



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Biosistemas

TESIS

Implementación de pantallas térmicas e invernaderos semi-enterrados como opción para el control pasivo de las variables climáticas.

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de la:

Maestría en Ciencias en Ingeniería de Biosistemas

Presenta:

ARTURO ARANA JUARISTI

Dirigido por:

M. C. ADÁN MERCADO LUNA

SINODALES

M.C. Adán Mercado Luna.
Presidente

Dra. Rosario Guzmán Cruz.
Secretario

Dr. Enrique Rico García.
Vocal

M.C. Oscar Alatorre Jácome.
Suplente

Dr. Genaro M. Soto Zarazúa.
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

México

ARTURO ARANA JUARISTI

IMPLEMENTACIÓN DE PANTALLAS TÉRMICAS E INVERNADEROS SEMI-
ENTERRADOS COMO OPCIÓN PARA EL CONTROL PASIVO DE LAS
VARIABLES CLIMÁTICAS.

2013



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

IMPLEMENTACIÓN DE PANTALLAS TÉRMICAS E INVERNADEROS
SEMI-ENTERRADOS COMO OPCIÓN PARA EL CONTROL PASIVO DE
LAS VARIABLES CLIMÁTICAS.

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO
DE:

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS

PRESENTA:

ARTURO ARANA JUARISTI

DIRIGIDO POR:

M. C. ADÁN MERCADO LUNA

QUERÉTARO, QRO. JUNIO DE 2013

RESUMEN

En esta investigación se evaluó el comportamiento de la temperatura mínima, la humedad relativa mínima y máxima de cuatro prototipos de invernaderos, así como el peso húmedo y seco final de un cultivo de lechuga variedad sangría (*lactuca sativa*) en cada uno de los prototipos. La evaluación de las variables climáticas internas de los invernaderos se compararon mediante un análisis estadístico (comparación de medias y prueba de Tukey). Así mismo se ajustó el modelo matemático auto regresivo lineal (ARX) para predecir el comportamiento de la temperatura y la humedad absoluta internas considerando las variables: temperatura (T_i) y humedad absoluta ($H.R._i$) internas en tiempos anteriores y temperatura (T_o), humedad absoluta ($H.A._o$) y radiación solar ($R.S._o$) externas en los cuatro prototipos de invernadero. Para el ajuste del modelo matemático se llevaron a cabo dos repeticiones de la investigación (del 12 de Septiembre al 1 de Octubre y del 4 al 29 de Diciembre del 2012), con el 25% de los datos de la primer corrida se obtuvo el modelo y con el 75% restante se validó, para la segunda corrida se tomaron los coeficientes obtenidos en la primera y con el 100% de los datos se validó nuevamente. El análisis estadístico mostró que el T2 mantiene la temperatura mínima interna más elevada de 2-3 °C, así como la humedad relativa mínima (45 %) en comparación con el T3, existiendo diferencias significativas a un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. El crecimiento del cultivo también mostró diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre el T2 y el tratamiento control (T3). En cuanto al ajuste del modelo matemático auto regresivo lineal (ARX), se obtuvo un ajuste adecuado como lo indican los resultados de los coeficientes estadísticos: r (coeficiente de correlación) y E (coeficiente de eficiencia) próximos a 1 y los valores de %SEP (error estándar porcentual de la predicción) y ARV (varianza relativa promedio) cercanos a 0. La combinación de invernaderos semi-enterrados y pantallas térmicas mantienen las temperaturas mínimas y la humedad relativa más elevadas influyendo positivamente en el desarrollo del cultivo.

(Palabras clave: temperatura, humedad relativa, humedad absoluta, tratamientos, modelo matemático)

SUMMARY

In this research, behavior of the minimum temperature, minimum and maximum relative humidities were evaluated in four greenhouse prototypes. Final dry and wet weights of lettuce crop (*lactuca sativa*) were also evaluated in each of the prototypes. The evaluation of internal greenhouse climate variables was compared by statistical analysis (means comparison and Tukey test). Likewise, the linear autoregressive mathematical model (ARX) was adjusted for predicting internal temperature and absolute humidity behavior considering the internal temperature (T_i) and absolute humidity ($H.R._i$) in previous times and external temperature (T_o), absolute humidity ($H.A._o$) and solar radiation ($R.S._o$) in the four greenhouse prototypes. For the adjustment of the mathematical model investigation were performed by repeated (September 12 to October 1 and 4 to December 29, 2012). Using the information of the first experiment the model was obtained with the first 25% data and the remaining 75% were used for validation. The first experiment obtained coefficients were taken for the model validation using the 100% data of the experiment repetition. Statistical analysis showed that T2 maintains higher the internal minimum temperature (2-3 °C), and the minimum relative humidity (45%) compared to T3, with significant differences at a significance level of $P \leq 0.05$. Crop growth also showed significant differences ($P \leq 0.05$) between T2 and control treatment (T3). The linear autoregressive mathematical model (ARX) showed an appropriate adjustment obtaining the statistical coefficients: r (correlation coefficient) and E (coefficient of performance) close to 1 and the values of % SEP (standard error of prediction percentage) and ARV (average relative variance) near 0. The combination of semi-underground greenhouses and thermal screen maintain minimum temperatures and higher relative humidities positively influencing the crop development.

(Keywords: temperature, relative humidity, absolute humidity, treatments, mathematical model)

DEDICATORIAS

A DIOS TODO PODEROSO.

A mi esposa TERESITA por el apoyo, amor y comprensión TE AMO.

A mis hijos ARTURO, JUAN ÁNGEL y TERESITA por estar siempre a mi lado LOS QUIERO.

A mi nietecillo EMILIANO (mi enanillo EMI) que hizo nacer en mí un sentimiento inexplicable TE QUIERO MUCHO.

A mis papás Joaquín Arana Moran (q.e.p.d) y Esther Juaristi de Arana QUE ME DIERON LOS MEJORES REGALOS: LA VIDA Y SU EJEMPLO.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por darme la oportunidad de continuar superándome profesionalmente.

A la Facultad de Ingeniería por el apoyo y las facilidades para lograr una más de mis metas Profesionales.

A el CONACYT por la beca otorgada a un servidor en este periodo.

Al Dr. Gilberto Herrera Ruiz, por su invaluable apoyo en todo momento, quien es un impulsor importante en mi vida profesional, mi reconocimiento y respeto, gracias Doctor.

Al Dr. Aurelio Domínguez González por el apoyo recibido en esta etapa de aprendizaje tan importante en mi vida profesional.

A mi tutora la Dra. Rosalía V. Ocampo Velázquez por su apoyo a la realización de la presente.

A mis hermanos Joaquín, Esther, Fernando, Evaristo, Vicente y José Luis, gracias por su apoyo y confianza.

A Rosy Cordero Espiritu Santo (q.e.p.d) mi carnalita, gracias por tu cariño y amistad.

A mis suegros Federico Hernández Becerra (q.e.p.d.) y Josefina Almanza de Hernández (q.e.p.d.), y a mis cuñados Josefina (q.e.p.d.), Luz María (q.e.p.d.), Luis, Guadalupe y Antonio Hernández Almanza, gracias por ser parte de mi familia y apoyarme en todos mis proyectos de vida.

A mi Director de tesis M.C. Adán Mercado Luna, por sus aportaciones a mi superación profesional y personal, gracias por estar siempre para apoyarme.

Al coordinador de la maestría Dr. Enrique Rico García por estar siempre al pendiente de mis avances un invaluable apoyo.

A mis sinodales por su apoyo para que la realización de la presente tesis fuera un mejor trabajo de investigación.

A mis profesores, que dentro y fuera de las aulas me apoyaron con sus conocimientos y experiencia personal y profesional, y de manera muy especial a la Dra. Rosario Guzmán Cruz.

A mis compañeros y amigos de generación Marcela, Perla Valeria, Francisco e Irving gracias por su apoyo y amistad, pero de manera muy especial a Antonio Vázquez Ortega

gracias y sobre todo a Humberto Aguirre Becerra por su amistad, gran apoyo, paciencia y conocimientos que desinteresadamente compartió con un servidor.

A mis amigos Ismael, Martha Beatriz, Elena, Maribel, Víctor, Rafael, Samuel, Edgar y Luciano, gracias por su apoyo.

A todos los Docentes, trabajadores Administrativos y de campo del Campus Amazcala por su apoyo.

Y a todos los que de alguna manera colaboraron con un servidor en este camino tan interesante que es la Educación y la Investigación.

ÍNDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Índice	v
Índice de cuadros	vii
Índice de figuras	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	3
2.1 Historia del desarrollo de los invernaderos	3
2.2 El crecimiento en México de la agricultura protegida	4
2.3 Importancia del desarrollo tecnológico en los invernaderos	5
2.4 Importancia del clima en la agricultura	7
2.5 Sistema de calefacción	8
2.6 Pantallas térmicas e invernaderos enterrados	8
2.7 Investigaciones con pantallas térmicas	19
2.8 Investigaciones con invernaderos semienterrados	20
2.9 Investigaciones con modelos matemáticos	21
2.10 Hipótesis y objetivos	23
III. METODOLOGÍA	24
3.1 Localización del área de estudio	24
3.2 Suelo	26

3.3 Material vegetal	26
3.4 Nutrición	27
3.5 Manejo del riego	27
3.6 Diseño experimental	27
3.7 Variables evaluadas	28
3.7.1 Dentro de los prototipos	28
3.7.2 Al exterior de los prototipos	29
3.7.3 De la planta	30
3.7.4 Procedimiento del manejo de pantallas térmicas y ventanas	31
3.8 Análisis estadístico	31
3.9 Ajuste del modelo matemático	32
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1 Temperatura	36
4.2 Humedad relativa	40
4.3 Crecimiento del cultivo en peso húmedo y peso seco	42
4.4 Modelo ARX	43
4.5 Conclusiones	66
4.6 Recomendaciones	67
V. BIBLIOGRAFIA	68
VI. ANEXO I	73
Producción científica	

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
4.1 Coeficientes del sistema de ecuaciones usado para estimar T_i y HA_i .	45
4.2 Coeficientes estadísticos de la Temperatura en la primer corrida (12 Septiembre-1 de Octubre de 2012).	50
4.3 Coeficientes estadísticos de la Humedad absoluta en la primer corrida (12 Septiembre-1 de Octubre de 2012).	53
4.4 Coeficientes estadísticos de la Temperatura en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).	60
4.5 Coeficientes estadísticos de la Humedad absoluta en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1 Diseño de un invernadero Walipini (Iturry, 2002).	14
2.2 Ubicación y diseño de las puertas (Iturry, 2002).	15
2.3 Diseño de un invernadero paqar huyu (Iturry, 2002).	17
2.4 Diseño del bastidor (Iturry, 2002).	17
2.5 Diseño del botaguas y bandas de goma (Iturry, 2002).	18
2.6 Diseño de la ventilación (Iturry, 2002).	18
3.1 Prototipos de invernaderos a nivel del suelo y semi-enterrados.	25
3.2 Líneas secundarias de riego.	25
3.3 Pantalla térmica aluminizada.	26
3.4 Lechuga variedad sangría.	27
3.5 a) Prototipo a nivel del suelo. b) Prototipo semi-enterrado.	28
3.6 Data logger Watch Dog.	28
3.7 Sensor de radiación PAR.	29
3.8 Estación meteorológica Davis Pro2.	30
3.9 Balanza analítica.	30
3.10 Estufa.	31
4.1 Temperaturas de un día del cultivo a1) y a2) 12 de Septiembre de 2012 y b1) y b2) 4 de Diciembre de 2012.	38
4.2 Temperaturas promedio mínimas por tratamiento y externa a) Septiembre-Octubre de 2012 y b) Diciembre de 2012.	39

4.3 Comparación de medias de temperaturas mínimas en los cuatro tratamientos y el exterior a un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. a) Sept.-Oct. y b) Diciembre.	40
4.4 Comparación de medias de humedad relativa mínima en los cuatro tratamientos y el exterior a un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. a) Sep.-Oct. y b) Diciembre.	41
4.5 Comparación de medias de humedad relativa máxima en los cuatro tratamientos y el exterior a un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. a) Sep.-Oct. y b) Diciembre.	41
4.6 Comparación de medias de peso húmedo en los cuatro tratamientos a un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. a) Sep.-Oct. y b) Diciembre.	42
4.7 Comparación de medias de peso seco en los cuatro tratamientos a un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. a) Sep.-Oct. y b) Diciembre.	43
4.8 Datos medidos y datos estimados correspondientes a la temperatura en la primera corrida (12 de Septiembre-1 de Octubre de 2012).	46
4.9 Ampliación de los datos medidos (—) y datos estimados (- -) correspondientes a la temperatura en la primera corrida (12 de Septiembre-1 de Octubre de 2012).	47
4.10 Datos medidos y datos estimados correspondientes a la humedad absoluta en la primera corrida (12 de Septiembre-1 de Octubre de 2012).	48
4.11 Ampliación de los datos medidos (—) y datos estimados (- -) correspondientes a la humedad absoluta en la primera corrida (12 de Septiembre-1 de Octubre de 2012).	49
4.12 Gráficas del coeficiente de correlación valores reales (medidos) vs valores del modelo (estimados) correspondientes a la temperatura de la primer corrida en cada uno de los tratamientos a) T1, b) T2, c) T3 y d) T4.	52

4.13 Gráficas del coeficiente de correlación valores reales (medidos) vs valores del modelo (estimados) correspondientes a la humedad absoluta de la primer corrida en cada uno de los tratamientos a) T1, b) T2, c) T3 y d) T4.	55
4.14 Datos medidos y datos estimados correspondientes a la temperatura en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).	56
4.15 Ampliación de los datos medidos (—) y datos estimados (- -) correspondientes a la temperatura en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).	57
4.16 Datos medidos y datos estimados correspondientes a la humedad absoluta en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).	58
4.17 Ampliación de los datos medidos (—) y datos estimados (- -) correspondientes a la humedad absoluta en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).	59
4.18 Gráficas del coeficiente de correlación valores reales (medidos) vs valores del modelo (estimados) correspondientes a la temperatura de la segunda corrida en cada uno de los tratamientos a) T1, b) T2, c) T3 y d) T4.	62
4.19 Gráficas del coeficiente de correlación valores reales (medidos) vs valores del modelo (estimados) correspondientes a la humedad absoluta de la segunda corrida en cada uno de los tratamientos a) T1, b) T2, c) T3 y d) T4.	65

I. INTRODUCCIÓN

Un invernadero es una construcción de vidrio o plástico con un microclima apropiado para el adecuado desarrollo de una plantación específica. Por lo tanto, partiendo del estudio técnico de ambientación climática, deben obtenerse en él, la temperatura, humedad relativa y ventilación apropiadas que permitan alcanzar una alta productividad, a bajo costo, en menos tiempo, sin daño ambiental, protegiéndose de las lluvias, el granizo, las heladas, los insectos o los excesos de viento que pudieran perjudicar un cultivo (Henaó, 2001).

La aplicación de la tecnología de invernadero en los cultivos agrícolas fue motivada, en un inicio, por las condiciones climatológicas de algunos países. Tal es el caso de Israel a mediados del siglo XX. Esta misma tecnología se ha venido extendiendo en los últimos años a diferentes países que presentan problemas con el clima, la escasez de agua y con algunas plagas. Además, las exigencias de la economía global obligan a los productores agrícolas al uso de algunas formas de esta tecnología para poder competir en los mercados internacionales. En México el desarrollo de la industria de producción bajo invernaderos comenzó en los años 70^s, pero ha sido en los últimos doce años cuando el crecimiento en su producción se ha acelerado en gran medida. En principio se establecieron proyectos cerca de zonas costeras, con muy baja tecnología, utilizando sólo cubiertas de plástico o mallas sombra. Actualmente, la producción de hortalizas en invernadero ha ganado terreno y se ha tenido un desarrollo muy importante de estos sistemas de producción en Jalisco, Chihuahua, Zacatecas, Guanajuato, Coahuila, Estado de México y otras entidades, esto bajo el programa de apoyos del gobierno para la modernización de la agricultura (Rivera, 2007).

En la búsqueda continua de aumentar la rentabilidad, bien sea a través de un mayor rendimiento de los cultivos o bien buscando un aprovechamiento más eficiente de la energía empleada o, finalmente, por una mejora del rendimiento del trabajo aplicado en todo el proceso de la producción, los dos primeros aspectos son los que dependen de un mejor control del clima del invernadero. En la producción hortícola intervienen muchas variables que participan en procesos físicos y biológicos y por lo tanto el número de factores que es necesario regular en un invernadero es grande, temperaturas del aire y

sustrato, humedad, dióxido de carbono (CO₂), luz, potencial de hidrogeno (pH), conductividad eléctrica (C.E), etc. Existen además interacciones entre muchas de éstas variables por lo que regular su combinación óptima no es posible sino con la ayuda de sistemas más capaces y complejos, con posibilidad de llevar algoritmos de control que integren o relacionen varias variables climáticas. Además se pueden usar modelos que faciliten la predicción del comportamiento del sistema ante las diversas condiciones posibles, con lo cual la regulación del clima se puede hacer con mayor precisión y estabilidad, que hasta hace poco no se habían generalizado en este sector (Martínez *et al.*, 2012).

Con la finalidad de incrementar la productividad en el sector primario los invernaderos deben transmitir 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, 2012). De lo contrario severas condiciones se pueden presentar, por ejemplo, las heladas que destruyen los cultivos de estación cálida, las temperaturas por debajo de 10 a 12 °C, durante una serie de días consecutivos, no destruyen los cultivos, pero afectan su comportamiento y condicionan la productividad tanto cualitativa como cuantitativamente (FAO, 2002).

Una herramienta utilizada para mejorar el control climático son las pantallas térmicas, las cuales reducen significativamente las pérdidas de calor en los invernaderos, dificultan las pérdidas de calor y disminuyen el volumen de aire a calentar, por lo que se ha extendido su uso para economizar los gastos de combustible en invernaderos con calefacción (IDAE, 2008).

Otro sistema para reducir las pérdidas de calor en los invernaderos, es cuando estos se encuentran enterrados ya que pretenden aprovechar el calor del suelo en beneficio de la temperatura de la atmosfera interior del invernadero, cuando las temperaturas exteriores son menores que la temperatura que tiene en ese momento el suelo donde está enterrado el invernadero (Serrano, 2005).

Por lo anteriormente citado, en esta investigación se plantea la evaluación de la implementación de invernaderos semi-enterrados como una opción para el control pasivo de las variables climáticas (Temperatura y Humedad relativa), en donde de manera natural el suelo emite calor y aunado con la combinación de pantallas térmicas por la noche ayuden a mantener la temperatura y la humedad relativa mínimas más elevadas.

II. FUNDAMENTACIÓN TEORICA

2.1 Historia del desarrollo de los invernaderos.

Los primeros intentos documentados de cultivo protegido se remontan a la época del imperio romano, durante el reinado del emperador Tiberio César, al emplear pequeñas estructuras móviles para el cultivo del pepino, que se sacaban al exterior si el tiempo era propicio o se guardaban a cubierto en caso de inclemencias climáticas (Wittwer y Castilla., 1995).

Posteriormente (del siglo XVI al XVII) aparecen los precursores de los invernaderos inicialmente en Inglaterra, Holanda, Francia y China. Ya en el siglo XIX aparecen los primeros invernaderos con cubierta de dos aguas y pronto se expandieron desde Europa a América y Asia ubicándose cerca de las grandes ciudades (Enoch y Enoch, 1999).

En el siglo XX el desarrollo económico especialmente después de la segunda guerra mundial impulsa la construcción de invernaderos de cristal, donde Holanda a mediados de este siglo superó las 5000 ha en su mayoría dedicadas a la producción de tomate (Castilla, 2007).

Con la aparición de los plásticos se expande la superficie de los invernaderos, en el Oriente principalmente en Japón y China y en los países mediterráneos de España e Italia encabezando la superficie. En Europa, la crisis energética y la introducción de los plásticos contribuyeron al desplazamiento, en parte, de la producción de hortalizas en invernadero desde los países del norte (Holanda, principalmente) al litoral mediterráneo, donde los invernaderos de plástico, más económicos, permitieron la producción a bajo costo de

hortalizas fuera de estación. La mejora de las redes de transporte facilitó la distribución de la producción a los mercados nacionales y europeos, cuya demanda crecía impulsada por el desarrollo económico. Paralelamente, se produjo en el Norte de Europa un cambio en las producciones de los invernaderos, incrementándose el cultivo de flor cortada y ornamental, a costa de las hortalizas (Castilla, 1994).

Podría decirse que existen dos concepciones básicas de invernadero. La primera (típica del Norte de Europa) persigue el máximo control climático del medio ambiente para optimizar la producción, precisando del empleo de invernaderos sofisticados. La otra concepción, que persigue un mínimo control climático empleando invernaderos poco tecnificados, permite producir en condiciones subóptimas a un bajo costo, y es típica de los invernaderos mediterráneos. La elección entre una concepción u otra (existe una graduación entre ambos extremos) depende del tipo de especie a cultivar, de su ubicación, de las posibilidades financieras y de las condiciones socioeconómicas locales (Enoch, 1986).

El área mediterránea en 1987 era el líder en la superficie mundial de invernaderos con 65,000 ha (Nisen *et al.*, 1990) y alcanzó las 200,000 ha en el 2006 mayoritariamente cubiertos de plástico. En España los invernaderos de plástico cubren el 99 % de la superficie total, estimada en 53,843 ha en el año 2005, que duplica la superficie existente diez años antes (Castilla, 2007).

En Japón, que fue el país líder en invernaderos en el pasado, los invernaderos de vidrio representan sólo el 5 % del total (Ito, 1999). De modo similar, en China la cubierta de plástico es absolutamente mayoritaria, con un espectacular crecimiento, pues siendo prácticamente inexistentes los invernaderos en 1980, la superficie para el 2004 ya superaba 1, 496,000 ha (Zhang, 2006).

2.2 El crecimiento en México de la agricultura protegida.

México cuenta con 11,759 ha de agricultura protegida. Según SAGARPA, desde el 2001 esta cifra se ha incrementado en más de 10,000 ha. El ritmo de crecimiento de la agricultura protegida en México es de 1,200 ha/año, predominando casas-sombra e invernaderos de baja tecnología. Hasta 29,821 ha podrían abarcar los cultivos protegidos en México, según estima la Asociación Mexicana de Constructores de Invernadero (AMCI).

Cuatro estados concentran la mayor superficie de cultivo en invernadero: Sinaloa es el estado de mayor crecimiento, con 3,366 ha, le siguen Jalisco superando 2,000 ha, Guanajuato con cerca de 2,000 ha y Michoacán que suma 1,200 ha de macrotúneles. El precio del proyecto ofertado está ligado al nivel de tecnología incorporado en el invernadero. Partiendo de un precio base, el invernadero se irá encareciendo a medida que se incorporen sistemas, tales como calefacción, humidificación, control de clima, etc. Una estructura casa-sombra produce unas 160 t/ha de tomate; mientras que en un invernadero con tecnología media y mejor sustrato, podrían lograrse 350 t/ha; y en uno de alta tecnología, más de 500 t/ha (AMCI, 2012).

2.3 Importancia del desarrollo tecnológico en los invernaderos.

El equipamiento del invernadero puede incluir todo tipo de sistemas para conseguir las condiciones ambientales y de nutrición favorables para el desarrollo vegetal: sistemas de riego y fertirrigación, generación y distribución del calor en el volumen del invernadero, refrigeración, equipos de ahorro energético, sombreo, enriquecimiento con CO₂, iluminación artificial complementaria y diferentes equipos informáticos y de control. Para decidir el equipamiento necesario dentro de un invernadero, es necesario tener en cuenta un cierto número de factores. Las condiciones climáticas, la calidad del suelo y del agua de riego, el suministro de energía eléctrica y la red de comunicaciones pueden influir en la ubicación de la instalación, aunque en este sentido, la facilidad de comercialización suele ser determinante. Las condiciones climáticas y el tipo de cultivo suelen determinar el tipo de invernadero a elegir. Siempre es interesante, de cara a optimizar los recursos e instalaciones utilizados en el invernadero, conocer la intensidad de la radiación solar, el régimen de vientos y la evolución de la temperatura y humedad relativa en sus valores medios, diarios, extremos y estacionales en la zona donde va a situarse el invernadero en cuestión (Rodríguez 2009).

