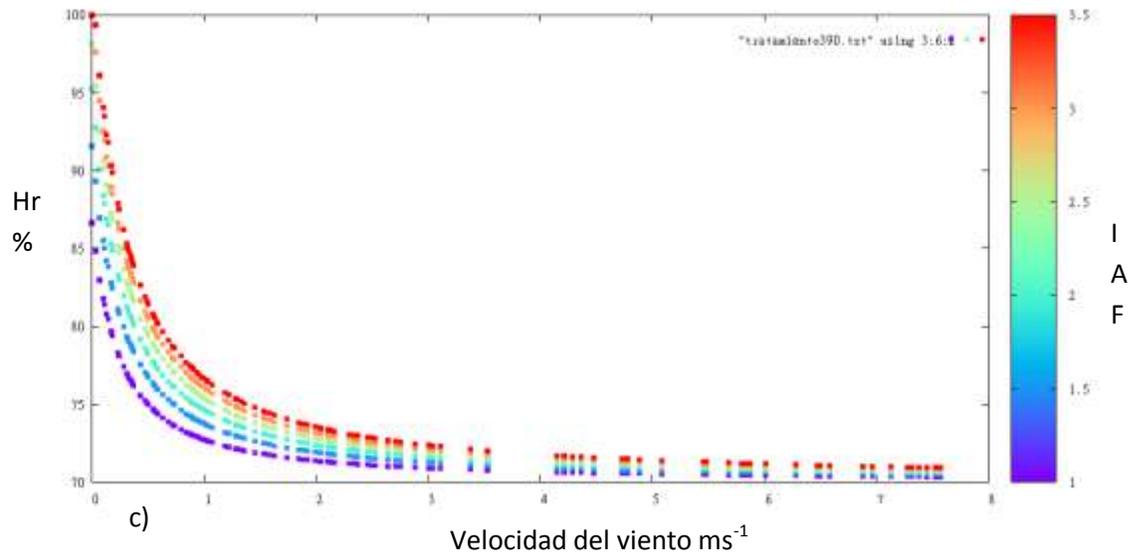
aunque la reducción es constante para velocidades e IAF, para una velocidad de 7 m/s la diferencia de temperatura entre índices es de 2°C (34°C-32°C).

Cuando la ventila se abre un 66% el invernadero se enfría comparado con una apertura de 33%, para una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la temperatura descendió a 38°C y 35°C respectivamente, a una velocidad de 2 m/s la temperatura en el invernadero es de 36°C y 34°C. Al incrementarse la velocidad del viento la temperatura sigue descendiendo, a una velocidad de 7 m/s la diferencia entre índices es de 1°C (31°C-30°C).

Cuando la ventila se abre un 100% el invernadero tiene un mayor enfriamiento que en el caso de una apertura de 66%, para una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la temperatura descendió a 35.5°C y 34°C respectivamente, a una velocidad de 2 m/s la temperatura en el invernadero es de 34°C y 33°C. Al incrementarse la velocidad del viento la temperatura sigue descendiendo, a una velocidad de 7 m/s la diferencia entre índices es de 1/2°C (31.5°C-30°C).

Los resultados muestran que a mayores valores externos de temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar la temperatura del aire al interior se incrementó de 5 a 6 unidades con respecto a los valores de la anterior simulación y de 10 a 12 unidades con respecto a la primera simulación. Las temperaturas son críticas para el desarrollo de las plantas.





Grafica 6.- Humedad relativa (Hr) estimada al interior del invernadero ( $^{\circ}\text{C}$ ), en función de velocidad de viento, índice de área foliar a una apertura de ventilas de a) 33%, b) 66%, c) 100%, a una temperatura externa de  $30^{\circ}\text{C}$ , humedad relativa externa del 70% y radiación solar de  $1000\text{w}\text{m}^{-2}$

En la grafica 6 presenta el valor estimado de la humedad relativa al interior del invernadero para diferentes valores de IAF y de velocidad del viento a tres apertura de ventila para los mayores valores externos de temperatura del aire ( $30^{\circ}\text{C}$ ), humedad relativa (70%) y radiación solar ( $1000\text{ w}\text{m}^{-2}$ ). En el caso de la grafica 6a cuando las ventilas están cerradas la humedad relativa alcanza un valor de 87% y 100% para un IAF de 1 y 3.5 respectivamente, una diferencia de 13% entre el menor y mayor IAF. Cuando la ventila se abre a un 33% y al incrementarse la velocidad del viento a  $1\text{m/s}$  se incrementa las renovaciones de aire, la humedad relativa disminuye a 77% y 84% para IAF de 1 y 3.5 respectivamente, a una velocidad del viento de  $2\text{ m/s}$  la humedad relativa en el invernadero es de 74% y 79% a IAF de 1 y 3.5. Al incrementarse la velocidad

del viento la humedad relativa sigue disminuyendo, para una velocidad de 7 m/s la diferencia entre índices es de un 3% (71%-74%).