La horticultura bajo invernadero es, quizás, la actividad agrícola en la que se va implantando con mayor rapidez la informática y el control automático. En la búsqueda continua de aumentar la rentabilidad, bien sea a través de un mayor rendimiento de los cultivos o bien buscando un aprovechamiento más eficiente de la energía empleada o, finalmente, por una mejora del rendimiento del trabajo aplicado en todo el proceso de la

producción, los dos primeros aspectos son los que dependen de un mejor control del clima del invernadero. El control climático del invernadero es un arma de enorme eficacia para la prevención de plagas y enfermedades de los cultivos, y que facilita y aumenta de manera clara, las posibilidades de aplicar programas de lucha integrada. Los avances en la tecnología de los sensores, actuadores, autómatas programables y de los ordenadores, cada vez más precisos y baratos favorecen, sin lugar a duda, esta evolución de los agricultores. En la producción hortícola intervienen muchas variables que participan en procesos físicos y biológicos y por lo tanto el número de factores que es necesario regular en un invernadero es grande, temperaturas del aire y sustrato, humedad, CO₂, luz, pH, C.E., etc. Existen además interacciones entre muchas de estas variables y regular su combinación óptima no es posible sino con la ayuda de sistemas más capaces y complejos, con posibilidad de llevar algoritmos de control que integran o relacionan varias variables climáticas y de usar modelos que faciliten la predicción del comportamiento del sistema ante las diversas condiciones posibles, con lo cual la regulación del clima se puede hacer con mayor precisión y estabilidad, que hasta hace poco no se habían generalizado en este sector. De las necesidades de control cuando lo único que se manejaba automáticamente era la apertura y cierre de las ventanas, a la necesidad actual de manejar de modo combinado la ventilación, calefacción del aire, del sustrato, la pantalla térmica, o bien la ventilación juntamente con la nebulización ultrafina y posiblemente una malla de sombreado, a lo que hay que añadir el riego y el control de la solución fertilizante, hay un salto tecnológico notable que va a continuar (Martínez *et al.*, 2012). Sin embargo, el clima dentro de los invernaderos depende en gran medida de las condiciones climáticas exteriores. Por lo tanto, para el desarrollo adecuado de un cultivo, es necesario implementar estrategias de control que tengan en cuenta variables como: temperatura del aire, contenido de humedad del aire y la concentración de CO₂. Estos sistemas de control se basan en modelos matemáticos que predicen las condiciones del clima dentro de un invernadero, teniendo en cuenta, las condiciones climáticas externas (Castañeda-Miranda *et al.*, 2006).

Una herramienta para mejorar el manejo de los invernaderos son los modelos matemáticos precisos y simples para predecir el comportamiento de las variables atmosféricas. Sin embargo se han presentado modelos complejos (mecanicistas) basados en leyes físicas (Bot, 1983; Deltour *et al.*, 1985; De Zwart, 1996; Wang y Boulard, 2000; Tap,

2000; Castañeda-Miranda *et al*, 2007;. Ruiz-Palacios y Cotrino-Badillo, 2010), que son difíciles de ajustar debido al comportamiento no lineal del clima de un invernadero. Otros tipos de modelos son los empíricos o de caja negra, basados en observaciones entre las entradas y salidas, como los modelos auto regresivos con entradas externas (ARX), estos tienen la ventaja de ser generados rápidamente ya que se obtienen experimentalmente al establecer las relaciones de entrada-salida del sistema a través de la técnica de identificación de parámetros (Ljung, 1999).

2.4 Importancia del clima en la agricultura.

Las características climáticas (temperatura, humedad relativa, radiación solar y concentración de dióxido de carbono) de una zona, deben analizarse en relación con las necesidades de las plantas que se intentan cultivar bajo protección, ya que son principalmente especies de estación cálida, adaptadas a temperaturas de aire con medias mensuales que fluctúan de 17 a 27 °C, con temperaturas mínimas medias de 12 °C, temperaturas máximas medias mensuales de 32 °C. Las reacciones biológicas de importancia no pueden desarrollarse si la temperatura del invernadero está por debajo de 0 °C, o por encima de 50 °C. El límite inferior corresponde al punto de congelación del agua y el superior a la desnaturalización de las proteínas. A pesar de que las necesidades higrométricas en los cultivos no son fáciles de especificar, es muy común admitir que los valores extremos de humedad atmosférica son desfavorables. Si la humedad ambiental es demasiado alta, el intercambio gaseoso queda limitado, reduciéndose la transpiración y por consiguiente la absorción de nutrientes. Si la humedad ambiental es demasiado baja se cierran los estomas y se reduce la tasa de fotosíntesis. La humedad alta puede dificultar la polinización puesto que el polen húmedo puede quedar pegado en los órganos masculinos. Las humedades relativas del 70 al 90 % pueden considerarse favorables. La importancia del papel que juega la luz en la producción hortícola está fuera de duda. Los invernaderos deben transmitir 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, 2012).

El aire que rodea a las plantas es uno de los factores más importantes ya que éstas, como seres vivos que son, respiran y realizan sus funciones fisiológicas en función de esta actividad. Es por ello que la ventilación dentro de un invernadero es uno de los factores clave a controlar. La ventilación de los invernaderos se suele realizar, o bien mediante el uso de aperturas localizadas en el techo o en los laterales del invernadero, que permiten la renovación del aire, o bien mediante el uso de ventiladores de diferentes caudales. La mejor forma de clasificar las ventilaciones es basándose en la forma en que se realiza la renovación del aire. La ventilación pasiva es aquella en la que se utilizan aperturas de ventanas en el invernadero, y el viento y las diferencias de presión van renovando el aire. Por el contrario, la ventilación activa es aquella en la cual se actúa sobre el movimiento del aire dentro del invernadero, mediante el uso de ventiladores (Cervantes, 2002ab).

2.5 Sistemas de calefacción.

Existen distintos sistemas para calentar y mantener la temperatura en el interior de un invernadero durante periodos fríos:

- Hermetismo del invernadero, evitando pérdidas de calor.
- Capas dobles de polietileno o de polipropileno, con el inconveniente de pérdida de luminosidad en el interior.
 - El propio follaje de las plantas, ya que almacenan radiación.
 - Calefactores.
 - Sistemas de calefacción por agua o aire calientes.
 - Empleo de pantallas térmicas que reducen significativamente las pérdidas de calor en los invernaderos, dificultan las pérdidas de calor y disminuyen el volumen de aire a calentar, por lo que se ha extendido su uso para economizar los gastos de combustible en invernaderos con calefacción (IDAE, 2008).
- Invernaderos enterrados estos pretenden aprovechar el calor del suelo en beneficio de la temperatura de la atmosfera interior del invernadero, cuando las temperaturas exteriores son menores que la temperatura que tiene en ese momento el suelo donde está enterrado el invernadero (Serrano, 2005).

2.6 Pantallas térmicas e invernaderos enterrados.

Los efectos que producen las pantallas térmicas en los invernaderos principalmente son:

- Aumento de la temperatura mínima nocturna del invernadero en 2-3 °C, como consecuencia de la disminución de la pérdida de radiación térmica durante la noche (Baille *et al.*, 1984).
- Incremento de 1 a 2 °C de la temperatura de las plantas y del suelo (Bailey, 1978; Boesman *et al.*, 1984).
- Descenso de las pérdidas de calor por infiltración del aire, que se ven menos afectadas por el viento (Baille *et al.*, 1984).
- Disminución significativa de la transpiración nocturna del cultivo (de Graaf, 1985) y, como consecuencia, reducción del calor consumido en el flujo evaporativo (Deltour *et al.*, 1985).

El uso de pantallas térmicas móviles produce un aumento de los rendimientos que puede alcanzar hasta el 40%. Los mejores resultados se obtienen cuando se despliegan las pantallas a finales del día y se recogen por la mañana, permitiendo disminuir el consumo de combustible destinado a calefacción del 20 al 27 %, dependiendo del tipo de pantalla utilizada, su empleo durante la noche también produce un almacenamiento de energía en el suelo y el cultivo que repercute de forma positiva durante el día (Pirard *et al.*, 1994).

Las pantallas suelen ser de polietileno o poliéster, con una o dos caras aluminizadas. Las más eficientes son las que tienen ambas caras aluminizadas ya que consiguen una temperatura del cultivo más alta, siendo además una buena alternativa de sombreo. Si sólo tiene una de ellas aluminizada, conviene que sea la que mira hacia el exterior (Baille *et al.*, 1985).

En cuanto al sistema de confección de las pantallas se pueden distinguir dos tipos (Valera *et al.*, 2001):

- Mallas de fibras tejidas. En este tipo de mallas las propias láminas de la pantalla constituyen las fibras del tejido. La densidad de la malla y el porcentaje de sombreo obtenido depende principalmente del tamaño de los huecos.

- Mallas laminares o de cintas. Están constituidas por una red tejida de poliéster de gran resistencia sobre la que se sujetan las láminas o cintas que constituyen la pantalla mediante hilos monofilamentados de polietileno de alta densidad. La densidad de la malla depende de la separación entre las láminas insertadas. Las láminas pueden insertarse planas o en espiral.

Según la forma en que se colocan las pantallas en relación a la estructura del invernadero se pueden distinguir varios tipos (Valera *et al.*, 2001):

- Pantallas suspendidas horizontalmente. La malla se extiende hasta quedar completamente plana y paralela al suelo. La altura a la que se coloca la pantalla ha de ser la máxima posible para dejar el mayor volumen posible entre el cultivo y la malla permitiendo una correcta circulación del aire. El cierre de la pantalla se realiza plegando la malla.

- Pantallas enrollables exteriores. Las pantallas se colocan enrolladas sobre la cubierta del invernadero a ambos lados de la cumbrera de forma que el cierre se realiza sobre la parte más alta del invernadero.

- Pantallas enrollables interiores. La malla se coloca enrollada alrededor de una barra de mando que gira accionada por un motor, lo que permite recoger o desplegar la malla de forma automatizada. Presenta la ventaja de permitir su colocación inclinada siguiendo la pendiente de la cubierta o incluso verticalmente para su colocación en los laterales y frontales con el objeto del cierre total del invernadero.

Otro sistema para mantener la temperatura en el interior de un invernadero durante periodos fríos son las instalaciones enterradas, ocurre que durante las horas diurnas el aire

del interior del invernadero suele tener más temperatura que el suelo que circunda este aire; a medida que este aire se vaya enfriando por la noche como consecuencia de la radiación hacia el exterior, a través de la cubierta de la techumbre, a partir de que la temperatura de la atmosfera empiece a ser menor que la temperatura del suelo, entonces las paredes que recubren el suelo empiezan a ser emisoras de calor, calentando el aire del invernadero. Por lo anterior, por ejemplo en Almería, España, con temperaturas nocturnas de -2 a -3 °C en el exterior del invernadero, las temperaturas del interior de este tipo de instalaciones pueden estar entre 7 a 9 °C. Debido a que en esta zona (Costa del sol), las plantas que se cultivan son ornamentales y requieren de una humedad relativa alta, los materiales del suelo, paredes y muros, deben ser porosos para que emitan humedad y la retengan cuando se les incorpore en forma artificial; por otra parte, estos materiales deben de ser permeables a las radiaciones de longitud de onda larga que emite el suelo hacia el interior del invernadero. Este tipo de invernaderos deben estar perfectamente incrustados en el suelo, ya que sus paredes verticales deben estar enterradas hasta 50 cm de su altura que puede quedar por encima del suelo, las cuatro paredes verticales pueden estar construidas de hormigón armado muy poroso o de bloques de cemento hueco, que en este caso conviene rellenarlos de tierra para romper el efecto aislante que pueda hacer la cámara de aire de los huecos entre otros materiales. El acceso se hace por medio de una rampa, que tendrá menos del 15% de pendiente, en esta debe hacerse un zaguán que este separado del resto del invernadero por medio de una puerta o un toldo de plástico, para evitar las descompensaciones de humedad y temperatura que puedan ocurrir cada vez que se abre la puerta exterior. En cuanto a las dimensiones del invernadero el ancho puede ser de entre 6 a 8 m y el largo puede ser tanto como uno lo quiera, pero es aconsejable hacer separaciones con paredes transversales cada 50 m (Serrano, 2005).

Estos invernaderos enterrados también se pueden utilizar para multiplicación de plantas y deben ubicarse en suelos donde se carezca de capa freática próxima y con posibilidades de inundaciones (Castilla, 2007).

Un caso especial es el invernadero enterrado que se utiliza en Almería, España. Se trata de una protección simple con una gran inercia térmica, que permite el cultivo de plantas exigentes en calor sin suministro de calefacción en invierno (FAO, 2002).

La construcción del invernadero Andino (Bolivia) diseñado por Lorini, J. en 1996 es con materiales que existen en la región, no solo por razones de costo, sino también por el hecho de que tienen mejor eficiencia térmica, como el caso de los adobes y tapias de barro. Los cimientos y sobrecimientos son realizados con piedra y agregado de barro con paja, sobre una superficie de 70 m² se cava en el terreno a 0.20 m de profundidad y 0.40 m de ancho del diseño. El ancho de la pared es de 0.40 m. Por razones térmicas, las paredes pueden ser construidas de tapial. El invernadero construido para las condiciones del altiplano central se realiza a nivel; sin embargo, en regiones donde las condiciones de los suelos son de mayor profundidad o donde el frío es más intenso, se puede construir en forma semienterrada a 0.30 m. o mayor profundidad, dependiendo de las características mencionadas; esto con el fin de aumentar la eficiencia térmica. Los resultados obtenidos en el modelo andino son buenos, habiéndose determinado menor eficiencia térmica. En el interior se tienen temperaturas diurnas que llegan entre 25 °C y 28 °C y las nocturnas registradas son de 1 °C a 2 °C en los meses de junio y julio cuyas temperaturas externas máximas son de entre 17 y 18 °C y las mínimas de -6.9 a -9.3 °C (Ayaviri, 1996).

Los invernaderos Walipinis (siempre bien) son instalaciones semienterradas cumple con los principales requisitos de construcción de instalaciones de control micro climático, con la particularidad que optimiza el régimen hídrico y térmico. La excavación puede ser manual o con maquinaria. Es recomendable que el horizonte arable de la superficie del suelo, sea separado para poder de esta forma utilizar más adelante en la cama de siembra. La profundidad de excavación del walipini se deja a criterio del constructor dependiendo de la explotación y manejo del ambiente; sin embargo, se recomienda una profundidad total de excavación de 2.20 m, para que una vez preparado el drenaje y la cama de siembra quede aproximadamente un foso de 1.80 m. de profundidad. El área a ser perforada, puede variar de acuerdo a las necesidades de los productores en Letanías. El área excavada es de 4.0 m. x 22.0 m, la razón por la que se optó por esta área son las dimensiones del rollo de agrofilm (el item más costoso). De esta forma se consigue utilizar todo un rollo de agrofilm sin sobrantes y la producción costo-beneficio por m² de construcción es mayor. Los muros del walipini pueden ser construidos de diferentes materiales. Se debe poner especial atención en la solidez de los mismos, ya que deben soportar el peso del techo y de la berma de tierra que descansa sobre ellos. Con el afán de

reducir costos en materiales de construcción, en el campo experimental de Letanías los muros son de tapiales de 0.6 m. de alto por 0.5 m. de ancho y de 2.0 m. de largo. Los muros se edificaron directamente sobre la superficie del suelo sin cimientos, la pendiente del techo se apoya sobre un murete de tapial que se construyó con el afán de dar mayor resistencia al suelo, pues el horizonte arable no nos proporciona la dureza necesaria. El excavar a una profundidad de 0.6 m. para poder construir un murete de las características requeridas, es una sugerencia que hay que tomar en cuenta. Las bermas que se construyen en todas las paredes del walipini deben tener por debajo una cobertura de agrofílm para prevenir posibles infiltraciones. Otra de las funciones del talud es proveer de mayor volumen de tierra que almacena calor y a la vez aísla las temperaturas frías del suelo y los vientos (Figura 2.1). Las puertas de ingreso al walipini deben estar dispuestas diagonalmente opuestas en las paredes laterales, de manera que garantice el movimiento de aire dentro del recinto. La excavación de las mismas debe realizarse al mismo tiempo que se excava la fosa. Como el walipini carece de ventanas para la ventilación, es necesario que las puertas estén diseñadas de tal forma que la parte superior de las mismas permanezca abierta durante el día, para que se asegure el ingreso de aire fresco al interior del ambiente (Figura 2.2). La estructura más importante, costosa y de menor vida útil en el walipani es el techo. El material que recomendamos por sus características y bajo costo, es el agrofílm de 250 micras de espesor. La estructura sobre la que se extiende el agrofílm, está armada por vigas de 6 m de largo y 0.10 m. de diámetro. Estas vigas son postes de eucalipto, que sujetan de los tapiales con alambre de amarre y clavos de 5'. La distancia entre viga y viga es de 1 m. haciendo un total de 21 postes que cubren el área a techar. Sobre los postes, en dirección transversal, se extienden cintas plásticas que cumplen la función de dar más estabilidad evitando que por el peso del granizo, nieve o agua, se formen depresiones en el agrofílm que ocasionarían el deterioro prematuro del techo. Una vez que están sujetos los postes a los muros, se extiende el agrofílm en la parte inferior del techo, tensando con fuerza para evitar que se formen depresiones en el centro. Con la ayuda de vigas delgadas en las que se envuelven parte del agrofílm lateral, se sujeta a las paredes este y oeste con clavos de 5' y alambre de amarre. Posteriormente se extiende el resto del agrofílm en la parte superior del techo, de esta manera se forma un traslape entre la parte superior e inferior del agrofílm de unos 0.40 m de ancho. Para sujetar el agrofílm a los postes de madera, es necesario contar

con bandas de goma de llantas que, eviten que los clavos deterioren el agrofilm a causa de los fuertes vientos. Al finalizar la pendiente del techo del walipini es necesario colocar canaletas que desvíen el torrente de agua del techo hacia las zanjas del drenaje externo (Iturry, 2002).

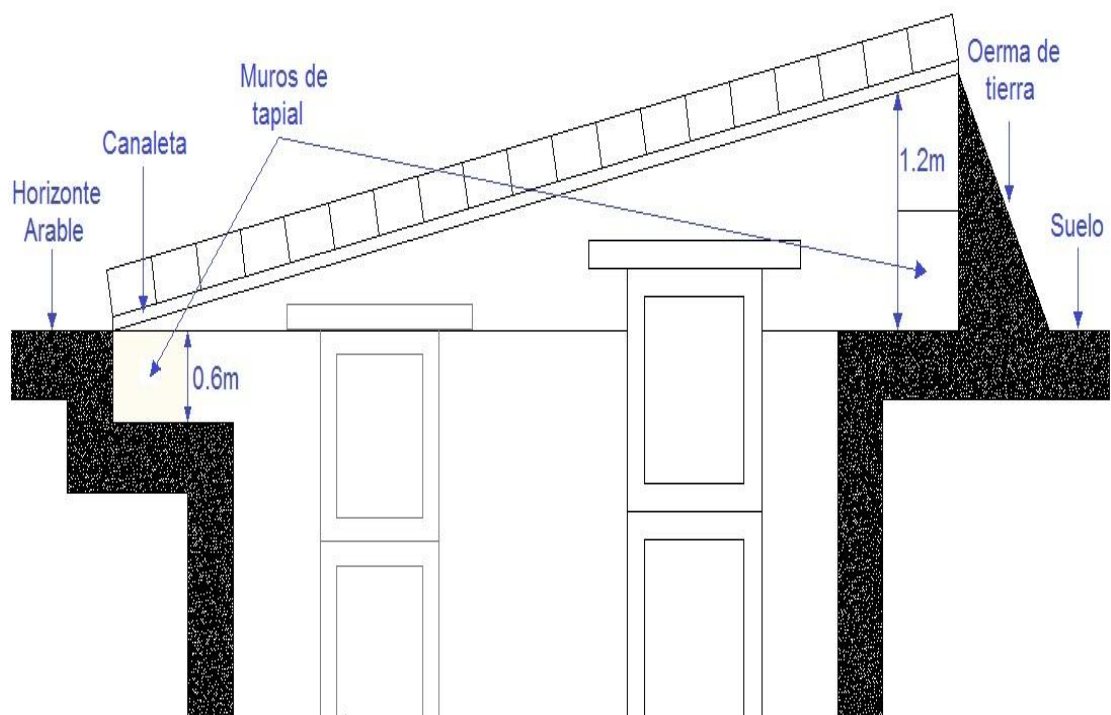


Figura 2.1 Diseño de un Invernadero Walipini (Iturry, 2002).

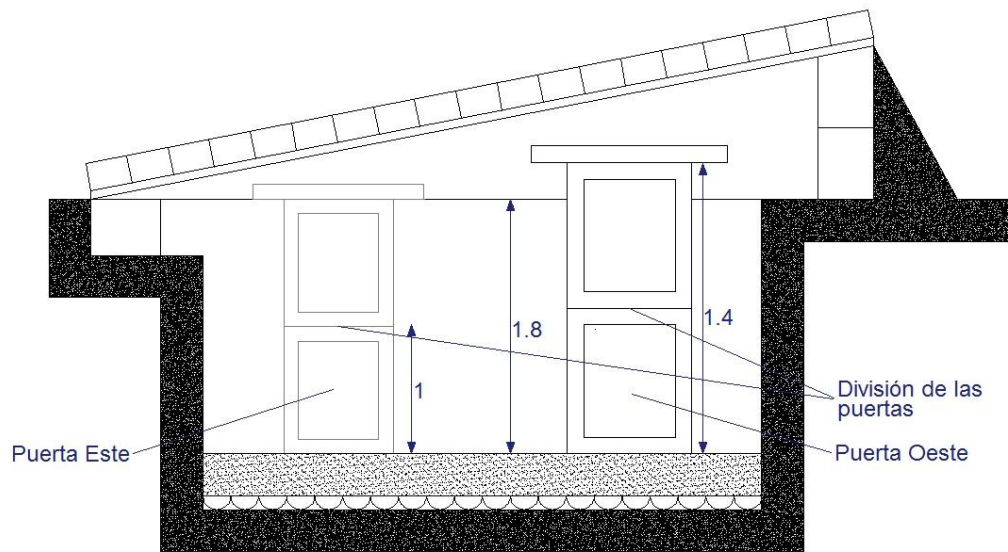


Figura 2.2 Ubicación y diseño de las puertas (Iturry, 2002).

De acuerdo con Iturry (2002) los invernaderos Panqar huyu (camas o huerto de flores) son semienterrados y existen dos tipos, las camas altas apropiadas para regiones húmedas y relativamente templadas y las bajas que son adecuadas para regiones frías, donde las heladas son muy intensas y los suelos secos. La excavación puede ser manual o con maquinaria. Es recomendable que el horizonte arable del suelo, sea separado para poder de esta forma utilizar más adelante cuando se preparando la cama del cultivo, el resto de la tierra extraída se recicla en la construcción de los adobes y de las bermas. La profundidad de excavación del panqar huyu, se deja a criterio del constructor dependiendo de la explotación y manejo del ambiente; sin embargo, se recomienda una profundidad total de excavación de 1.0 m., para que una vez preparado el drenaje y la cama quede aproximadamente un foso de 0.6 m. de profundidad. El área a ser perforada puede variar de acuerdo a las necesidades de los productores. En Letanías el área excavada es de 1.3 m. x 3.0 m., la razón por la que se optó por esta área son las dimensiones del rollo de agrofilm, (el item más costoso). De esta forma se consigue optimizar el agrofilm, y la producción costo-beneficio por m² de construcción es mayor. Así mismo estas dimensiones facilitan el manipuleo de la cubierta móvil. Los muros se edifican directamente sobre la superficie del suelo sin cimientos, la pendiente del techo se apoya sobre un murete de adobe que se le

construye con el afán de dar mayor resistencia al suelo, pues el horizonte arable no nos proporciona la dureza necesaria para sujetar el techo movable. Se prepara una mezcla de paja y barro que se coloca sobre los muros de adobe a forma de colchones de paja y barro (kuawa), que amortiguan el peso del bastidor de la cubierta movable. Otra función de este colchón es la de favorecer el escurrimiento del agua de la cubierta. Las bermas que recubren las paredes tienen además la función de proveer un mayor volumen de tierra que almacena calor y que a la vez aísla las temperaturas frías del suelo y los vientos. La estructura más importante, costosa y de menor vida útil en el panqar huyu es el techo. El material que recomendamos por sus características y bajo costo, es el agrofílm de 250 micras de espesor. La composición química y física de este material hace que sea más resistente a los rayos ultravioleta, por lo que el deterioro de esta cobertura es mucho más lento, en comparación con otros polietilenos (Figura 2.3). El bastidor sobre el que se extiende el agrofílm está armado por vigas de madera o postes de eucalipto (callapos) de 1.6 m de ancho x 3.3 m. de largo. En el centro del bastidor se sujeta una viga de sostén para que de mayor firmeza al techo en la parte central. El agrofílm se sujeta al bastidor tensando con fuerza para evitar que se formen depresiones en el centro por el peso del agua de lluvia, granizo o nevada (Figura 2.4). Para sujetar el agrofílm a los postes de madera es necesario contar con bandas de goma de llantas que, eviten que los clavos deterioren precozmente el agrofílm a causa de los fuertes vientos. Es necesario cavar zanjas de drenaje en todo el perímetro externo del panqar huyu. La parte del agrofílm que se deja suelta en el bastidor, que se apoya en la pared norte, debe caer directamente en la zanja de drenaje para el desagüe de la cubierta (Figura 2.5). Para evitar variaciones extremas, debidas a la alta tasa de radiación solar por la altitud y altura del altiplano (alrededor de 3750 m.s.n.m.), la apertura parcial diaria de la cubierta es indispensable. De no ser así, las temperaturas pueden aproximarse a 49 °C, produciendo un efecto de estrés hídrico en las plantas, (Velasco, 2001). Para posibilitar el intercambio de aire fresco, proveniente del exterior, y el aire caliente, del interior del panqar huyu, es preciso a diario a media mañana levantar parcialmente la cobertura a una altura no menor de 0.20 m (Figura 2.6).

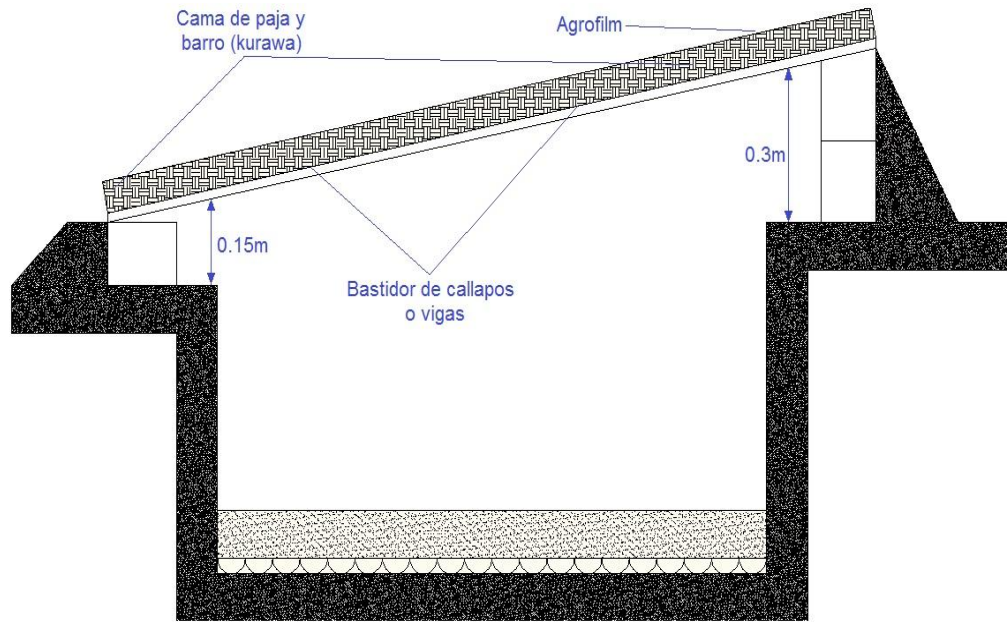


Figura 2.3 Diseño de un Invernadero paqar huyu (Iturry, 2002).

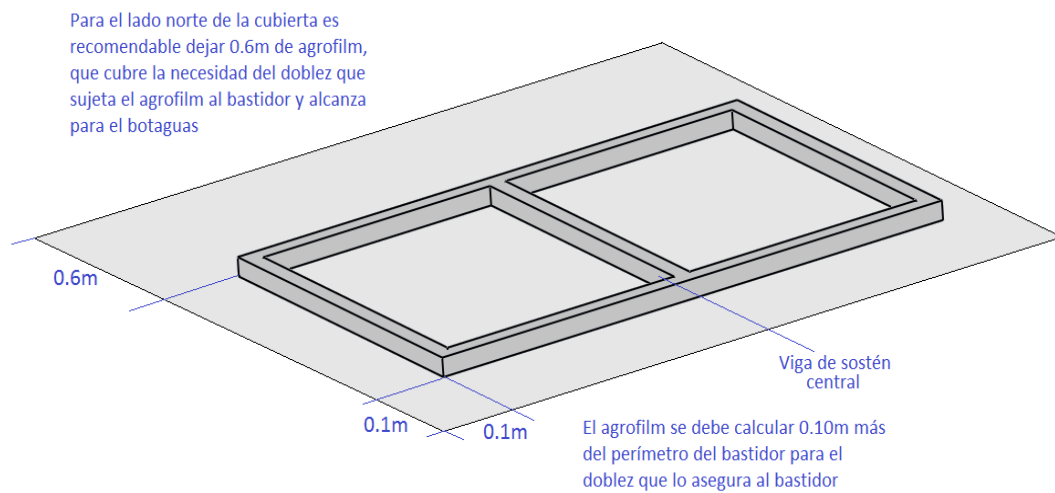


Figura 2.4 Diseño del bastidor (Iturry, 2002).

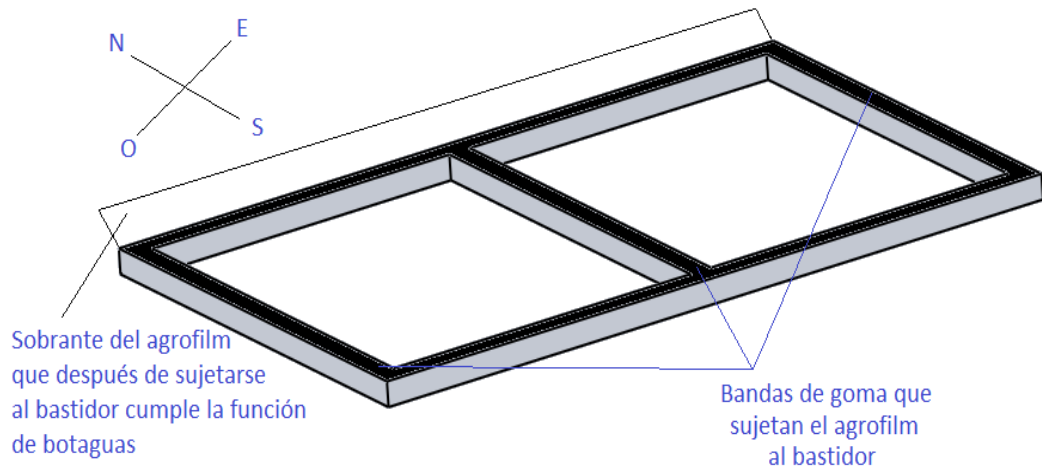


Figura 2.5 Diseño del botaguas y bandas de goma (Iturry, 2002).

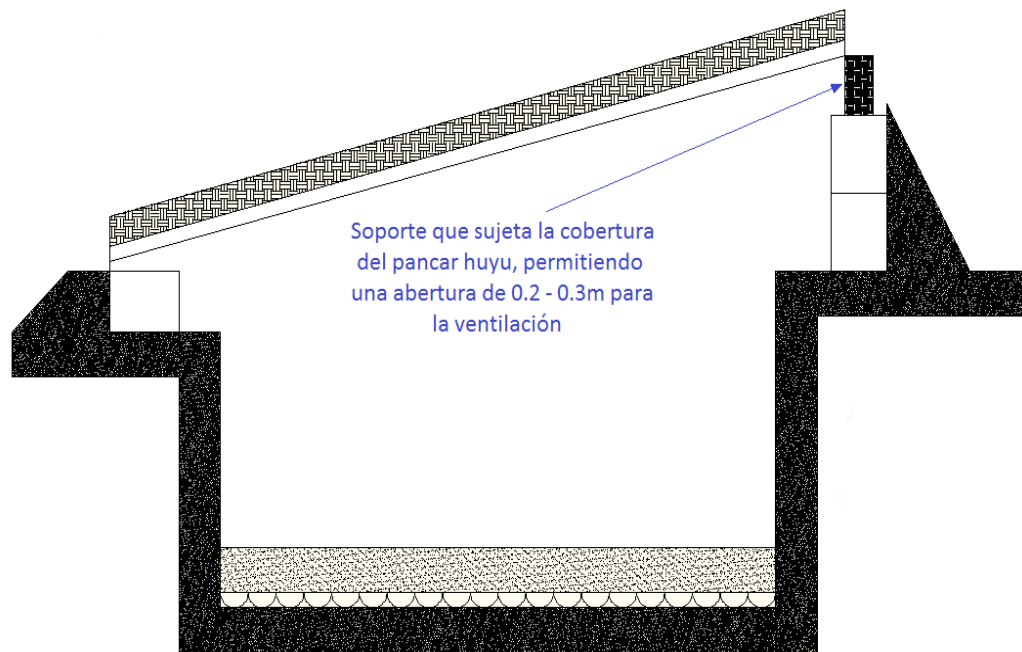


Figura 2.6 Diseño de la ventilación (Iturry, 2002).

2.7 Investigaciones con pantallas térmicas.

En un estudio realizado en Almería, España por Fernández-Rodríguez *et al.* (1998), en donde compararon pantallas térmicas aluminizadas y encalado, obtuvieron como resultados, que la temperatura del aire dentro del invernadero fue superior bajo las pantallas térmicas 0.8 a 1.2 °C en comparación con el encalado.

Teitel *et al.* (1995) encontraron que mediante el empleo de las pantallas térmicas la temperatura de la hoja en cultivo de pimiento aumentó entre 0.8 a 1 °C frente al encalado.

Casierra-Posada *et al.* (2010) evaluaron la calidad de frutos en tomates de tipo Milano larga vida, cultivados en Susa, Colombia, a 2655 msnm y sometidos a la influencia de las coberturas térmicas (tejido plateado reflectivo alumitex 50% y plástico transparente calibre seis). La cobertura alumitex aumentó la temperatura 2.01 °C y disminuyó la humedad relativa 3.03%, frente al testigo sin cubrimiento, y la cobertura plástica aumentó 0.83 °C la temperatura promedio y redujo la humedad relativa 4.26%, en comparación con su testigo. Los parámetros de calidad se vieron afectados positivamente con la utilización de las coberturas durante la noche.

En una investigación se evaluó la ventaja de utilizar las coberturas aluminizadas al 40, 50 y 60%, frente a un testigo con cobertura tradicional, en una densidad de 1.78 plantas/m² de tomate y utilizando una cubierta de polietileno termoaislante de 200 ì m; se concluyó que los frutos de tomate más firmes, pero definitivamente con menor contenido de sólidos solubles totales (SST), fueron aquellos sometidos a sombrío durante las horas del día en los veranos con alta incidencia de radiación directa y cubiertos o protegidos en las noches con bajas temperaturas de invierno (Callejón-Ferre *et al.*, 2009).

Kenig y Fernández-Rodríguez (2002), evaluaron pantallas térmicas con porcentajes de sombrío del 40, 50 y 60%, se evidenció que los racimos de tomate cosechados bajo este sistema mejoran la calidad en general, siendo el mejor tratamiento aquel con 40% de sombrío; además, el número de frutos por racimo no se vio afectado por la cantidad de sombra proporcionada por la cobertura térmica.

Un trabajo realizado en dos invernaderos ubicados en Chia y Susa (Cundinamarca). Cada invernadero fue dividido en dos secciones, una de las cuales se cubrió con una pantalla aluminizada. En ambas localidades las pantallas se extendieron sobre el área de cultivo durante las horas de la noche (5:00 pm - 6:00 am). En cada sección de invernadero y durante un ciclo de cultivo se registraron la temperatura (T, °C) y la humedad relativa (HR, %) de forma permanente al igual que las condiciones climáticas externas. El efecto de las pantallas térmicas en campo sobre la producción de tomate se comparó con los resultados de simulaciones realizadas por el modelo potencial de crecimiento del tomate “Tomgro”. En ambas localidades la sección con pantalla registró las temperaturas más altas durante la noche. En Chia, el aumento de temperatura nocturna por efecto de la pantalla fue de 1.5 ± 0.1 °C mientras que en Susa el aumento fue de 1.1 ± 0.1 °C. Los registros de producción indicaron incrementos del 6,6% (Chia) y 3,3% (Susa) con el uso de la pantalla. Los resultados del Tomgro sugieren la posibilidad de alcanzar incrementos en la producción potencial de hasta 15.7 y 13.6% debida al uso de pantallas en las localidades Chia y Susa, respectivamente. El uso de pantallas térmicas en las horas de la noche logra retener el calor dentro del invernadero, lo cual se ve reflejado en un incremento de la producción (Gil, *et al* 2011).

2.8 Investigaciones con invernaderos semienterrados.

Iturry, (2002) reporta que en los invernaderos semienterrados walipinis y panqar huyu, el promedio de temperaturas máximas y mínimas en la época de invierno es de 39.45 °C y 6.45 °C respectivamente, mientras que en el exterior las fluctuaciones son de 21.03 °C y -5.39 °C respectivamente, e incrementando el rendimiento por ejemplo de lechuga de 2 a 3 K/m² a 3.72 K/m² en el walipini y a 3.17 K/m² en el panqar huyu.

En una investigación realizada por Von, (2000), en la temporada de invierno en Ingavi departamento de La paz, Bolivia con una temperatura promedio anual de 8.3 °C presentando heladas en los meses de febrero, mayo, junio, julio y agosto (5.3 días por mes en promedio), y granizo en los meses de septiembre y febrero (dos días por mes), con dos variedades del cultivo de acelga B1 Variedad C003 y B2 Variedad Fordhook Giant, bajo un

invernadero wilipini (semienterrado), a 1.80 m de profundidad con tres tratamientos de humus de lombriz T1 1236 K/ha, T2 3438 K/ha y T3 5732 K/ha, obtuvo los siguientes resultados; con T1 el rendimiento fue de 17.55 K/m², con T2 fue de 18.15 K/m² y con T3 de 17.66 K/m². Con respecto al rendimiento por variedad la que mejor rindió fue la B2 con 17.061 K/m² y para B1 el rendimiento fue de 15.972 K/m². Por lo que concluye que el sistema walipini es una alternativa para el agricultor, ya que se puede cultivar en invierno donde las temperaturas son bajas y es difícil mantener productos hortícolas a campo abierto.

En Almería, España, con temperaturas nocturnas de -2 a -3 °C en el exterior del invernadero, las temperaturas del interior de este tipo de instalaciones (enterradas) pueden estar entre 7 a 9 °C. Debido a que en esta zona (Costa del sol), las plantas que se cultivan son ornamentales y requieren de una humedad relativa alta (Serrano, 2005).

Los resultados obtenidos en el modelo Andino (Bolivia, diseñado por Lorini, J. en 1996) son buenos, habiéndose determinado menor eficiencia térmica. En el interior se tienen temperaturas diurnas que llegan entre 25 °C y 28 °C y las nocturnas registradas son de 1 °C a 2 °C en los meses de junio y julio cuyas temperaturas externas máximas son de entre 17 y 18 °C y las mínimas de -6.9 a -9.3 °C (Ayaviri, 1996).

2.9 Investigaciones con modelos matemáticos.

Uchida-Frausto *et al.* (2003) investigaron un modelo auto regresivo lineal con entrada externa (ARX) y un modelo auto regresivo de media móvil con estructura de entradas externas (ARMAX) que se puede utilizar para describir la temperatura del aire de un invernadero. Ellos encontraron que estos modelos pueden describir el comportamiento de un invernadero durante la mayor parte del año. También observaron que los modelos ARX tienen un mejor desempeño que los modelos ARMAX.

López-Cruz *et al.* (2007) presentaron un procedimiento para obtener un modelo (ARX) para predecir el comportamiento de la temperatura del aire en el interior de un invernadero en Chapingo, México. La bondad de ajuste entre las temperaturas simuladas y observadas, y el análisis residual, indicado que el modelo ARX de segundo orden o

superiores predican correctamente el comportamiento de la temperatura en el interior del invernadero.

Pantil *et al.* (2008) realizó un estudio que incluyó un modelo ARX, un modelo ARMAX y un modelo auto regresivo con redes neuronales (NNARX). Los modelos funcionaban mejor cuando el ajuste fue hecho para fijar series de temperaturas. Aunque el modelo ARX trabajó mejor que el modelo ARMAX, sin embargo, los resultados del modelo NNARX están más cerca de las mediciones.

Guzmán-Cruz *et al.* (2012) presenta una comparación entre algoritmos genéticos (GAs) y programación evolutiva (EP), para estimar los parámetros de un modelo auto regresivo lineal (ARX) y un modelo auto regresivo móvil (ARMAX) para predecir la temperatura del aire dentro de un invernadero situado en la región central de México, dicha estimación del aire interno tiene un mejor ajuste cuando utilizaron una estructura ARX por medio del GAs utilizando el 20 % de los datos para la estimación y el 80 % para la validación del modelo.

Castañeda (2002) realizó un trabajo en el que presenta un análisis y simulación de modelos climáticos en un invernadero. Además, Castañeda y Herrera (2002) propusieron los primeros modelos climáticos de un invernadero bajo condiciones climáticas de la región Centro de México, los cuales simulan la dinámica del clima de un invernadero con cultivo de jitomate. Buscándose con ese trabajo, obtener herramientas de apoyo para el análisis de las condiciones necesarias para la producción de hortalizas bajo condiciones climáticas de la región Centro de México, que permitieran comprender de una forma cuantitativa cómo se comporta el clima del invernadero en función de las condiciones meteorológicas externas, para generar conocimiento (know-how) como base para el diseño y desarrollo de herramientas de ingeniería en el área de invernaderos en el país (Guzmán, 2010).

2.10 Hipótesis y objetivos.

Hipótesis:

La combinación de invernadero enterrado y pantalla térmica propicia que las variables climáticas (temperatura y humedad relativa mínimas) se mantengan más elevadas, aumentando la biomasa de la planta.

Objetivo general:

Evaluar el efecto del uso de las pantallas térmicas e invernaderos semi-enterrados, mediante el ajuste de un modelo matemático que prediga el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa, para un mejor control de estas variables climáticas dentro del invernadero.

Objetivos particulares:

- Evaluar el comportamiento de las variables climáticas (temperatura y humedad relativa) y la biomasa de la planta de cada uno de los ambientes mediante una comparación estadística.
- Ajustar el modelo matemático auto regresivo lineal (ARX) que prediga el comportamiento de la temperatura y humedad relativa.

III METODOLOGÍA

Las variables climáticas en la producción bajo invernaderos son de suma importancia para poder obtener productos de la calidad deseada por los productores, por lo que es importante conocer los valores máximos, mínimos y promedios ya que influyen directamente en el desarrollo de las plantas. El poder predecir el comportamiento del clima al interior de un invernadero mediante un modelo matemático, es una herramienta muy importante para la toma de decisiones del manejo de un cultivo en condiciones protegidas. En este capítulo, se presenta una metodología para la toma de datos climáticos en tres tratamientos, un testigo y las externas de la zona donde se llevó a cabo esta investigación, dichos datos son comparados estadísticamente, así como la propuesta de un modelo matemático que pueda predecir el comportamiento del clima dentro de los invernaderos.

3.1 Localización del área de estudio.

El experimento se llevó a cabo en el campus Amazcala de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro del 12 de Septiembre al 1 de Octubre de 2012 (primera corrida) y del 4 al 29 de Diciembre del mismo año (segunda corrida). El poblado de Amazcala pertenece al municipio de El Marqués, Querétaro, el cual se localiza en el sector suroeste del estado, entre los 20° 31' y 20° 58' de latitud Norte. Su longitud se encuentra entre los 100° 09' y los 100° 24' del Oeste a 1850 m sobre el nivel del mar. Colinda al Oeste con el municipio de Querétaro, al Norte con el estado de Guanajuato, al Este con el municipio de Colón y al Sur con los municipios de Huimilpan y Pedro Escobedo (Balam, 2007).

Los Tratamientos se establecieron en cuatro prototipos de invernaderos tipo túnel de 17.69 m² (3.64 x 4.86 m), con una altura de 1.40 m, de estructura de acero galvanizado de una pulgada, forrados en la parte del techo y los cuatro lados con plástico difuso de 600 galgas (150 micras), cada uno con dos ventanas cenitales de 4.86 x 0.40 m y dos de ellos (los que estuvieron a nivel del suelo) con dos ventanas laterales de 3.23 x 0.60 m (Figura 3.1). Cada prototipo contó con tres líneas secundarias de riego con nueve goteros de 4 L/min cada una y el suelo se cubrió con Grand cover blanco (Figura. 3.2), dos de los prototipos (uno semienterrado y uno a nivel del suelo) tenían pantalla térmica aluminizada plegable manualmente (Figura. 3.3).



Figura 3.1 Prototipos de invernaderos a nivel del suelo y semi-enterrados.



Figura 3.2 Líneas secundarias de riego.



Figura 3.3 Pantalla térmica aluminizada.

3.2 Suelo.

El tipo de suelo es franco arenoso (64% de arena, 11.8% de arcilla y 23.64% de limo), con un contenido de 1.19% de materia orgánica (M.O.) y un pH de 8.

3.3 Material vegetal.

Se utilizó el cultivo de lechuga variedad Sangría (Figura 3.4), el cual se desarrolló hasta la etapa de plántula en charolas para siembra, las que fueron trasplantadas en cada uno de los prototipos de invernaderos para su desarrollo hasta cosecha.



Figura 3.4 Lechuga variedad Sangría

3.4 Nutrición.

Se llevó a cabo con solución nutritiva Steiner (1984) al 50% como base para el desarrollo del cultivo para cada uno de los tratamientos.

3.5 Manejo del riego.

Se realizaron dos riegos dos riegos por día el primero a las 9:00 horas y el segundo a las 18:00 horas ambos de 5 minutos (333 ml).

3.6 Diseño experimental.

Se establecieron cuatro tratamientos (prototipos de invernaderos): T1 a nivel del suelo con pantalla térmica, T2 semi-enterrado con pantalla térmica, T3 a nivel del suelo sin pantalla térmica (control) y T4 semi-enterrado sin pantalla térmica (Figura 3.5 a y b). Por lo que se tuvieron cuatro unidades experimentales con 27 plantas cada una (108 plantas en total).



Figura 3.5 a) Prototipo a nivel del suelo. b) Prototipo semi-enterrado.

3.7 Variables evaluadas.

3.7.1 Dentro de los prototipos.

Temperatura (T °C) y Humedad relativa (H.R. %):

La medición de estas dos variables se realizó con cuatro Data Logger marca Watch Dog serie 1000 spectrum colocados a una altura de 0.35 m del suelo (Figura 3.6), cada 15 minutos durante cuatro semanas.



Figura 3.6 Data logger Watch Dog.

Radiación solar (R.S. w/m^2):

Esta variable se midió con cuatro sensores de radiación PAR (radiación fotosintéticamente activa) que registra radiaciones entre 400 y 700 nm a una altura de 0.45 m del suelo (Figura 3.7), los cuales se adaptaron a los data logger descritos anteriormente.



Figura 3.7 Sensor de radiación PAR.

3.7.2 Al exterior de los prototipos.

Temperatura (T °C), Humedad relativa (H.R. %) y Radiación solar (R.S. w/m^2):

Estas variables fueron medidas con una estación meteorológica marca Davis Pro2 inalámbrica (Figura 3.8), cada 15 minutos durante cuatro semanas.



Figura 3.8 Estación meteorológica Davis Pro2.

3.7.3 De la planta.

Peso fresco (g): Se pesó en una balanza analítica marca Adventurer modelo AR2140 con capacidad de 0.0001 a 210 g (Figura 3.9), esto se llevó a cabo cada 8 días (los martes) a las 12:00 horas desde el trasplante (peso de plántula), hasta el momento de la cosecha cuatro semanas después del trasplante.

Peso seco (g): Se pesó en una balanza analítica marca Adventurer modelo AR2140 con capacidad de 0.0001 a 210 g (Figura 3.9), esto se realizó después de haberlas secado en una estufa marca Riossa modelo -41 (Figura 3.10).