Cuando la ventila se abre un 66% aumentan las renovaciones de aire que en el caso de una apertura de 33%, para una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la humedad relativa descendió a 74% y 79% respectivamente, a una velocidad de 2 m/s desciende a 72% y 75%. Al incrementarse la velocidad del viento la humedad relativa sigue descendiendo, a una velocidad de 7 m/s la diferencia entre índices es del 2% (70%-72%).

Cuando la ventila se abre un 100% la renovación del aire es mayor comparado con la apertura de 66%, para una velocidad de 1 m/s y un IAF de 1 y 3.5 la humedad relativa descendió a 73% y 76% respectivamente, a una velocidad del viento de 2 m/s la humedad relativa en el invernadero es de 72% y 74% a IAF de 1 y 3.5. Al incrementarse la velocidad del viento la humedad relativa sigue descendiendo, a una velocidad de 7 m/s la diferencia entre índices es de un 1% (70%-71%).

A los valores externos más elevados de temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar la humedad relativa es bastante elevada que podría no ser adecuada para el mejor desarrollo del cultivo.

## V. CONCLUSION

El enfriamiento al interior del invernadero es mayor a medida que se incrementa la apertura de las ventilas, el índice de área foliar y la velocidad del viento, debido al incremento en la remoción del aire y a la transpiración de las hojas. Las mayores reducciones de temperatura ocurren a bajas velocidades del viento 1m/s y 2 m/s, al incrementarse la velocidad la reducción de temperatura es de menor magnitud y constante entre velocidades.

Al incrementarse los valores externos de temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar, la temperatura del aire al interior del invernadero se incrementa alcanzando valores que son críticos para el desarrollo del cultivo cuando las ventilas no están completamente abiertas y a bajas velocidades del viento.

Entre mayor es la apertura de las ventilas y la velocidad del viento la reducción de la humedad relativa en el interior del invernadero será mayor, debido a que se incrementa las renovaciones de aire, a mayor IAF la transpiración aumentara y por consecuencia la humedad relativa. Las mayores reducciones de humedad relativa ocurren a bajas velocidades del viento de 1m/s y 2 m/s, al incrementarse la velocidad la reducción de humedad relativa es de menor magnitud y constante entre velocidades

A valores externos más elevados de temperatura del aire, humedad relativa y radiación solar la humedad relativa al interior del invernadero es elevada que podría no ser adecuada para el mejor desarrollo del cultivo.

## VI. BIBLIOGRAFIA

- Alpi, A. y Tognoni, F. 1999. Cultivo en invernadero. Ed. Mundi-Prensa. España. 345p.
- Bakker, J. C. 1995. Greenhouse climate control: Constraints and limitations. *Acta Horticulturae*. 399:25-35.
- Baptista, F.J.; Bailey, B.J.; Meneses, J.F. (2001). Natural ventilation of greenhouses: comparison of measured and predicted ventilation rates. *Agribuilding*, 136–151.
- Berninger, E. 1989. Cultures florales de serre en zone méditerranéenne française: Eléments climatiques et physiologiques. Ed. INRA. PHM-*Revue Horticole*. Paris
- Bot, G. 1989. A validated physical model of greenhouse climate. *Acta Hort (ISHS)*. No. 245. 389 - 396 pp.
- Boulard and Baille. 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology*. No. 65. 145 – 157 pp.
- Boulard, T., Baille, A. (1995). Modeling of air exchange rate in a greenhouse equipped with continuous roof vents, 1995. *Journal of Agricultural Engineering Research* : 37 - 48.
- Bouzo, C. Gariglio, N. Pilatti, R. Grenón, D. Favaro, J. Bouchet, E. Freyre, C. 2006. 'InverSim': A Simulation Model for a Greenhouse. *Acta Hort (ISHS)* No. 719. 271 – 279 pp.
- 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.

- 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 laproducción agrícola. Ed. Mundi-Prensa. 315 p.
- FAO. 2002. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 318 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.
- Hanan J.J. (1997). Greenhouses. Advanced technology for protected horticulture. CRC Press.
- Jones, H. G. 1992. Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge University Press. 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.
- 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.
- Schrevens, E. Jancsok, P. and Dieussaert, K. 2008. Uncertainty on estimated predictions of energy demand for dehumidification in a closed tomato greenhouse. Acta Hort (ISHS). No. 801. 1347 - 1354 pp

- 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.
- Steta-Gándara, J. 2004. Espectacular crecimiento de invernaderos en México. Entrevista en *Teorema ambiental* No. 43. [http://www.teorema.com.mx/articulos.php?id\\_sec=45&id\\_art=1104](http://www.teorema.com.mx/articulos.php?id_sec=45&id_art=1104)