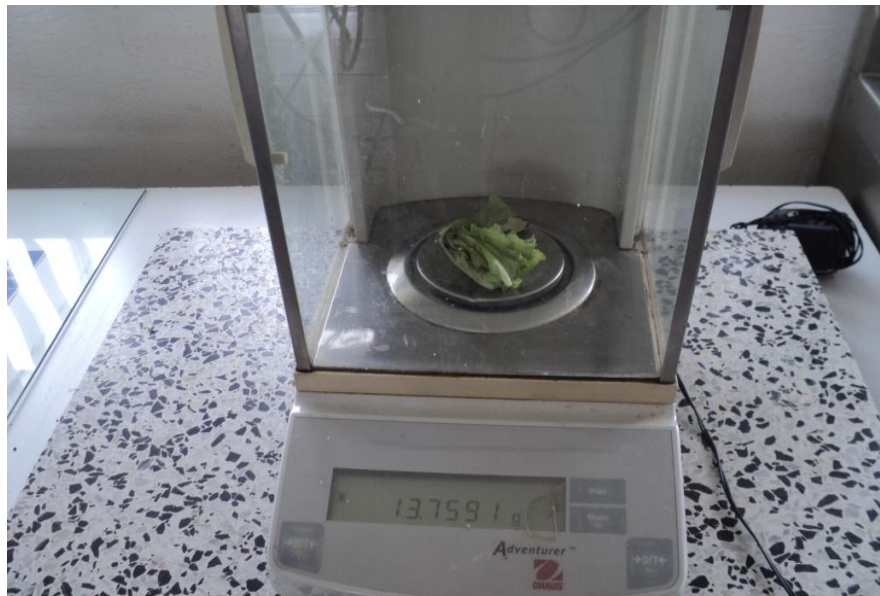


Figura 3.9 Balanza analítica.



Figura 3.10 Estufa.

3.7.4 Procedimiento del manejo de pantallas térmicas y ventanas.

Después de haber establecido el cultivo y haber colocado los aparatos de medición antes descritos, tanto las ventanas cenitales (en los cuatro prototipos) como las laterales (en los dos prototipos a nivel del suelo), se abrían a las 8:30 hrs y se cerraban a las 18:30 hrs, las pantallas térmicas se replegaban a las 8:30 hrs y se desplegaban a las 18:30 hrs, en la primer corrida (Septiembre-Octubre), en la segunda corrida (Diciembre) las ventanas se abrieron a las 8:30 hrs y se cerraban a las 18:30 hrs y las pantallas térmicas se replegaban a las 8:30 y a las 16:00 hrs y se desplegaban a las 12:00 y a las 18:30 hrs.

3.8 Análisis estadístico.

Los datos se analizaron estadísticamente mediante una comparación de medias y la prueba de Tukey, utilizando el paquete JMP versión 5 para cada variable con un nivel de significancia de ($P \leq 0.05$).

3.9 Ajuste del modelo matemático ARX.

La estructura del modelo matemático se basó en un modelo auto regresivo lineal (ARX), cuya estructura general es:

$$y(t) = -a_1y(t-1) - \dots - a_nay(t-n_a) + b_1u(t-n_k) + b_2u(t-n_k-1) + \dots + b_nb u(t-n_k-n_b+1) + e(t). \quad (1)$$

Donde:

$y(t)$ = es la salida del modelo ARX para $t=t, t-1, \dots, t-n_a$.

t = tiempo.

$u(t)$ = entrada del modelo ARX modelo para $t=t-n_k, t-n_k-1, \dots, t-n_k-n_b+1$.

a_{na} y b_{nb} = parámetros (coeficientes) del modelo.

n_a = número de pasos de tiempo de la salida en el pasado.

n_b = número de pasos de tiempo de la entrada en el pasado.

n_k = retardo de la entrada $u(t)$ con respecto a la salida $y(t)$.

$e(t)$ = ruido blanco asociado con la variable de salida.

Un modelo matemático ARX para estimar la temperatura de un invernadero requiere más de una variable de entrada por lo que se debe ajustar el modelo ARX con una sola entrada y una sola salida (SISO) en un modelo ARX con múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Un modelo ARX MIMO, con entradas y salidas está definido por la ecuación:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (2)$$

Donde $A(q)$ es una matriz de dimensiones $n_y \times n_y$; sus elementos son polinomios en el operador de retraso $q^{-1}y(t) = y(t-1)$.

$$A(q) = I_{n_y} + A_1q^{-1} + \dots + A_{n_a}q^{-n_a} \quad (3)$$

I_{ny} es la matriz identidad. En forma matricial:

$$A(q) = \begin{bmatrix} a_{11}(q) & a_{12}(q) & \dots & a_{1ny}(q) \\ a_{21}(q) & a_{22}(q) & \dots & a_{2ny}(q) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{ny1}(q) & a_{ny2}(q) & \dots & a_{nyny}(q) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde los elementos a_{kj} son polinomios en el operador q^{-1} .

$$a_{kj}(q) = \delta_{kj} + a_{kj}^1 q^{-1} + \dots + a_{kj}^{na} q^{-na} \quad (5)$$

$$\delta_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{si } k = j \\ 0 & \text{de lo contrario} \end{cases}$$

La matriz $B(q)$ está formada como $A(q)$ pero tiene dimensiones:

$$ny \times nu, B(q) = B_1 q^{-1} + \dots + B_{nb} q^{-nb} \quad (6)$$

$$B(q) = \begin{bmatrix} b_{11}(q) & b_{12}(q) & \dots & b_{1nu}(q) \\ b_{21}(q) & b_{22}(q) & \dots & b_{2nu}(q) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{ny1}(q) & b_{ny2}(q) & \dots & b_{nynu}(q) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$b_{kj}(q) = b_{kj}^1 q^{-nk} + \dots + b_{kj}^{nb} q^{-nk - nb + 1} \quad (8)$$

Para establecer de un modelo ARX se requiere determinar los coeficientes a_{11} , a_{12} , a_{ny1} , \dots , a_{ny2} , \dots , a_{nyny} y b_{11} , b_{12} , \dots , b_{1nu} , \dots , b_{ny1} , b_{ny2} , \dots , b_{nyny} , así como el orden del modelo dado por los valores de los parámetros na , nb y nk , a partir de la información de las variables de entrada y salidas que permitan obtener el mejor ajuste entre la predicción del modelo y la variable de salida medida.

Estimación de los coeficientes estadísticos para el análisis de resultados:

El coeficiente de correlación (r) que establece una medida del grado de asociación entre la variable observada y la variable predictora, y se define por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

Donde:

x_i y y_i son el dato medido y el dato estimado, respectivamente, en el tiempo i .

\bar{x} y \bar{y} son la media de el dato medido y el dato estimado respectivamente, en el tiempo i .

El error estándar porcentual de la predicción (%SEP) el cual establece el grado de dispersión entre la variable observada o medida y la variable predictora, y está definida por:

$$\%SEP = \frac{100}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (10)$$

El coeficiente de eficiencia (E) y la varianza relativa promedio (ARV), los cuales no están basados en el rango de variación de sus elementos, estos son usados para determinar cómo el modelo puede explicar la variación total de los datos, y están definidos como:

$$E = \frac{S_{obs} - S}{S_{obs}} \quad (11)$$

$$ARV = \frac{S}{S_{obs}} \quad (12)$$

Donde:

$$S_{obs} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (13)$$

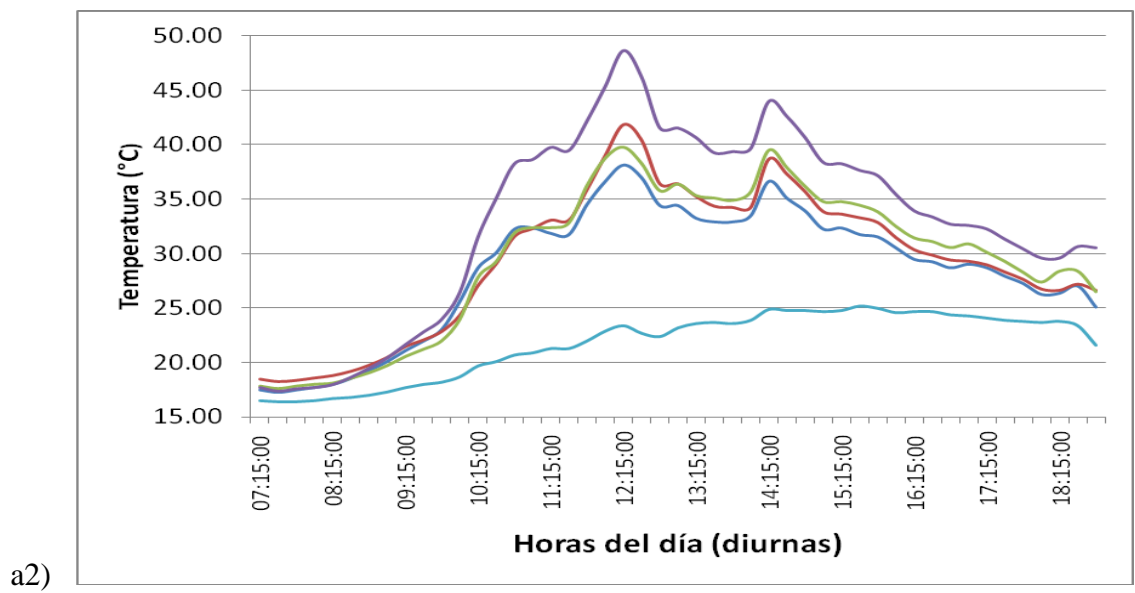
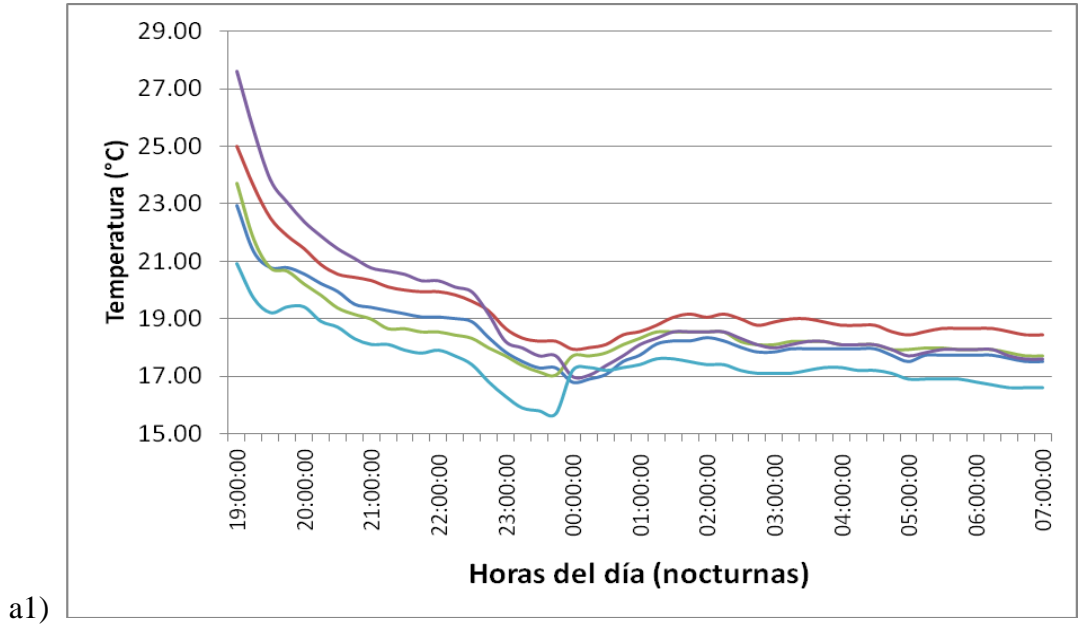
$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{x})^2 \quad (14)$$

Para tener una relación perfecta r y E deberían estar próximos a 1 y los valores de %SEP y ARV cercanos a 0.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Temperaturas.

En el Figura 4.1, se muestran las temperaturas (diurnas y nocturnas) de dos días del desarrollo del cultivo (12 de Septiembre y 04 de Diciembre de 2012) dentro de los prototipos de invernaderos, donde se puede apreciar la variación en cuanto a la temperatura en cada uno de los tratamientos y la externa, así como también se aprecia que las temperaturas nocturnas (mínimas) en el T2 (semi-enterrado con pantalla térmica) se mantienen más elevadas en comparación con los demás tratamientos y la externa. En la Figura 4.2 se puede apreciar el promedio de las temperaturas mínimas externas y por tratamiento durante el periodo de desarrollo del cultivo, donde se observa que en el T2 se mantienen las temperaturas mínimas más elevadas. Así mismo en la Figura 4.3 se muestra la comparación de medias de las temperaturas mínimas en donde se puede ver que las del T2 son superiores a los demás tratamientos y a la externa, lo anterior concuerda con Baille *et al.*, 1984, en donde la temperatura con pantallas térmicas se incrementa de 2-3 °C también con Fernández-Rodríguez *et al.* (1998) donde el incremento es de 0.8-1.2 °C y con Casierra-Posada *et al.* (2010) que es de 2.01°C. Sin embargo los resultados obtenidos en esta investigación son menores a los que obtuvieron Serrano (2005) de 9-12 °C, que Ayaviri (1996) de 8-11°C y que Iturry (2002) de 12 °C, ya que ellos obtienen diferencias de temperaturas mayores entre la externa y la interna esto debido a el diseño de la construcción de los invernaderos enterrados con los que realizan sus investigaciones.



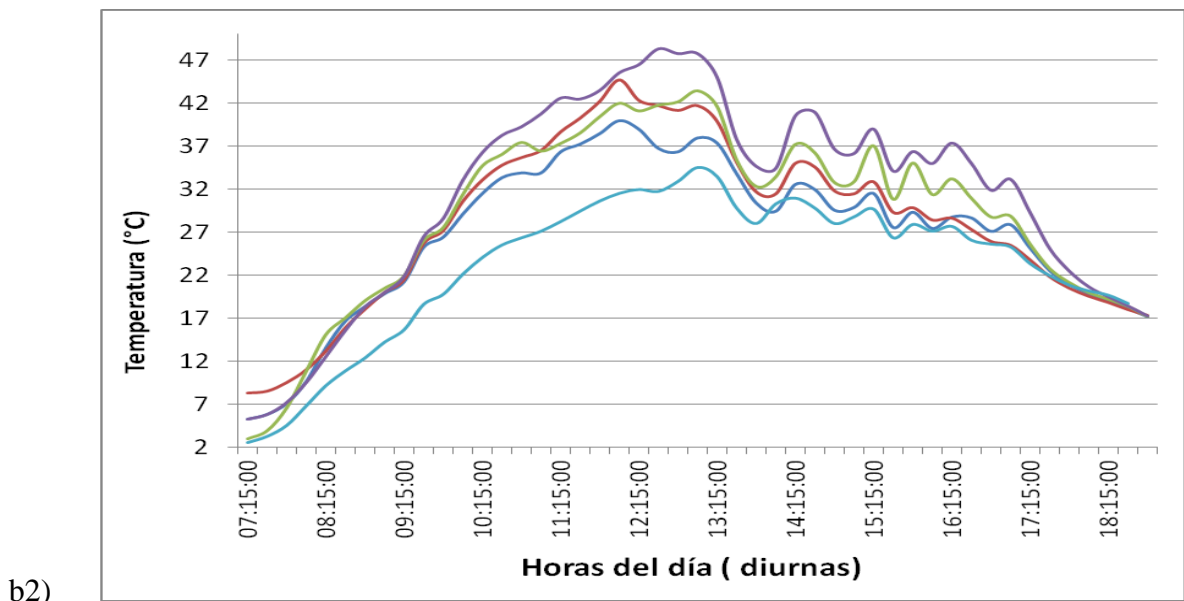
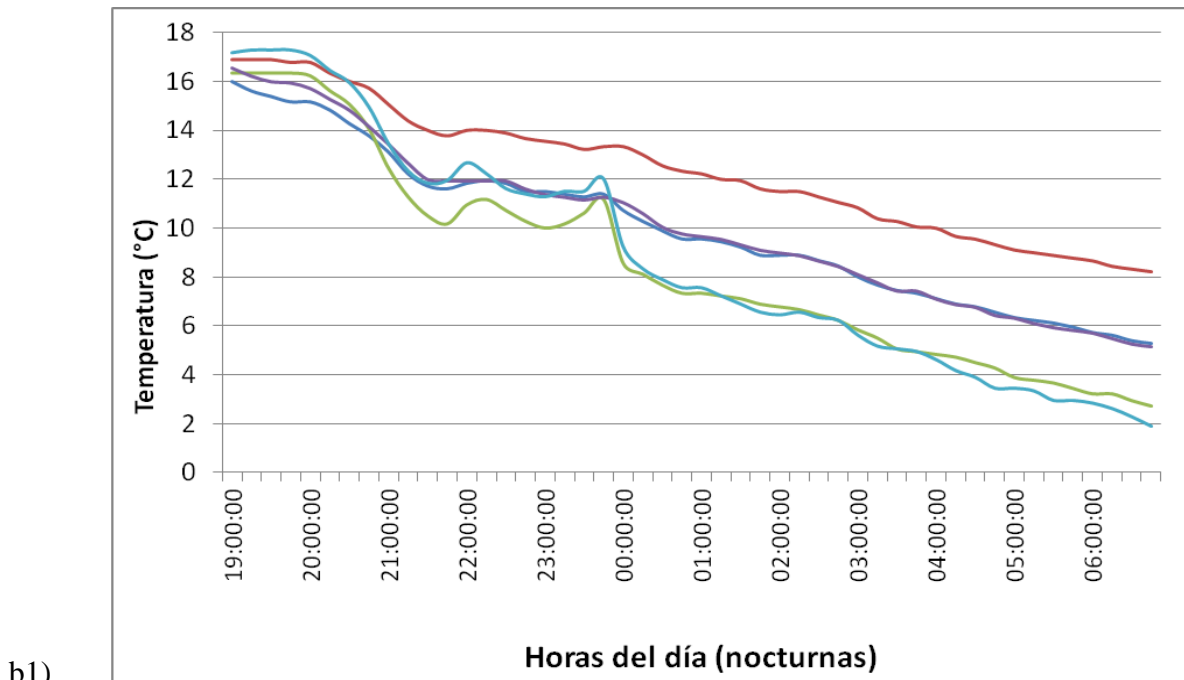


Figura 4.1 Temperaturas de un día del cultivo a1) y a2) 12 de Septiembre de 2012 y b1) y b2) 4 de Diciembre de 2012.

■ T1 a nivel del suelo con pantalla térmica,
 ■ T2 semi-enterrado con pantalla térmica,
 ■ T3 a nivel del suelo sin pantalla térmica (control),
 ■ T4 semi-enterrado sin pantalla térmica y
 ■ Externa.

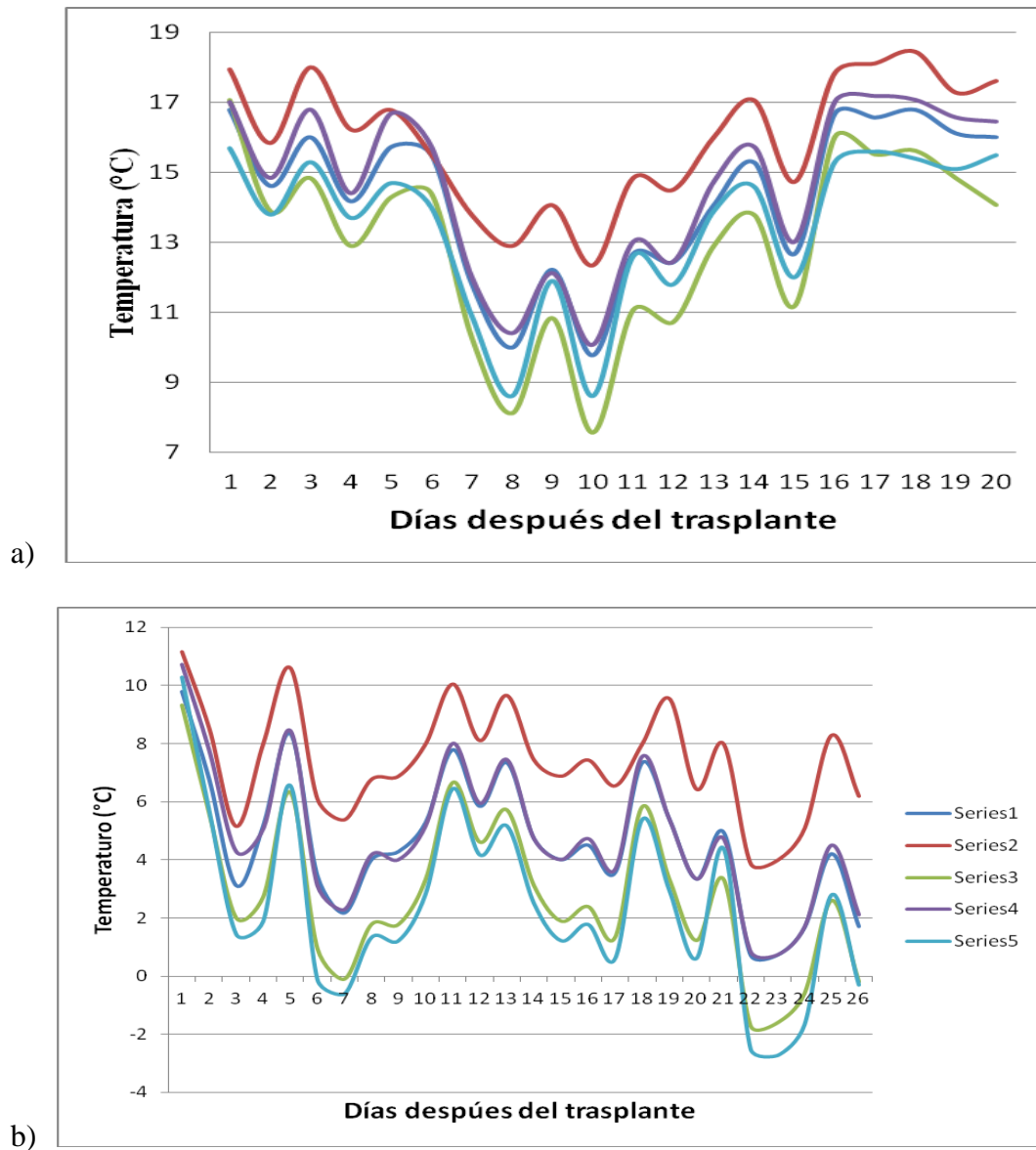


Figura 4.2 Temperaturas promedio mínimas por tratamiento y externa a) Septiembre- Octubre de 2012 y b) Diciembre de 2012.

T1 a nivel del suelo con pantalla térmica,
 T2 semi-enterrado con pantalla térmica,
 T3 a nivel del suelo sin pantalla térmica (control),
 T4 semi-enterrado sin pantalla térmica y
 Externa.

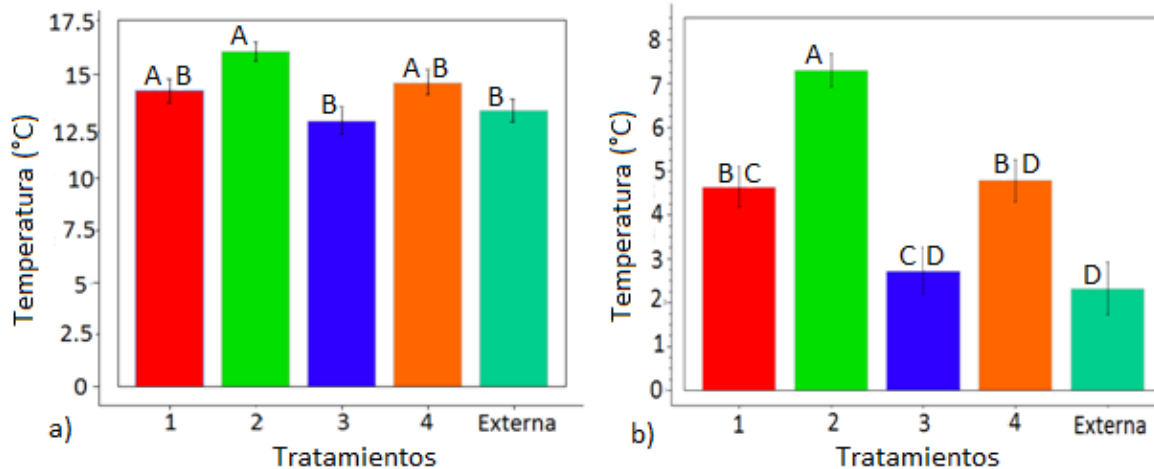


Figura 4.3 Comparación de medias de temperaturas mínimas en los cuatro tratamientos y el exterior a un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. a) Sept.-Oct. y b) Diciembre.

4.2 Humedad relativa.

La grafica 4.4 muestra la comparación de medias de la humedad relativa mínima entre tratamientos y la externa donde se observa que en el T3 esta es mayor en comparación con los demás y 50% mayor que el T4 (a nivel del suelo sin pantalla térmica, control) y además comparada con la obtenida con Casierra-Posada *et al.* (2010) También es mayor ya que con pantallas térmicas ellos obtienen un incremento del 3% comparada con sus tratamientos control, en la Figura 4.5 se observa la comparación de medias de la humedad relativa máxima entre tratamientos y la externa donde en el T3 se obtienen resultados de la misma de entre 75-85%, estos valores son adecuados ya que la FAO, (2012) reporta que valores entre 70-90% son favorables para el desarrollo de un cultivo.

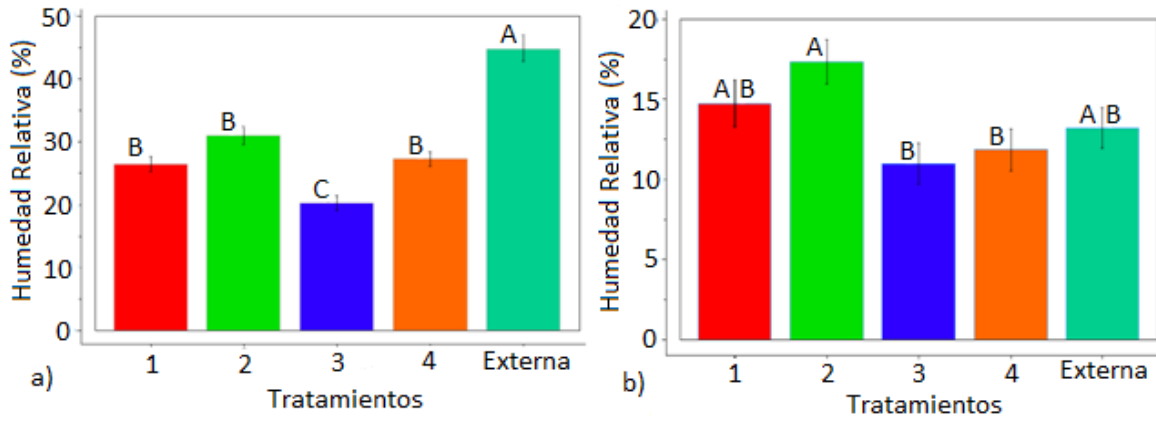


Figura 4.4 Comparación de medias de humedad relativa mínima en los cuatro tratamientos y el exterior a un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. a) Sep.-Oct. y b) Diciembre.

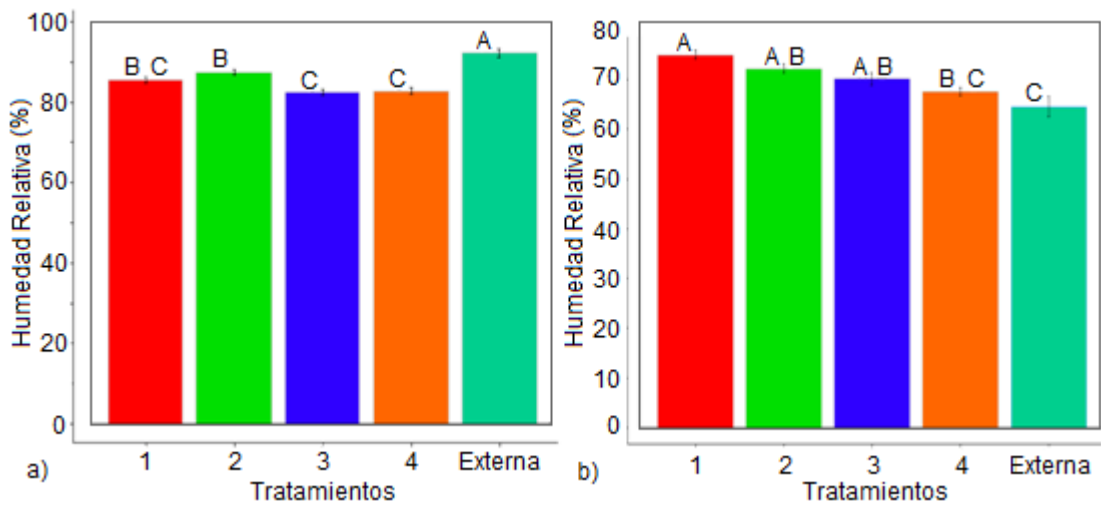


Figura 4.5 Comparación de medias de humedad relativa máxima en los cuatro tratamientos y el exterior a un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. a) Sep.-Oct. y b) Diciembre.

4.3 Crecimiento del cultivo en peso húmedo y peso seco.

En las Figuras 4.6 y 4.7 se aprecian la comparación de medias del peso húmedo y del peso seco del cultivo respectivamente donde se observa que el mayor peso (entre 32-43%) se encuentra en los T1 (a nivel del suelo con pantalla térmica), T2 (semi-enterrado con pantalla térmica) y en T4 (semi-enterrado sin pantalla térmica) en comparación con el control (T3), estos resultados concuerdan con Pirard *et al* (1994), ya que con pantallas térmicas ellos obtienen un incremento en el rendimiento del 40%, y con Iturry (2002), que en invernaderos semi-enterrados obtiene incrementos en la producción del 30% aproximadamente, y mayores que los obtenidos por Gil, *et al.* (2011) ya que obtiene incrementos del 6,6% (en Chia) y 3,3% (en Susa) en el cultivo de tomate bajo pantallas térmicas comparados con su testigo. Los invernaderos semi-enterrados son una alternativa para la producción en invierno o en zonas de clima frío como lo menciona Von (2000).

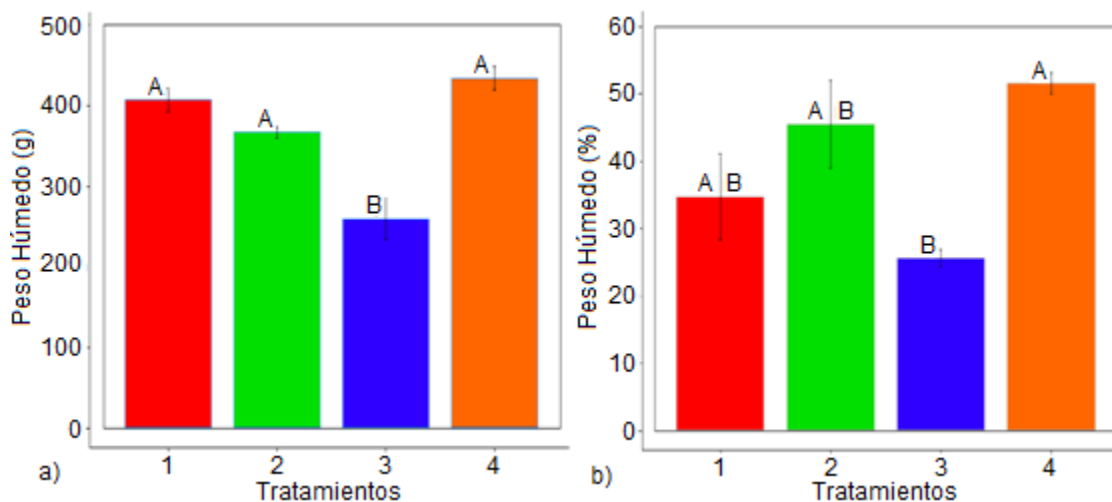


Figura 4.6 Comparación de medias de peso húmedo en los cuatro tratamientos a un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. a) Sep.-Oct. y b) Diciembre.

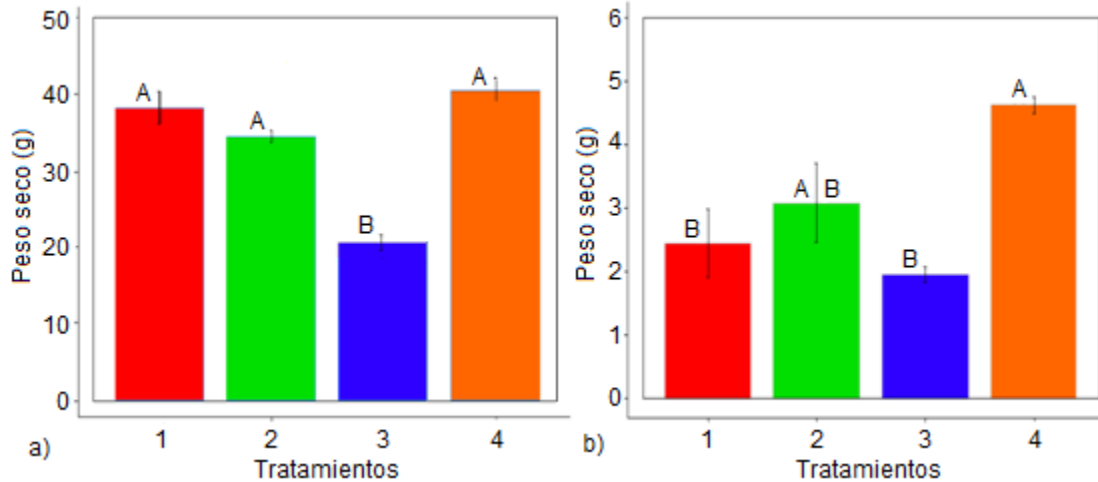


Figura 4.7 Comparación de medias de peso seco en los cuatro tratamientos a un nivel de significancia de $P \leq 0.05$. a) Sep.-Oct. y b) Diciembre.

4.4 Modelo ARX

La temperatura y humedad absoluta internas son estimadas a partir de un modelo matemático ARX considerando los datos medidos durante la primera corrida (12 de Septiembre al 1 de Octubre de 2012).

Para la estimación se consideró el 25 % de los datos y se validó con el 75 % restante en esta primera corrida. Si un modelo se puede obtener utilizando el 20% de los datos y se valida con el otro 80%, es más fiable que si el 80% se utiliza para la identificación y sólo el 20 % para la validación, por esta razón, es importante seleccionar el modelo más sencillo con el comportamiento más aceptable y el mínimo costo computacional (Guzmán-Cruz *et al.* 2012).

En este caso el vector “y” las variables de salida son Temperatura (T_i) y Humedad absoluta (HA_i) internas y el vector “u” de variables de entrada consiste de Temperatura (T_o), Humedad absoluta (HA_o) y Radiación solar (RS_o) externas. De modo que se establece el modelo matemático de la siguiente forma:

$$y(t) = ay(t-1) + b_1u_1 + b_2u_2 + b_3u_3 \quad (15)$$

donde:

$$na = [1 \ 1] \quad \text{y} \quad nb = [2 \ 2 \ 2]$$

son los retrasos de los datos internos y externos, respectivamente. De modo que,

$$y(t) = \begin{pmatrix} T_i(t) \\ HA_i(t) \end{pmatrix} \quad b_2 = \begin{pmatrix} b_{13} & b_{14} \\ b_{23} & b_{24} \end{pmatrix}$$

$$a = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{22} & a_{21} \end{pmatrix} \quad u_2 = \begin{pmatrix} HA_o(t-1) \\ HA_o(t-2) \end{pmatrix}$$

$$y(t-1) = \begin{pmatrix} T_i(t-1) \\ HA_i(t-1) \end{pmatrix} \quad b_3 = \begin{pmatrix} b_{15} & b_{16} \\ b_{25} & b_{26} \end{pmatrix}$$

$$b_1 = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \quad u_3 = \begin{pmatrix} RS_o(t-1) \\ RS_o(t-2) \end{pmatrix}$$

$$u_1 = \begin{pmatrix} T_o(t-1) \\ T_o(t-2) \end{pmatrix}$$

Sustituyendo en la ecuación (15)

$$\begin{pmatrix} T_i(t) \\ HA_i(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{22} & a_{21} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_i(t-1) \\ HA_i(t-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_o(t-1) \\ T_o(t-2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{13} & b_{14} \\ b_{23} & b_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} HA_o(t-1) \\ HA_o(t-2) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{15} & b_{16} \\ b_{25} & b_{26} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} RS_o(t-1) \\ RS_o(t-2) \end{pmatrix} \quad (16)$$

Es decir,

$$\begin{aligned} T_i(t) &= a_{11}T_i(t-1) + a_{12}HA_i(t-1) + b_{11}T_o(t-1) + b_{12}T_o(t-2) \\ &+ b_{13}HA_o(t-1) + b_{14}HA_o(t-2) + b_{15}RS_o(t-1) + b_{16}RS_o(t-2) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned}
 HA_i(t) = & a_{21}T_i(t-1)+a_{22}HA_i(t-1)+b_{21}T_o(t-1)+b_{22}T_o(t-2) \\
 & +b_{23}HA_o(t-1)+b_{24}HA_o(t-2)+b_{25}RS_o(t-1)+b_{26}RS_o(t-2)
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Donde los coeficientes son presentados en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1 Coeficientes del sistema de ecuaciones usado para estimar T_i y HA_i .

Coeficiente (T_i)	Valor numérico	Coeficiente (HA_i)	Valor numérico
a_{11}	-0.9829	a_{21}	$4,6195 \times 10^{-6}$
a_{12}	-25.0994	a_{22}	-1.0036
b_{11}	1.2196	b_{21}	7.1341×10^{-4}
b_{12}	-1.2029	b_{22}	-7.0546×10^{-4}
b_{13}	249.9822	b_{23}	1.1351
b_{14}	-271.3254	b_{24}	-1.1428
b_{15}	8.3682×10^{-3}	b_{25}	3.7316×10^{-6}
b_{16}	-8.0808×10^{-3}	b_{26}	-3.7178×10^{-6}

En las Figuras 4.8 y 4.9 se pueden observar los resultados obtenidos de la simulación de T_i y en las Figuras 4.10 y 4.11 de la simulación de la HA_i , donde se puede apreciar (Figuras 4.9 y 4.11 ampliaciones) que existe una buena estimación esto debido a que los valores estimados están muy cercanos a los medidos, ya que como muestran los cuadros 4.2 y 4.3 los coeficientes estadísticos (r, %SEP, E y ARV) se encuentran dentro de los valores que nos indican una relación muy adecuada (r y E deberían estar próximos a 1 y los valores de %SEP y ARV cercanos a 0). Esto concuerda con los resultados de López-Cruz *et al.* (2007) quienes concluyen que los modelos ARX predicen correctamente el

comportamiento de un invernadero, y con Pantil *et al.* (2008) quienes al comparar los modelos ARX concluyen que estos trabajan mejor que otros modelos (ARMAX auto regresivos móviles).

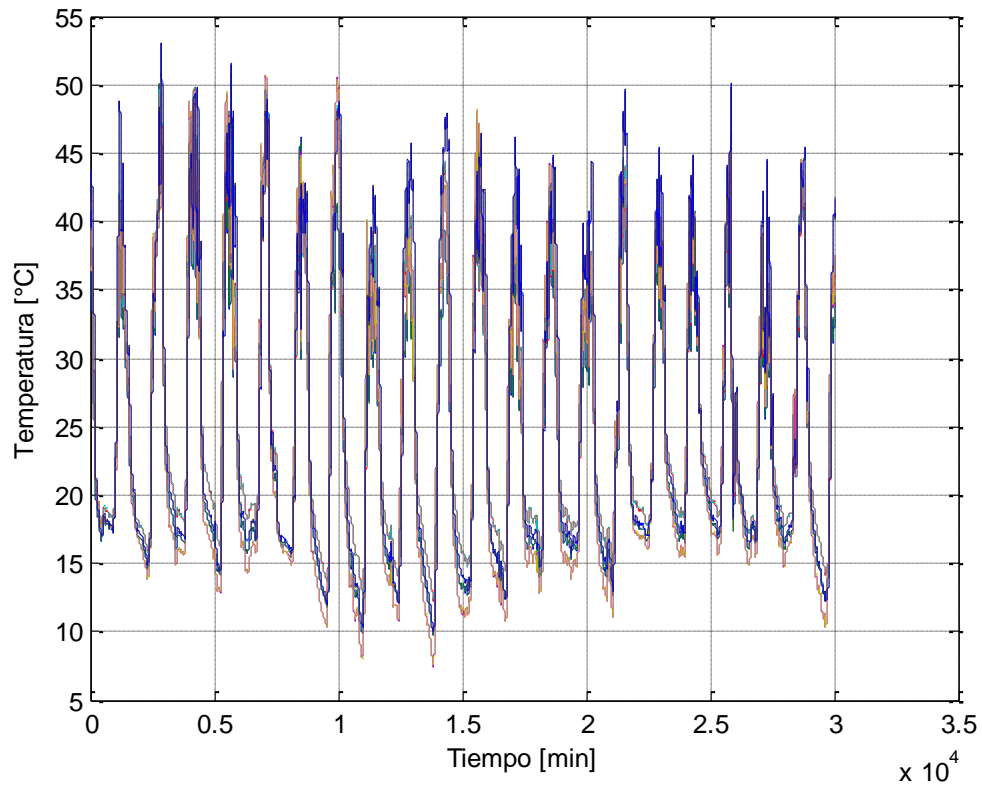


Figura 4.8 Datos medidos y datos estimados correspondientes a la temperatura en la primera corrida (12 de Septiembre-1 de Octubre de 2012).

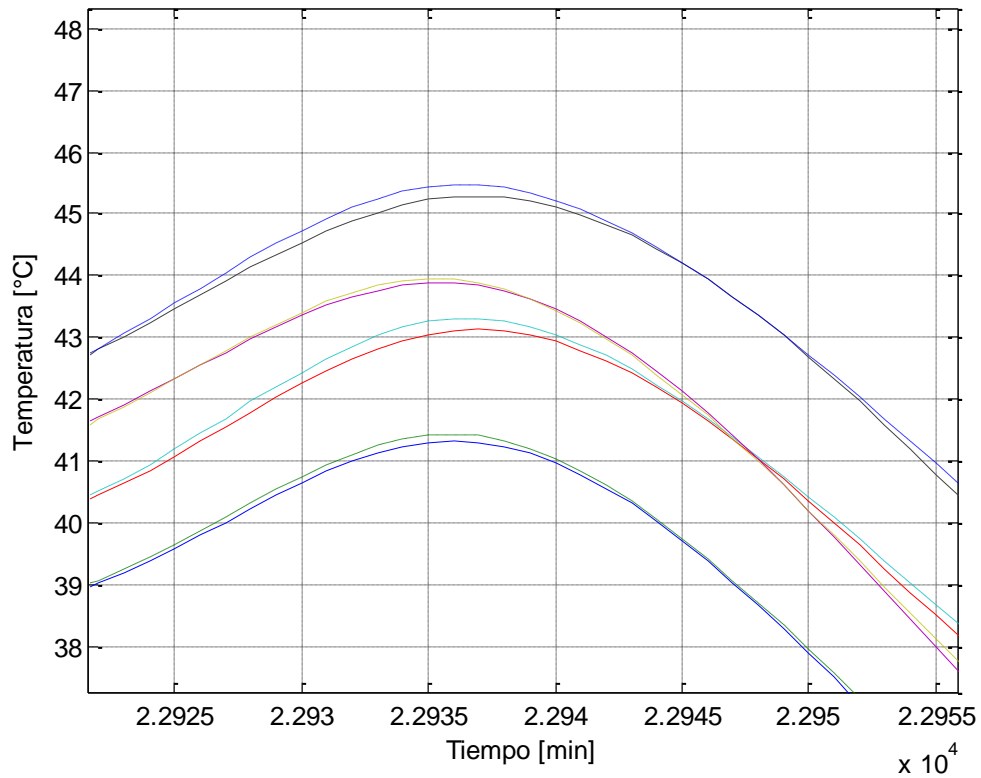


Figura 4.9 Ampliación de los datos medidos (—) y datos estimados (- -) correspondientes a la temperatura en la primera corrida (12 de Septiembre-1 de Octubre de 2012).

T1 a nivel del suelo con pantalla térmica,
 T2 semi-enterrado con pantalla térmica,
 T3 a nivel del suelo sin pantalla térmica (control),
 T4 semi-enterrado sin pantalla térmica.

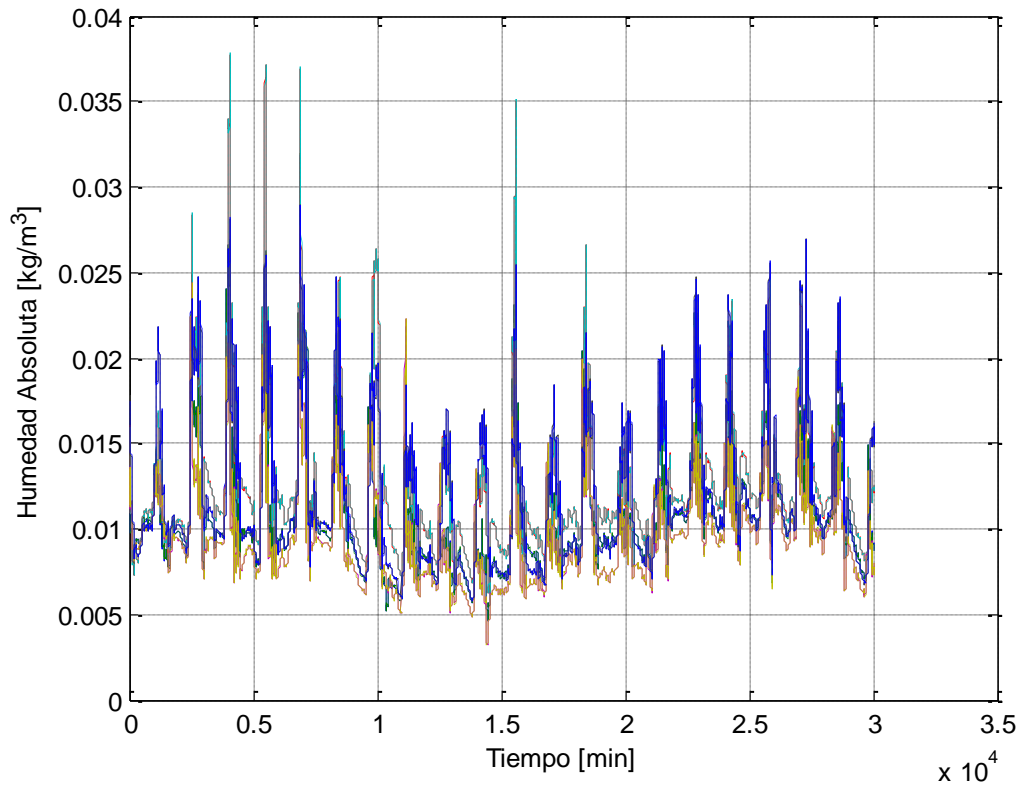


Figura 4.10 Datos medidos y datos estimados correspondientes a la humedad absoluta en la primera corrida (12 de Septiembre-1 de Octubre de 2012).

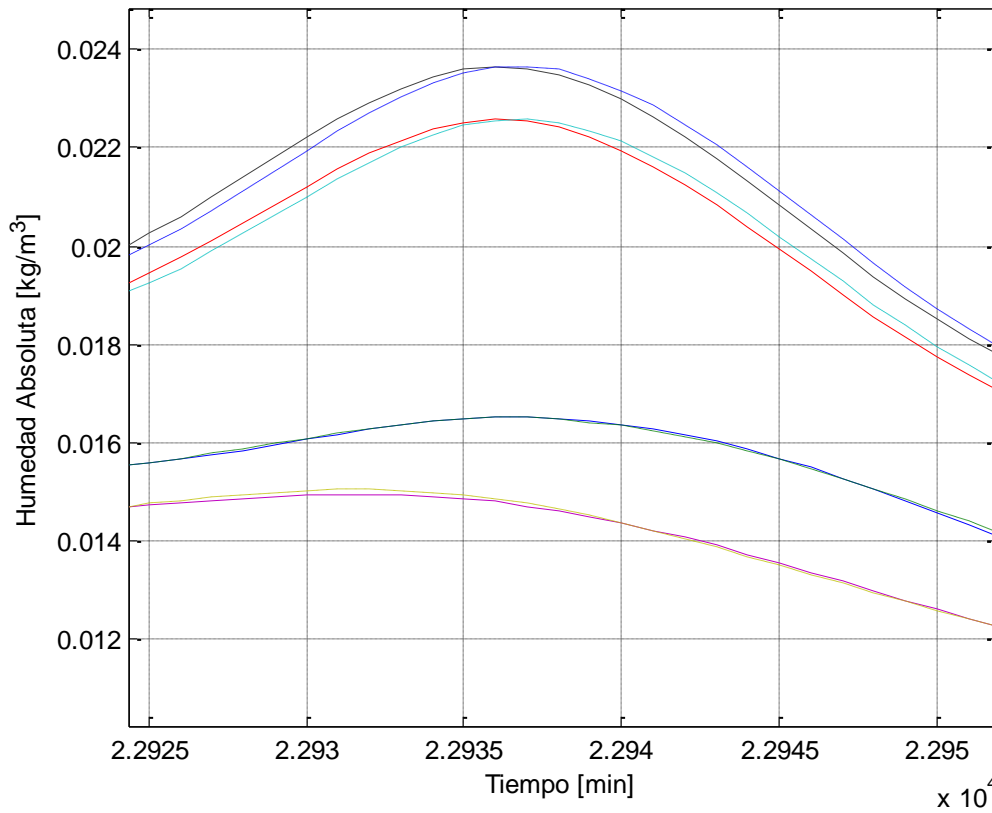
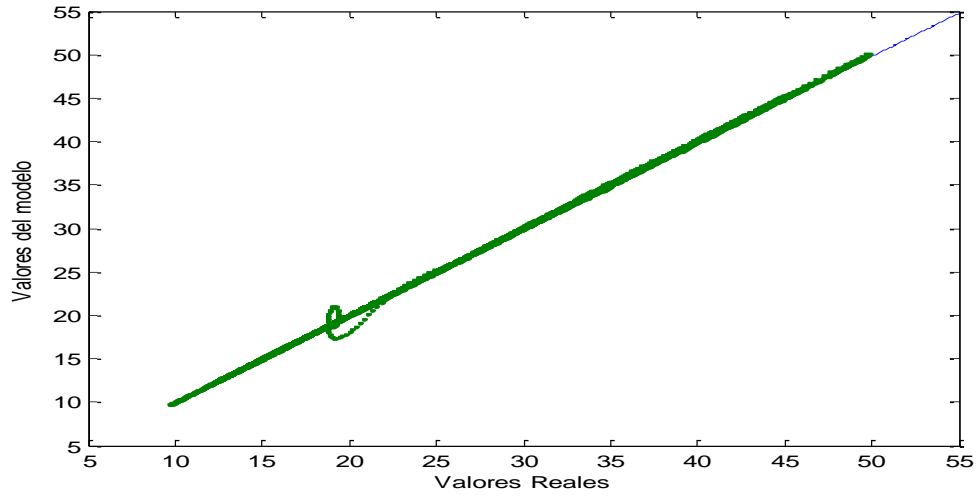


Figura 4.11 Ampliación de los datos medidos (—) y datos estimados (- -) correspondientes a la humedad absoluta en la primera corrida (12 de Septiembre-1 de Octubre de 2012).

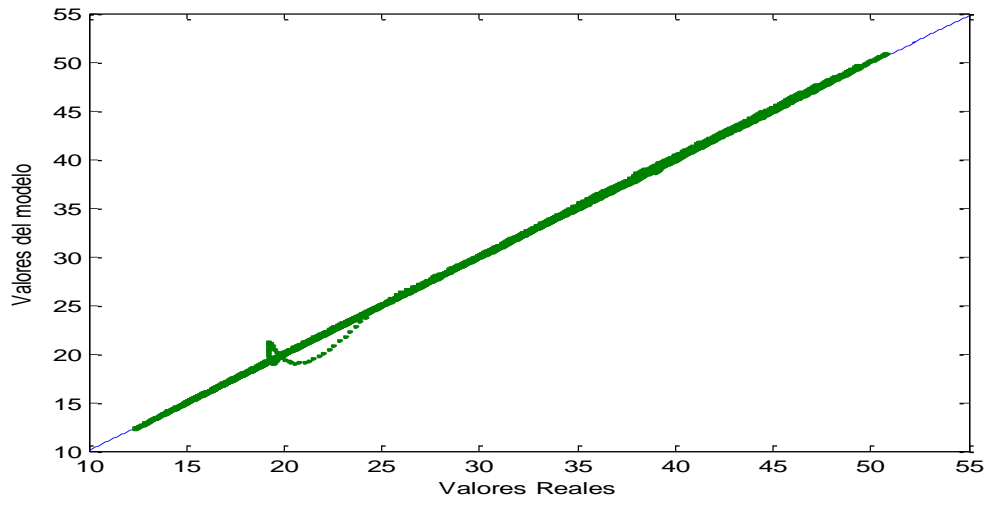
T1 a nivel del suelo con pantalla térmica,
 T2 semi-enterrado con pantalla térmica,
 T3 a nivel del suelo sin pantalla térmica (control),
 T4 semi-enterrado sin pantalla térmica.

Cuadro 4.2 Coeficientes estadísticos de la Temperatura en la primer corrida (12 Septiembre-1 de Octubre de 2012).

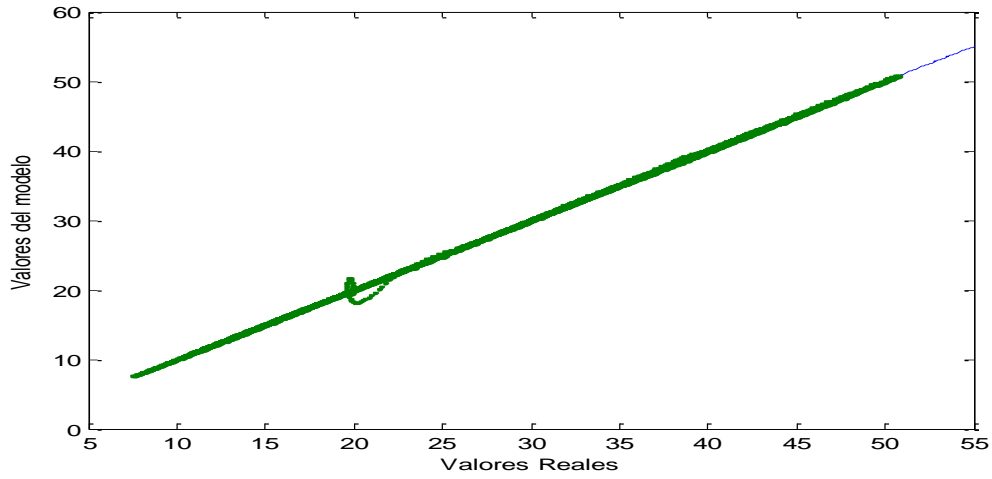
Tratamientos	r	%SEP	E	ARV
T-1	0.9999	0.00371	0.9999	0.0000907
T-2	0.9999	0.00453	0.9998	0.000149
T-3	0.9999	0.00359	0.9999	0.0000655
T-4	0.9990	0.0137	0.9989	0.00103



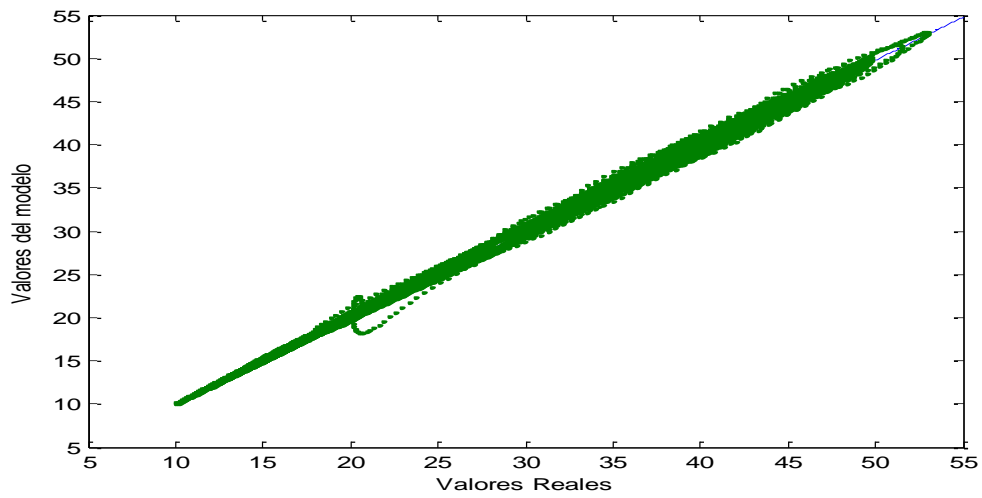
a)



b)



c)

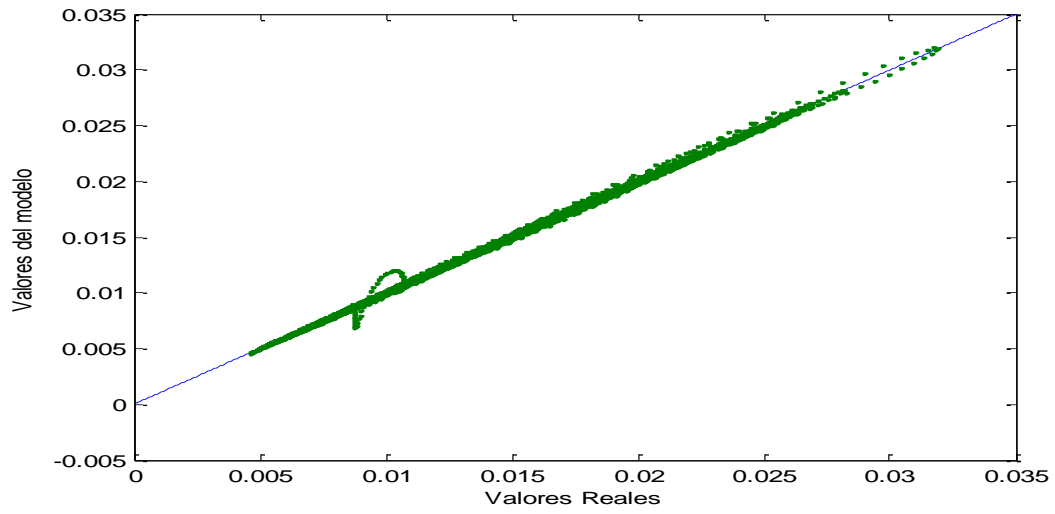


d)

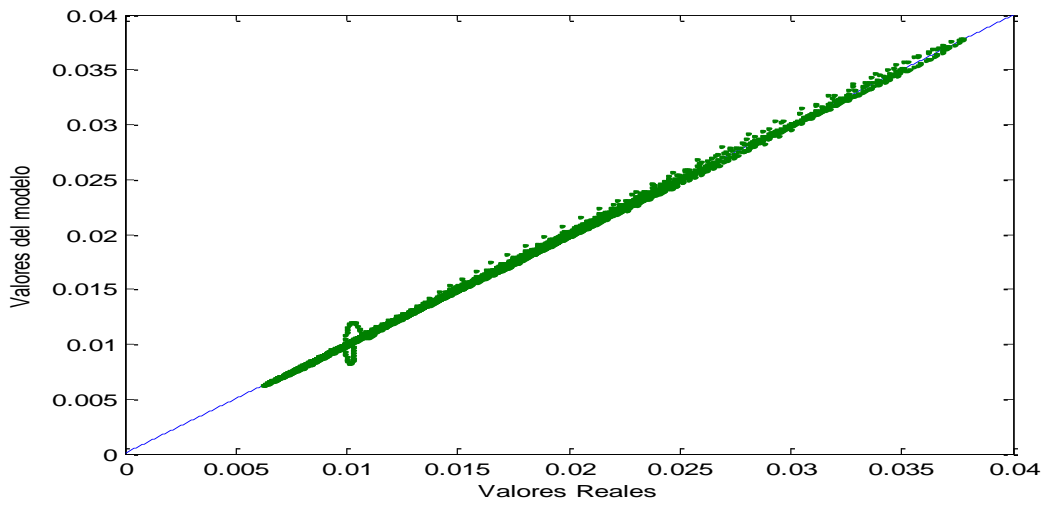
Figura 4.12 Graficas del coeficiente de correlación valores reales (medidos) vs valores del modelo (estimados) correspondientes a la temperatura de la primer corrida en cada uno de los tratamientos a) T1, b) T2, c) T3 y d) T4.

Cuadro 4.3 Coeficientes estadísticos de la Humedad absoluta en la primer corrida (12 Septiembre-1 de Octubre de 2012).

Tratamientos	r	%SEP	E	ARV
T-1	0.9993	0.00790	0.9993	0.0006669
T-2	0.9995	0.00730	0.9995	0.000484
T-3	0.9992	0.00866	0.9991	0.000840
T-4	0.9970	0.01903	0.9969	0.00305



a)



b)

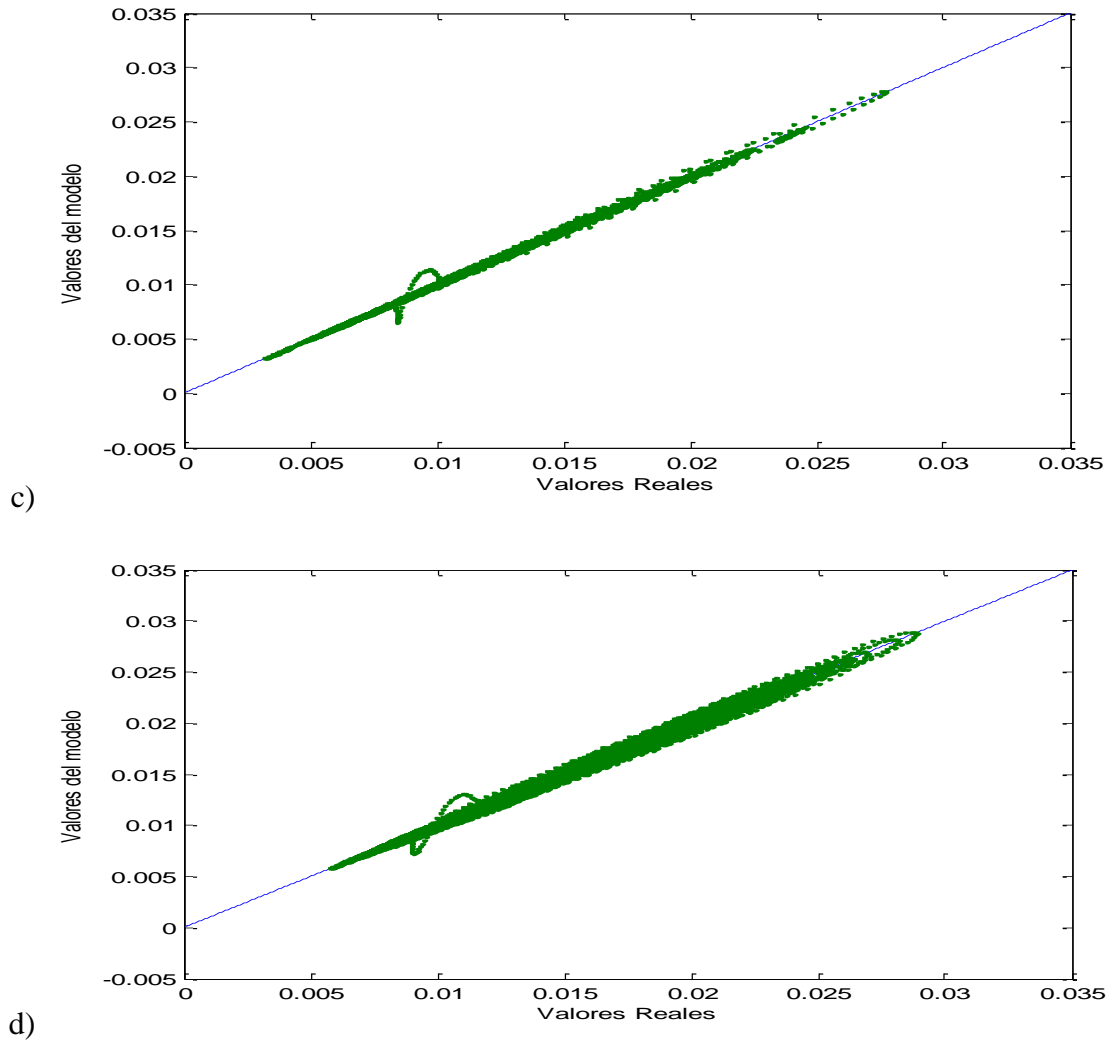


Figura 4.13 Graficas del coeficiente de correlación valores reales (medidos) vs valores del modelo (estimados) correspondientes a la humedad absoluta de la primer corrida en cada uno de los tratamientos a) T1, b) T2, c) T3 y d) T4.

Para el caso de los datos de la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre 2012) se consideró el modelo obtenido en la primera corrida donde los porcentajes fueron 25 %:75 %, de manera que en esta corrida (segunda) el 100 % de los datos son considerados como validación del modelo.

Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran los resultados obtenidos de la simulación de la temperatura y en las Figuras 4.16 y 4.17 los de la simulación de la humedad absoluta, donde se puede observar (Figuras 4.15 y 4.17 ampliaciones) que existe una buena

estimación, esto debido a que los valores estimados están muy cercanos a los medidos, ya que como se muestra en los cuadros 4.3 y 4.4 los coeficientes estadísticos (r , %SEP, E y ARV) se encuentran dentro de los valores que nos indica una relación muy adecuada (r y E deberían estar próximos a 1 y los valores de %SEP y ARV cercanos a 0). Esto concuerda con Uchida-Frausto *et al.* (2003), quienes concluyen que los modelos ARX pueden describir el comportamiento de un invernadero durante gran parte del año teniendo mejor desempeño que otros modelos (ARMAX auto regresivos móviles).

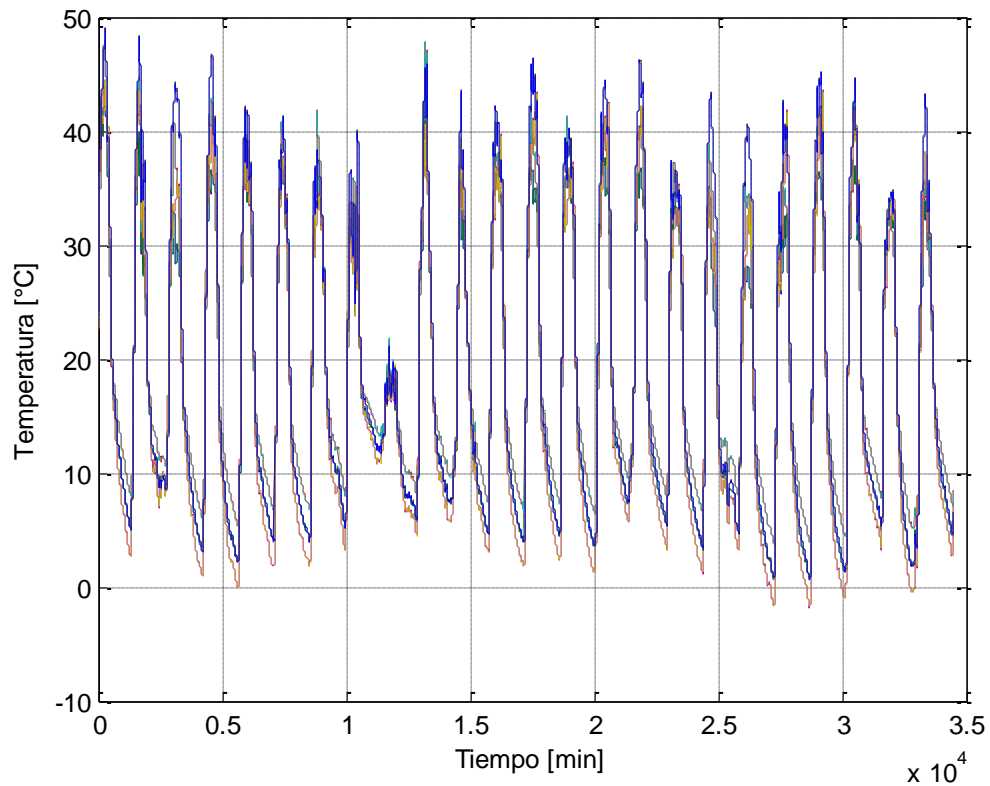


Figura 4.14 Datos medidos y datos estimados correspondientes a la temperatura en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).

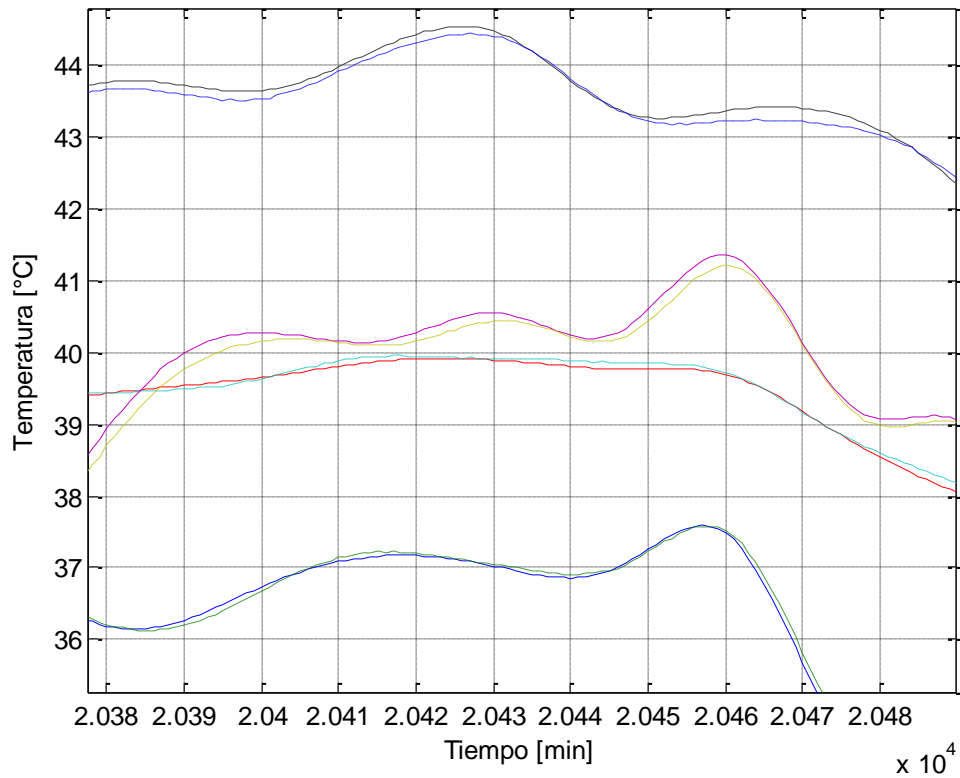


Figura 4.15 Ampliación de los datos medidos (—) y datos estimados (- -) correspondientes a la temperatura en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).

T1 a nivel del suelo con pantalla térmica,
 T2 semi-enterrado con pantalla térmica,
 T3 a nivel del suelo sin pantalla térmica (control),
 T4 semi-enterrado sin pantalla térmica.

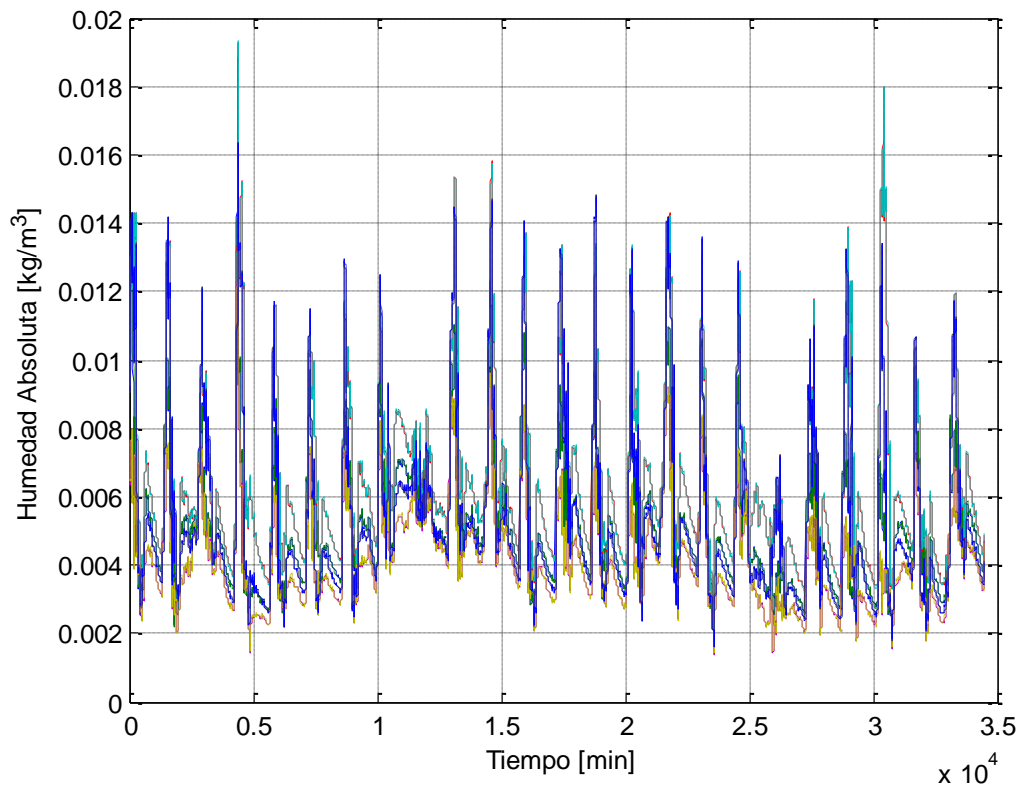


Figura 4.16 Datos medidos y datos estimados correspondientes a la humedad absoluta en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).

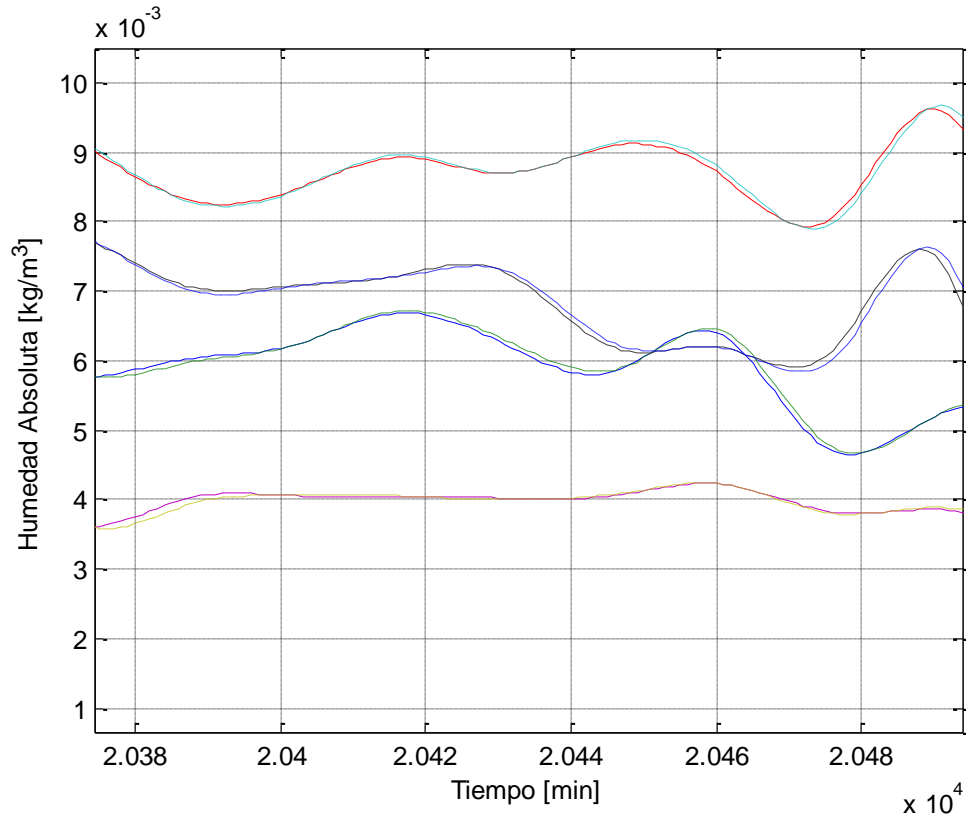
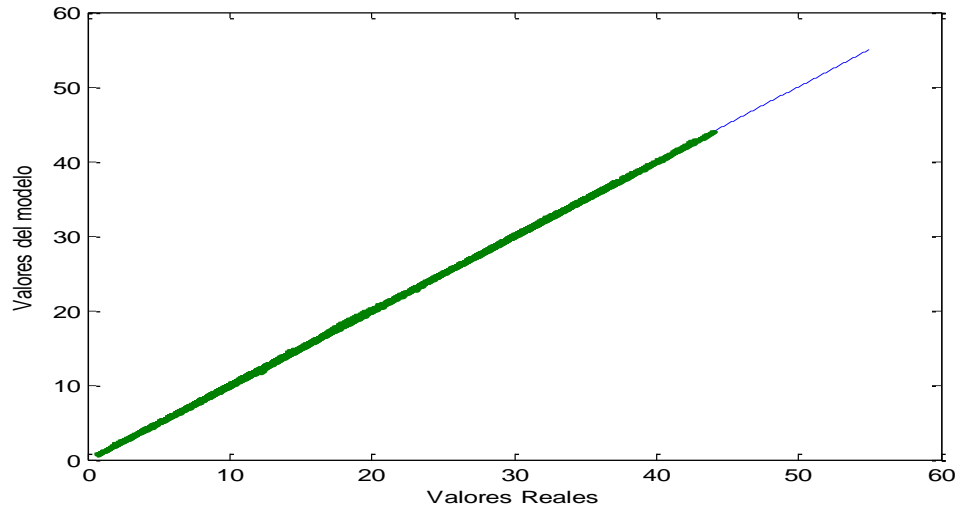


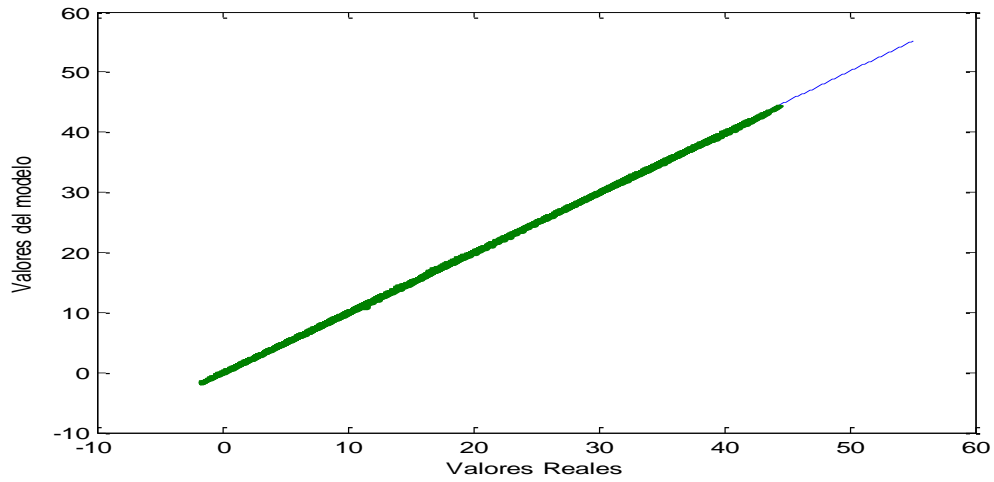
Figura 4.17 Ampliación de los datos medidos (—) y datos estimados (- -) correspondientes a la humedad absoluta en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).

T1 a nivel del suelo con pantalla térmica,
 T2 semi-enterrado con pantalla térmica,
 T3 a nivel del suelo sin pantalla térmica (control),
 T4 semi-enterrado sin pantalla térmica.

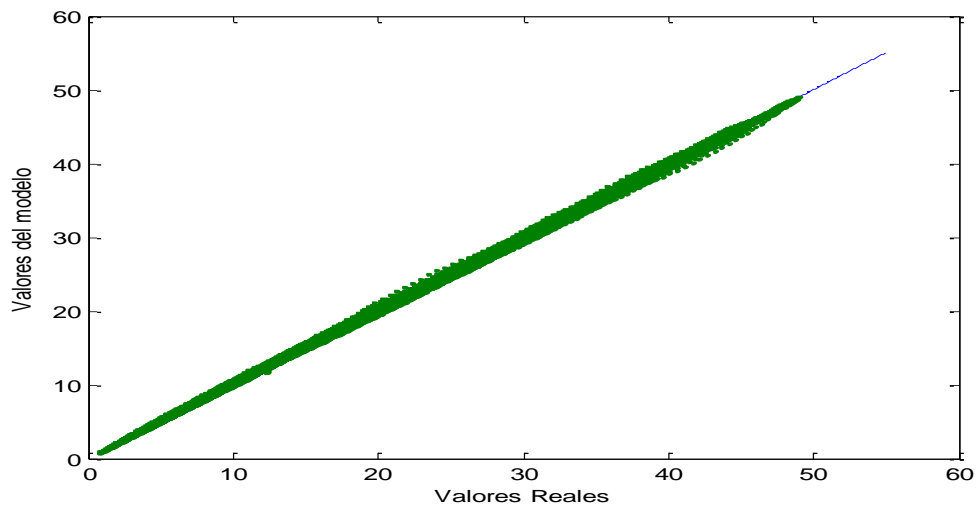
Cuadro 4.4 Coeficientes estadísticos de la Temperatura en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).

Tratamientos	r	%SEP	E	ARV
T-1	0.9999	0.00405	0.9999	0.0000371
T-2	0.9999	0.00364	0.9999	0.0000392
T-3	0.9999	0.00515	0.9999	0.0000451
T-4	0.9996	0.0140	0.9996	0.000391





c)

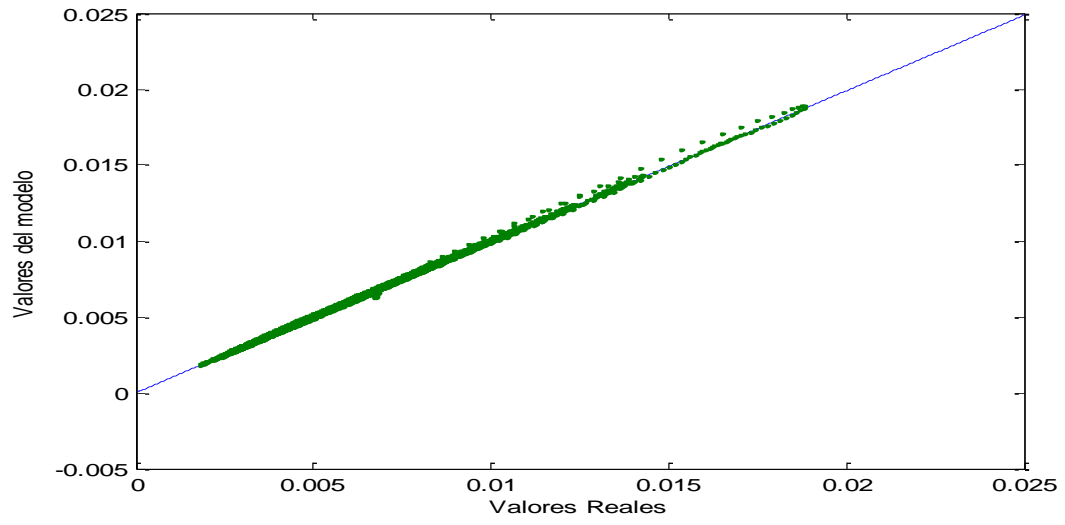


d)

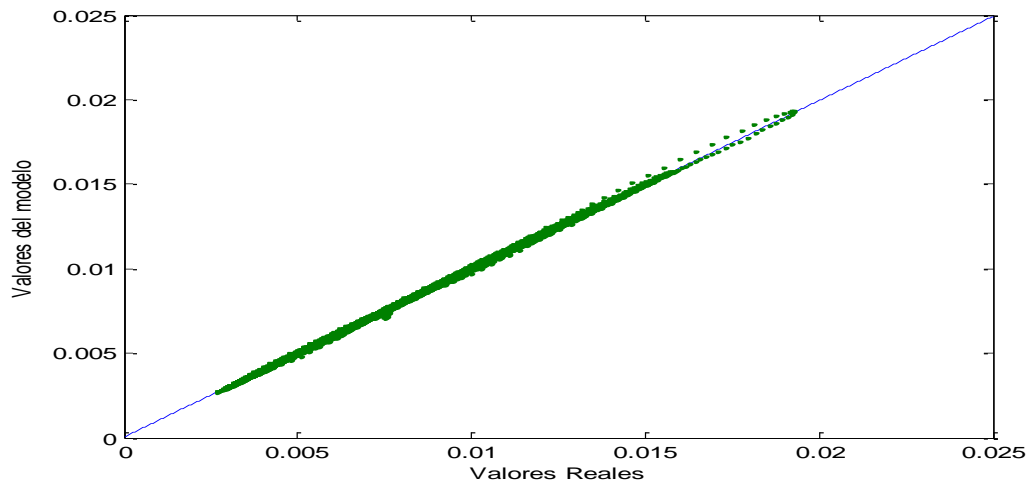
Figura 4.18 Graficas del coeficiente de correlación valores reales (medidos) vs valores del modelo (estimados) correspondientes a la temperatura de la segunda corrida en cada uno de los tratamientos a) T1, b) T2, c) T3 y d) T4.

Cuadro 4.5 Coeficientes estadísticos de la Humedad absoluta en la segunda corrida (del 4 al 29 de Diciembre de 2012).

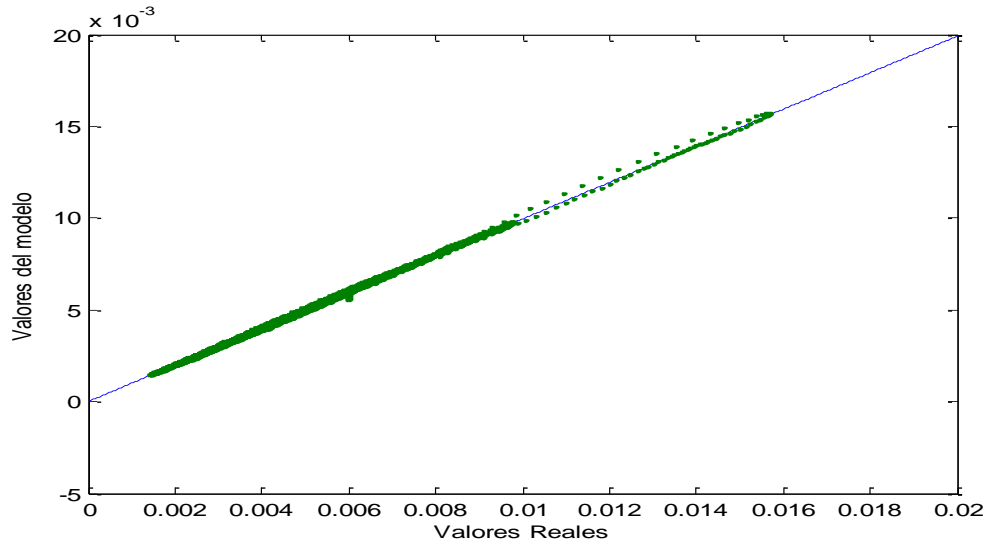
Tratamientos	r	%SEP	E	ARV
T-1	0.9994	0.00923	0.9993	0.000652
T-2	0.9996	0.00766	0.9996	0.000395
T-3	0.9993	0.0102	0.9991	0.000849
T-4	0.9977	0.0228	0.9977	0.00277



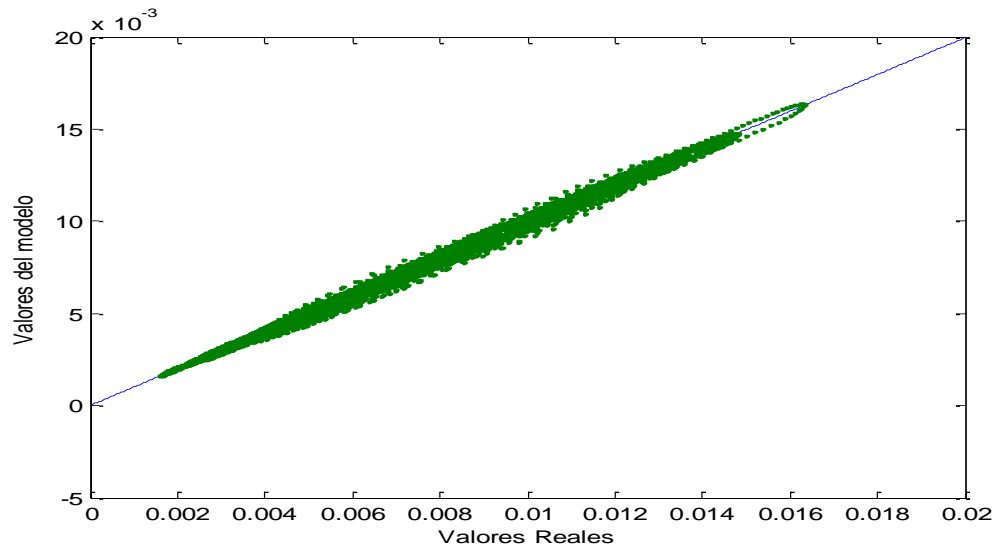
a)



b)



c)



d)

Figura 4.19 Graficas del coeficiente de correlación valores reales (medidos) vs valores del modelo (estimados) correspondientes a la humedad absoluta de la segunda corrida en cada uno de los tratamientos a) T1, b) T2, c) T3 y d) T4.

4.5 CONCLUSIONES

Las variables climáticas de temperatura y humedad relativa dentro de un invernadero se mantienen más elevadas, implementando la combinación de pantallas térmicas con invernaderos semi-enterrados, obteniendo una diferencia de temperatura hasta de 2 a 3 °C en las temperaturas mínimas internas con respecto a las temperaturas mínimas exteriores, lo cual influye en el incremento de la biomasa del cultivo hasta en un 32%. Esta combinación puede ser una opción viable para el control pasivo de la temperatura y humedad relativa para épocas de invierno, en zonas frías o como herramienta complementaria en sistemas que utilizan calefacción, ya que las bajas temperaturas afectan el desarrollo de los cultivos reduciendo la producción. Por lo tanto la hipótesis planteada en esta investigación se acepta.

El modelo matemático auto regresivo lineal (ARX), presenta una bondad de ajuste aceptable entre las temperaturas estimadas por el modelo y las observadas, y predice correctamente de una forma cuantitativa y oportuna el comportamiento de la temperatura en el interior del invernadero en función de las condiciones climáticas externas.

4.6 RECOMDACIONES

Evaluar económicamente el uso de pantallas térmicas e invernaderos semi-enterrados en cuanto al consumo de energía, ya que pueden ser una alternativa para el ahorro de combustible en los invernaderos con sistemas de calefacción.

La programación e implementar el modelo matemático en un sistema de control con el fin de desarrollar herramientas tecnológicas para la agricultura protegida.

V. BIBLIOGRAFIA

- AMCI. 2012. Asociación Mexicana de Constructores de Invernaderos. Panorama Mexicano: Revisión de datos de los invernaderos en México. Visitado el 24 de noviembre de 2012. Disponible en: <http://www.amci.org.mx/noticia.php?id=76>
- Ayaviri, R. 1996 Estudio de cuatro profundidades de Walipinis en la producción hortícola en invierno, Contorno Letanías Viacha-La Paz. Tesis de grado. Universidad Mayor de San Andres. La Paz, Bolivia. 168pp.
- Bailey, B.J. 1978. Heat consevation in glasshouses with aluminised thermal screens. *Acta Horticulturae*, 76: 275-278.
- Baille, M., Laury, J.C. y Baille, A. 1984. Influence d'un écran thermique sur le bilan énergétique et le microclimat nocturnes d'une serre. *Agronomie*, 4(4): 327-332.
- Baille, A., Aries, F., Baille, M. y Laury, J.C. 1985. Influence of thermal screen optical properties on heat losses and microclimate of greenhouses. *Acta Horticulturae*, 174: 111-117.
- Balam, F. 2007. Uso de Biofertilizantes liquido en la producción de plántula de jitomate (*Lycopersicum esculentum*). Tesis para obtener el grado de Especialista en Ingeniería en Invernadero. Universidad Autónoma de Querétaro. México 65 pp.
- Boesman, G., Derouich, M. Y Verlodt, H. 1984. Influence of solar heating and thermal screen on the greenhouse climate and the yield of pepper (*Capsicum annuum L.*). *Acta Horticulturae*, 154: 267-279.
- Bot, GPA. 1983. Greenhouse climate: form physical processes to a dynamic model. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- Callejón-Ferre, Á.J.; F. Manzano-Agugliaro; M. Díaz- Pérez; A. Carreño-Ortega y A. J. Pérez. 2009. Effect of shading with aluminized screens on fruit production and quality in tomato (*Solanum lycopersicum L.*) under greenhouse conditions. En: *J. Agr. Res.* 7(1), www.inia.es/sjar.
- Casierra-Posada, F., Álvarez, O. J., Luque, N. 2010. Calidad de los frutos en tomate (*Solanum lycopersicum L.cv. Rocio*) producidos bajo coberturas reflectiva y plástica. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo de Investigación Eco fisiología Vegetal, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja (Colombia). *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas* - Vol. 4 - No. 1 - pp. 67-80, 2010.

- Castañeda, R. 2002. Elementos de instrumentación y control para la simulación del balance de energía en un invernadero. Tesis de Maestría, Querétaro, México.
- Castañeda, R. y Herrera, G. 2002. Elementos de instrumentación y control para la simulación del balance de energía en un invernadero. Congreso latinoamericano de Ingeniería Agrícola.
- Castañeda-Miranda, R., Ventura-Ramos, E., Peniche-Vera, R.R. y Herrera-Ruiz, G. 2006. Fuzzy Greenhouse Climate Control System based on a Field Programmable Gate Array. *Biosyst. Eng.* 94(2):165-177.
- Castañeda-Miranda, R., Ventura-Ramos, E., Peniche-Vera, R.R. y Herrera-Ruiz, G. 2007. Analysis and simulation of a greenhouse physical model under weather conditions of the central region of Mexico. *Agrociencia* 41(003):317-335.
- Castilla, N. 1994. Greenhouses in the Mediterranean areas: Technological level and strategic management. *Acta Horticulturae* 361: 44-56.
- Castilla, P. N. 2007. Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo. (Ed.) Mundi-Prensa, 2ª ed.
- Cervantes, M.A. 2002a. Ventilación en cultivos intensivos. Visitado el 20 de noviembre de 2012. Disponible en: www.infoagro.com.
- Cervantes, M.A. 2002b. Control de las altas temperaturas en cultivos hortícolas intensivos. Visitado el 20 de noviembre de 2012. Disponible en: www.infoagro.com.
- De Graaf, R. 1985. The influence of thermal screening and moisture gap on the transpiration of glasshouse tomatoes during the night. *Acta Horticulturae*, 174:57-66.
- Deltour, J., Halleux, D. De Nijskens, J., Coutisse, S. y Nisen, A. 1985. Dynamic modelling of heat and mass transfer in greenhouses. *Acta Horticulturae*, 174: 119-126.
- De Zwart, H.F. 1996. Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. PhD thesis, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- Enoch, H.Z. 1986. Climate and protected cultivation. *Acta Horticulturae* 176: 11-20.
- Enoch, H.Z. y Enoch, Y. 1999. The history and geography of the greenhouse Greenhouse Ecosystems. Stanhill G., Enoch H.Z. (Ed.) Elsevier. Amsterdam: 1-15.
- FAO. 2002. Food and Agriculture Organization. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Estudio FAO Producción y protección vegetal 90. Grupo de cultivos hortícolas. Dirección de Producción y Protección Vegetal.

- FAO. 2012. Food and Agriculture Organization. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Departamento de Agricultura.
- Fernández-Rodríguez, E. J., Fernández, J., Kenig, A. y Camacho, F. 1998. Uniformidad del campo radiativo bajo sistemas sombreo mediante pantallas aluminizadas en invernadero. *Actas de Horticultura*, 21:37-44.
- Gil, R., Luque, N. Y. and Bojacá, C. R. 2011. Effect of aluminized screens on greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production systems at the high tropical conditions. Department of Basic Sciences, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Universidad de Bogota Jorge Tadeo Lozano. Bogota (Colombia). *Agronomía Colombiana* 29(3), 423-431, 2011.
- Guzmán-Cruz, R. 2010. Algoritmos evolutivos para la estimación de parámetros del modelo climático de un invernadero. Tesis Doctoral, Querétaro, México.
- Guzmán-Cruz, R., Olvera-González, E., Lopez-Cruz, I. L., and Montoya-Zamora, R. 2012. Modelling greenhouse air temperature using evolutionary algorithms in autoregressive models. *African Journal of Agricultural Research* Vol. 8(3), pp. 251-261.
- Henao, F. 2001. Cómo obtener alta productividad en cultivos de invernadero.
- IDAE. 2008. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos. Madrid España.
- Ito, T. 1999. The greenhouse and hydroponic industries in Japan. *Acta Horticulturae* 481: 761-764.
- Iturry, L. 2002. Manual de construcción y manejo del walipini y panqar huyu. Benson Agriculture and Food Institute Brigham Young University. Utah, Estados Unidos 61pp.
- Kenig, A. y E. Fernández-Rodríguez. 2002. Quality of truss tomatoes grown under aluminized reflective screens in Southern Spain.
- López-Cruz I.L, Rojano-Aguilar A, Ojeda-Bustamante W, Salazar-Moreno R (2007). ARX models for predicting greenhouse air temperature: a methodology. *Agrociencia* 41:181-192.
- Ljung, L. 1999. System Identification, Theory for the user. Prentice Hall Ed.
- Martínez, P.F., Roca, D., Suay, R., Martínez, N., Blasco, X., Herrero, J. M. y Ramos, C. 2012. Avances en el control de los factores del clima para el cultivo en invernadero. Departamento de Horticultura, Instituto Valenciano de

Investigaciones Agrarias, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Politécnica de Valencia.

- Nisen, A., G. M., Jiménez, R., La Malfa, G., Martínez-Gascía, P.F., Monteiro, A., Verlodt, H., Villele, O., Zabeltitz, C.H., Denis, J.C., Budoin, W. y Garnaud, J.C. 1988. Cultures protégées en climat méditerranéen. FAO. Roma.
- Pantil, S. L., Tantau, H. J., Salokhe, V. M. 2008. Modelling of tropical greenhouse temperatura by auto regressive and neural network models. Biosystems Engineering. 99:423-431.
- Pirard, G., Deltour, J. y Nijskens, J. 1994. Gestion des écrans thermiques en serre. *Plasticulture*, 103: 11- 22.
- Rivera, R. D. 2007. La tecnología de invernadero en el valle del Yaqui. Una alternativa para el desarrollo regional. Departamento de Economía de la Universidad de Sonora.
- Rodríguez, D. A. 2009. Métodos de predicción y técnicas de control de la condensación en invernaderos. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Departamento de Ingeniería Rural.
- Ruiz-Palacios, F.O, Cotrino-Badilo, C.E. 2010. Identifying a greenhouse climate model by using subspace methods. *Ingeniería e Investigación* 30(2):157-167.
- Serrano, C. Z. 2005. Construcción de invernaderos. Tercera edición. Mundi-Prensa. Libros.
- Tap, F. 2000. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. PhD Thesis. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Teitel, M. Peiper, O. y Zvieli, Y. 1995. On the possibility of using shading screens for frost protection. Contribution from the Agricultural Research Organization. The Volcani Center. Bet Dagan, Israel. N^o 1546-E. 20 pp.
- Uchida Frausto, H., Pieters, J. G., Deltour, J. M. 2003. Modelling greenhouse temperatue by means of auto regressive models. *Biosistemas Engineering*. 84, 147-157.
- Velasco, N. 2001. Manejo del régimen de riego mediante tenciómetros en el cultivo de acelga bajo el sistema de camas bajas atemperadas (panqar huyus), Tesis de grado 124pp
- Valera, D.L., Molina, F.D. y Gil, J.A. 2001. Las mallas como técnica de control climático en invernaderos. *Vida Rural*, nov: 50-52.

- Von, B. W. 2000. Comportamiento agronómico de dos variedades de acelga bajo dosis de abonamiento con humus de lombriz en walipinis. Agriculture and Food Institute and Corporation. BENSON.
- Wang S, Boulard, T. 2000. Predicting the microclimate in a naturally ventilated plastic house in a Mediterranean climate. *J. Agric. Eng. Res.* 75:27-38.
- Wittwer, S.H. y Castilla, N. 1995. Protected cultivation of horticultural crops, worldwide. *Horttechnology* 5 (1):6-23.
- Zhang, Z.B. 2006. Shading net application in protected vegetable production in China. *Acta Horticulturae* 719: 479-482.

VI. ANEXO I



MAYO/2013



CONFERENCIAS
EXPOSICIONES

TALLERES
EVENTOS CULTURALES



9º CONGRESO
INTERNACIONAL DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, 6 abril de 2013

Estimado(s) Colega(s):

**Arturo Arana Juaristi, Adán Mercado Luna, Enrique Rico García, Rosario Guzmán Cruz,
Genaro Martín Soto Zarazúa**

Tenemos el agrado de comunicarte que su propuesta:

**IMPLEMENTACIÓN DE PANTALLAS TÉRMICAS E INVERNADEROS SEMI-ENTERRADOS
COMO OPCIÓN PARA CONTROL PASIVO DE VARIABLES CLIMÁTICAS.
THERMAL SCREENS AND SEMI-BURIED GREENHOUSES IMPLEMENTATION AS AN
OPTION FOR PASSIVE CONTROL OF CLIMATE VARIABLES.**

Ha sido **ACEPTADA** por el Comité Evaluador Científico para formar parte del libro "*La Ingeniería y sus áreas afines*" el cual, conformará las memorias del 9º Congreso Internacional de Ingeniería que se llevará a cabo del 13 al 17 de mayo de 2013.

A nombre del comité organizador, le agradecemos su participación esperando contar con su honorable presencia en este magno evento.

Atentamente,
"El ingenio para crear no para destruir"

MDM Norma Angélica Rodríguez Guzmán
Coordinadora General del Congreso

Universidad Autónoma de Querétaro
Cerro de las Campanas s/n. Colonia Las Campanas C.P. 76010
Santiago de Querétaro, Qro. México.
Tel: (442) 192-12-00 Ext: 6016 y 6015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Dr. Gilberto Herrera Ruíz
Rector

Dr. César García Ramírez
Secretario Académico

Q.B. Magali E. Aguilar Ortiz
Secretaría de Extensión Universitaria

Dra. Ma. Teresa García G. Besné
Secretaría de Difusión Cultural

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad de Ingeniería

Tec. Prof. Ricardo Saavedra Chávez
Coordinador de Publicaciones

LAV José Abel Cervantes Cortez
Diseño

MDM Norma Angélica Rodríguez Guzmán
Coordinadora de edición

D.R. ©Universidad Autónoma de Querétaro,
Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n,
Código Postal 76010, Querétaro, Qro., México

ISBN: 978-607-513-050-7

Primera edición, abril de 2013
Hecho en México
Made in Mexico



Implementación de pantallas térmicas e invernaderos semi-enterrados como opción para el control pasivo de las variables climáticas.

Thermal screens and semi-buried greenhouses implementation as an option for climate variables passive control.

Arturo Arana Juaristi¹, Adán Mercado Luna², Enrique Rico García², Rosario Guzmán Cruz², Genaro Martín Soto Zarazúa².

¹Alumno de Posgrado, Ingeniería de Biosistemas Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro

²Profesores de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.

Correo electrónico: araju_amealco@hotmail.com

RESUMEN. Con la finalidad de determinar el efecto que tienen el uso de pantallas térmicas y los invernaderos semi-enterrados en la temperatura y el desarrollo de un cultivo, se evaluaron en cuatro prototipos de invernaderos de 17.69 m² (3.64 x 4.86 m), con una altura de 1.40 m, en una variedad de lechuga vulcano (sangría), utilizando como base de nutrición la solución Steiner al 50% con un pH de 6 y una conductividad térmica de 1.29 ds/m realizando el riego dos veces por día, las plántulas después de ser germinadas en charolas se trasplantaron directo al suelo. El diseño experimental fue de cuatro tratamientos: T1 a nivel del suelo con pantalla térmica, T2 semi-enterrado con pantalla térmica, T3 a nivel del suelo sin pantalla térmica (control) y T4 semi-enterrado sin pantalla térmica. Por lo que se tuvieron cuatro unidades experimentales con 27 plantas cada una (108 plantas en total). El análisis de varianza y la prueba de medias de Tukey se realizaron en el paquete estadístico JMP versión 5 con un nivel de significancia de $P \leq 0.05$, en donde tanto la temperatura como el desarrollo del cultivo muestran diferencias significativas entre los tratamientos. Obteniendo como resultados que la temperatura se mantiene más estable, ya que la temperatura mínima media es mayor en los tratamientos T1 (14.29°C), T2 (15.98°C) y T4 (14.65°C) en comparación con el T3 (12.98°C) y la externa (13.45°C) y el peso húmedo del cultivo también presenta diferencias significativas entre tratamientos ya que en los T1 (428.33 gr), T2 (382.00 gr) y T4 (456.00 gr), el peso del cultivo es mayor que en el T3 (276.33 gr). Con estos resultados se concluye que la utilización de pantallas térmicas en combinación con invernaderos semi-enterrados, es una opción para mantener la temperatura más estable afectando positivamente el desarrollo del cultivo.

(Palabras clave: pantalla térmica, semi-enterrado, invernadero, cultivo).

SUMMARY. As a way to determinate the effect of thermal screens and semi-buried greenhouses over climate temperature and crop development, 4 greenhouses prototypes (17.69 m² – 3.64 x 4.86 m) were evaluated. Using lettuce volcano (sangria) plantlets with a 50% Steiner solution as nutrition base, pH of 6 and electric conductivity of 1.29 ds/m watering twice per day, plantlets were transplanted after germination from trays to soil. Experimental design included four treatments: T1 at soil level with thermal screen, T2 semi-buried with thermal screen, T3 at soil level without thermal screen (control) and T4 semi-buried without thermal screen. Having four experimental units with 27 plants each (total of 108 plants). Variance analysis and Tukey mean tests were realized with statistic software JMP version 5 at a significance level of $P \leq 0.05$, temperature, as crop development factor, revealed significant differences between treatments. As result temperature was kept at stable levels because average minimum temperature was higher on treatments T1 (14.29°C), T2 (15.98°C) and T4 (14.65°C) compared to T3 (12.98°C) and external temperature (13.45°C), lettuce weight also shown significant differences between treatments, T1 (428.33 gr), T2 (382.00 gr) and T4 (456.00 gr) larger weight was presented on T3 (276.33 gr). Results conclude the using of thermal screens in combination with semi-buried greenhouses is a viable option to stabilize temperature and have a positive effect on crop development.

(Key words: thermal screens, semi-buried, greenhouses, crop).

1. INTRODUCCIÓN

Un invernadero es una construcción de vidrio o plástico con el microclima apropiado para el adecuado desarrollo de una plantación específica, por lo tanto, partiendo del estudio técnico de ambientación climática, deben obtenerse en él, la temperatura, humedad relativa y ventilación apropiadas que permitan alcanzar alta productividad, a bajo costo, en menos tiempo, sin daño ambiental, protegiéndose de las lluvias, el granizo, las heladas, los insectos o los excesos de viento que pudieran perjudicar un cultivo (Henaó, 2001). Las reacciones biológicas de importancia no pueden desarrollarse si la temperatura del invernadero está por debajo de 0°C, o por encima de 50°C. El límite inferior corresponde al punto de congelación del agua y el superior a la desnaturalización de las proteínas (FAO, 2012).

Existen distintos sistemas para calentar y mantener la temperatura en el interior de un invernadero durante periodos fríos: Hermetismo del invernadero, capas dobles de polietileno o de polipropileno, calefactores, sistemas de calefacción por agua o aire calientes, pantallas térmicas que reducen significativamente las pérdidas de calor en los invernaderos disminuyendo el volumen de aire a calentar, por lo que se ha extendido su uso para economizar los gastos de combustible en invernaderos con calefacción (IDAE, 2008) e invernaderos enterrados estos pretenden aprovechar el calor del suelo en beneficio de la temperatura de la atmósfera interior del invernadero, cuando las temperaturas exteriores son menores que la temperatura que tiene en ese momento el suelo donde está enterrado el invernadero (Serrano, 2005).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el comportamiento de invernaderos semi-enterrados en donde de manera natural el suelo emite calor y combinado con pantallas térmicas por la noche, ayuden a mantener la temperatura más estable y por lo tanto ayuden a incrementar la biomasa del cultivo.

2. METODOLOGÍA

1.1 Ubicación del experimento

El experimento se realizó en el campus Amazcala de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro del 11 de Septiembre al 02 de Octubre del 2012. El poblado de Amazcala pertenece al municipio de El Marqués, Querétaro, el cual se localiza en el sector suroeste del estado, entre los 20° 31' y 20° 58' de latitud Norte. Su longitud se encuentra entre los 100° 09' y los 100° 24' del Oeste a 1850 msnm. Colinda al Oeste con el municipio de Querétaro, al Norte con el estado de Guanajuato, al Este con el municipio de Colón y al Sur con los municipios de Huimilpan y Pedro Escobedo. Los Tratamientos se establecieron en cuatro prototipos de invernaderos tipo túnel de 17.69 m² (3.64 x 4.86 m), con una altura de 1.40 m, de estructura de acero galvanizado de una pulgada, forrados en la parte del techo y los cuatro lados con plástico difuso de 600 galgas (150 micras), cada uno con dos ventanas cenitales de 4.86 x 0.40 m y dos de ellos (los que estuvieron a nivel del suelo) con dos ventanas laterales de 3.23 x 0.60 m (Figura 2.1). Cada prototipo contó con tres líneas secundarias de riego con nueve goteros de 4 L/min cada una y el suelo se cubrió con Grand cover blanco, dos de los prototipos (uno semi-enterrado y uno a nivel del suelo) tenían pantalla térmica aluminizada plegable manualmente.



Figura 2.1 Prototipos de invernaderos a nivel del suelo y semi-enterrados.

1.2 Material biológico

Se utilizó el cultivo de lechuga variedad Sangría (Figura 2.2), el cual se desarrolló hasta la etapa de plántula en charolas para siembra, las que fueron trasplantadas en cada uno de los prototipos de invernaderos para su desarrollo hasta cosecha.



Figura 2.2 Lechuga variedad Sangría

1.3 Nutrición

Se llevó a cabo con solución nutritiva Steiner 1984 al 50 % como base para el desarrollo del cultivo para cada uno de los tratamientos.

1.4 Manejo del riego

Se realizaron dos riegos por día el primero a las 9:00 horas y el segundo a las 18:00 horas ambos de 5 minutos (333 ml).

1.5 Diseño experimental

Se establecieron cuatro tratamientos (prototipos de invernaderos): T1 a nivel del suelo con pantalla térmica, T2 semi-enterrado con pantalla térmica, T3 a nivel del suelo sin pantalla térmica (control) y T4 semi-enterrado sin pantalla térmica (Figura 2.3 a y b). Por lo que se tuvieron cuatro unidades experimentales con 27 plantas cada una (108 plantas en total).



Figura 2.3 a) Prototipo a nivel del suelo. **b)** Prototipo semi-enterrado.

1.6 Variable evaluadas

1.6.1 Dentro de los prototipos

Temperatura (°C) y Humedad relativa (%H.R.): La medición de estas dos variables se realizó con cuatro Data Logger marca spectrum serie 1000 colocados a una altura de 0.35 m del suelo (Figura 2.4), cada 15 minutos durante cuatro semanas.

Radiación solar (R.S. w/m^2): Esta variable se midió con cuatro sensores de radiación PAR (radiación fotosintéticamente activa) que registra radiaciones entre 400 y 700 nm a una altura de 0.45 m del suelo (Figura 2.5), los cuales se adaptaron a los Data Logger descritos anteriormente.



Figura 2.4 Data logger.



Figura 2.5 Sensor de radiación PAR.

1.6.2 Al exterior de los prototipos

Temperatura (T °C), Humedad relativa (H.R. %) y Radiación solar (R.S. w/m²): Estas variables fueron medidas con una estación meteorológica marca Davis Pro2 inalámbrica (Figura 2.6), cada 15 minutos durante cuatro semanas.



Figura 2.6 Estación meteorológica Davis Pro2.

1.6.3 De la planta

Peso húmedo (g): Se pesó en una balanza analítica marca Adventurer modelo AR2140 con capacidad de 0.0001 a 210 g (Figura 2.7), esto se llevó a cabo cada 8 días (los martes) a las 12:00 horas desde el trasplante (peso de plántula), hasta el momento de la cosecha cuatro semanas después del trasplante.

Peso seco (g): Se realizó en una balanza analítica marca Adventurer modelo AR2140 con capacidad de 0.0001 a 210 g (Figura 2.7), esto después de haberlas secado en una estufa marca Riossa modelo -41 (Figura 2.8).



Figura 2.7 Balanza analítica.



Figura 2.8 Estufa.

2.6.4 Procedimiento del manejo de pantallas térmicas y ventanas.

Después de haber establecido el cultivo y haber colocado los aparatos de medición antes descritos, tanto las ventanas cenitales (en los cuatro prototipos) como las laterales (en los dos prototipos a nivel del suelo), se abrían a las 8:30 hrs y se cerraban a las 18:30 hrs, las pantallas térmicas se replegaban a las 8:30 hrs y se desplegaban a las 18:30 hrs.

1.7 Análisis estadístico

Los datos se analizaron estadísticamente utilizando el paquete JMP versión 5 para cada variable con un nivel de significancia de ($P \leq 0.05$), mediante la comparación de medias y la prueba de Tukey.

3. RESULTADOS Y DISCUSION

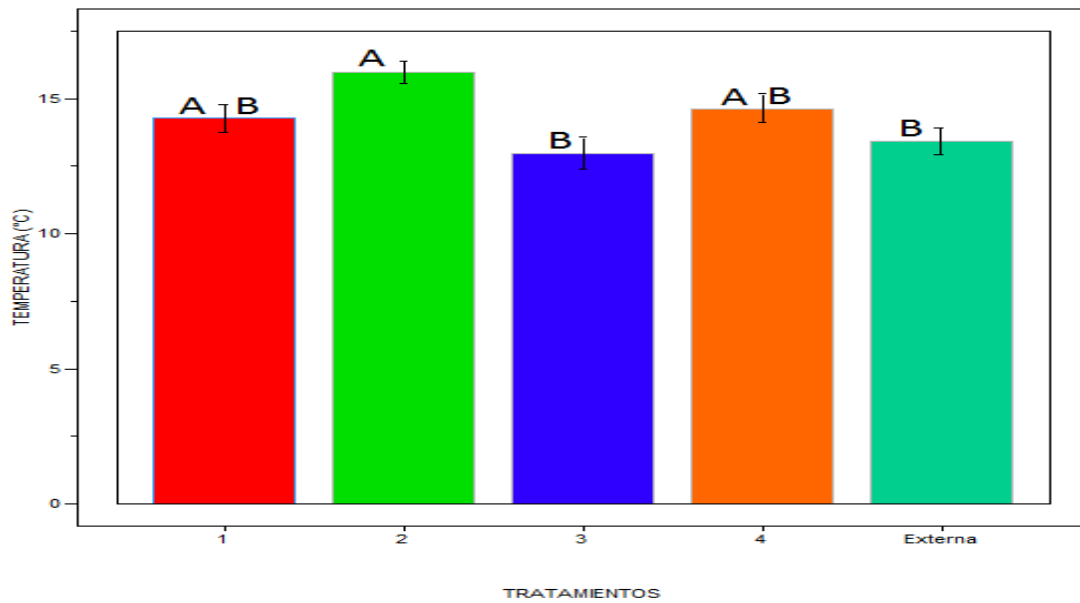
3.1 Temperatura

En cuanto a esta variable (Grafica 3.1) se observan diferencias significativas entre tratamientos ($P \leq 0.05$), entre el T2 (15.98°C, semi-enterrado con pantalla térmica) y el T3 (12.98°C, nivel del suelo sin pantalla térmica control) y la externa (13.45°C). El uso de pantallas térmicas en las horas de la noche logra retener el calor dentro del invernadero, lo cual se ve reflejado en un incremento de la producción como se reporta en Gil, *et al* (2011) y Casierra-Posada *et al.* (2010). Von, (2000), reporta que el sistema walipini (invernaderos enterrados) es una alternativa para el agricultor, ya que se puede cultivar en invierno donde las temperaturas son bajas y es difícil mantener productos hortícolas a campo abierto.

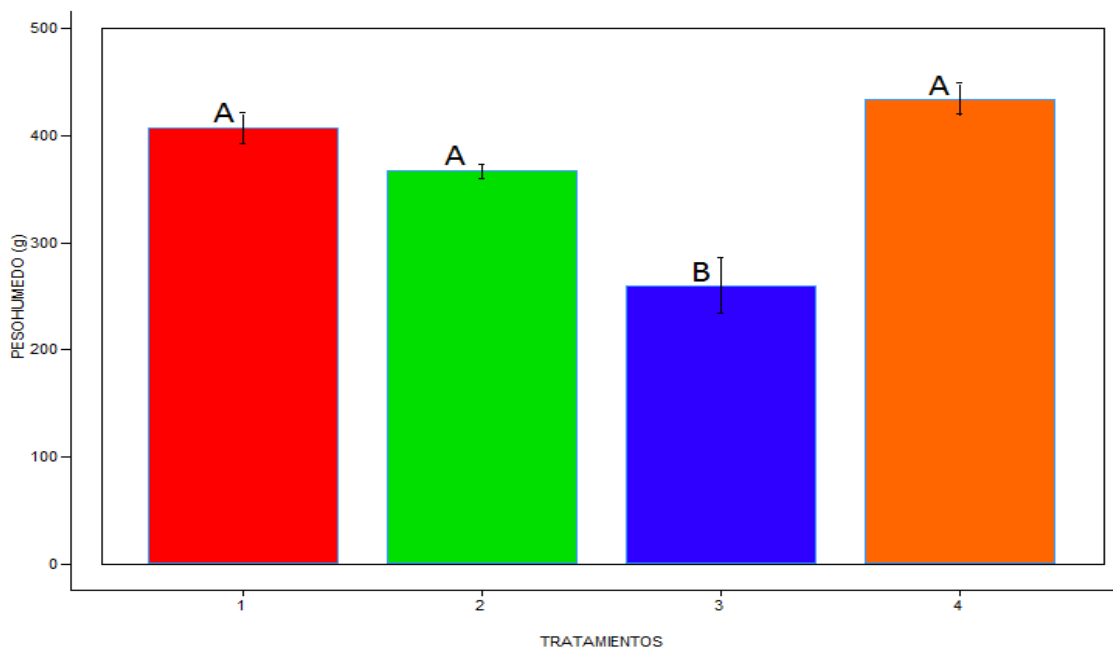
3.2 El cultivo de lechuga

En peso húmedo del cultivo (Grafica 3.2), existen diferencias significativas entre tratamientos ($P \leq 0.05$), entre el T4 (434.66g, semi-enterrado sin pantalla térmica), el T2 (367.33g, semi-enterrado con pantalla térmica) y el T1 (407.33g, a nivel del suelo con pantalla térmica), en comparación con el T3 (260.66g, a nivel del suelo sin pantalla térmica control). Gil *et al* (2011) reporta que los resultados obtenidos en producción pueden alcanzar incrementos hasta de entre un 13.6 a 15.7% debido al uso de pantallas térmicas. Iturry, (2002) reporta que en

los invernaderos semienterrados walipinis y panqar huyu que el incremento en rendimiento por ejemplo de lechuga es de 2 a 3 K/m² a 3.72 K/m² en el walipini y a 3.17 K/m² en el panqar huyu.



Grafica 3.1 Comparación de medias ($P \leq 0.05$), de las temperaturas mínimas en los tratamientos y la externa.



Grafica 3.2 Comparación de medias ($P \leq 0.05$), del peso húmedo en cada uno de los tratamientos.

4. CONCLUSIONES

En esta investigación, se concluye, que los invernaderos semi-enterrados y el uso de pantallas térmicas si influyen en las variables evaluadas, en donde su combinación puede ser una opción viable para ayudar a mantener más estable la temperatura al interior del invernadero, incrementando la biomasa de la planta. Por lo tanto la hipótesis planteada se acepta.

5. REFERENCIAS

Casierra-Posada, F., Álvarez, O. J., Luque, N. 2010. Calidad de los frutos en tomate (*Solanum lycopersicum* L.cv. Rocio) producidos bajo coberturas reflectiva y plástica. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Grupo de Investigación Ecofisiología Vegetal, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja (Colombia). Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas - Vol. 4 - No. 1 - pp. 67-80, 2010

FAO. 2012. Food and Agriculture Organization. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Departamento de Agricultura.

Gil, R., Luque, N. Y. and Bojacá, C. R. 2011. Effect of aluminized screens on greenhouse tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production systems at the high tropical conditions. Department of Basic Sciences, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Universidad de Bogota Jorge Tadeo Lozano. Bogota (Colombia). Agronomía Colombiana 29(3), 423-431, 2011.

Henao, F. 2001. Cómo obtener alta productividad en cultivos de invernadero.

IDAE. 2008. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos. Madrid España.

Iturry, L. 2002. Manual de construcción y manejo del walipini y panqar huyu. Benson Agriculture and Food Institute Brigham Young University. Utah, Estados Unidos 61pp.

Serrano, C. Z. 2005. Construcción de invernaderos. Tercera edición. Mundi-Prensa. Libros.