



Universitat de Lleida

UNIVERSITAT DE LLEIDA



ESTUDIO DE CONDICIONES  
TÉRMICAS Y LUMÍNICAS Y  
DETERMINACIÓN DE ALTERNATIVAS  
TECNOLÓGICAS PARA EL AHORRO DE  
ENERGÍA EN INVERNADEROS DE LA  
PATAGONIA NORTE – ARGENTINA



Tesis de doctorado  
Norma Iglesias

Junio 2005



Universitat de Lleida  
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària

*Estudio de condiciones térmicas y  
lumínicas y determinación de  
alternativas tecnológicas para el  
ahorro de energía en invernaderos de  
la Patagonia Norte – Argentina*

Presentada por  
**Norma Beatriz Iglesias**  
Para optar al grado de doctor

Directores:  
Dr. Juan Ignacio Montero  
Dr. Pere Muñoz

*a todos ustedes,  
los que sostienen mis alas*

*“...Yo no sé muchas cosas, es verdad  
Digo tan sólo lo que he visto.  
Y he visto:  
.....”*

*León Felipe (1884-1968)*

*“...Hurrah a los misioneros, afanados en cultivar la fina planta de Dios  
entre yaganes y anacalufes, ranqueles y picunches, puelches y tehuelches:  
piedras de un suelo sin substancia mística y de un cielo sin humus  
de plegarias!*

*¡Hurrah por el candor y fervor  
de su suerte y su muerte!*

*¡Hurrah a los colonos, tenaces en el ahínco de hacer sonreír la severidad  
telúrica de la Patagonia, transformando ovejas magras y espigas magras  
en florones suntuosos de plata y oro!*

*¡Hurrah por el candor y fervor  
de su suerte y su muerte!*

*....”*

*Juan Filloy (1894-2000)*

A J.I., Juan Ignacio Montero, mi director, amigo, soporte. Paciente hasta lo increíble. Quien me supo enseñar que toda distancia es superable.

A mi tutora, Ana Pelacho, quien supo ofrecerme tiempo y dedicación.

A Joan Costa con quien destripamos por primera vez algunos instrumentales que luego siguieron haciéndome sufrir sus secretos particulares.

A mis “maestros” de horticultura, Delio Calvar y Aeros Jenkins, y de la “plasticultura” en particular, Nicolás Castilla.

A Pere Muñoz por sus invaluable aportes y tiempo, sin los cuales no hubiese sido posible parte de esta tesis. A Assun, Assumpció Antón., por las sugerencias y la generosidad demostrada en tantas ocasiones.

A mis incondicionales compañeros de tareas, Angel “Tito” Muñoz, quien ha sido los termopares, las configuraciones, la lucha contra el clima durante estos años y Alejandro “Pirincho” San Martín, por sus soluciones prácticas que sirvieron para poner en tierra problemas teóricos.

A Dolores, quien supo entender mis tiempos. A Elvia, que me ha rescatado de las horas de lecturas. Y a quienes soportaron mi cotidianeidad desesperada, Mirta y Virginia.

A Damián, quién destrabó mi ordenador cada vez que llegué a saturarlo de tanto clima e invernaderos virtuales.

A Paulita Calvo, mezcla explosiva de tesis de marcadores moleculares matizada con conversaciones virtuales sobre literatura, música y arte moderno.

A Susana Di Masi, por las experiencias comunes a lo largo de nuestros tiempos compartidos en Lleida.

Al INTA y quienes facilitaron los medios para que este trabajo pudiese realizarse. A la Universidad de Lleida. Al IRTA Cabrils que posibilitó la realización de trabajos específicos de esta tesis.

A Ernesto Wolfschmidt, pionero de la actividad bajo cubierta en la Patagonia, por su colaboración sin interés y en reconocimiento de su espíritu de constante innovación. A quienes de distintas formas aportaron a la tecnología de la producción bajo cubierta del norte de la Patagonia: Claudio Capuj, Roberto Schutz y Carlos Jácono.

Al Rafa, por los correos delirantes que supieron dar marco a algunas ideas conceptuales que hacen al entorno de esta tesis.

A los míos, los de siempre, los de casa, Luis, mi esposo y mis hijos, Iván, Ariadna y Tomás, para quienes “tesis” fue, durante los últimos años se convirtió en la hermana menor.

A mis padres, in memoriam.

A mis poetas, los de aquí y los de allí. Estemos dónde estemos leyendo esta tesis.

A mis tierras patrias, España, Italia y Argentina, que de todas ellas provengo, tanto sea por herencia como por casualidad.

Fundamentalmente a la Patagonia, su gente, su historia y lo que devenga.

Los trabajos de esta tesis doctoral han sido realizados en su mayoría en el la Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), ubicada en la provincia de Río Negro, al norte de la Patagonia, Argentina.

Algunas experiencias se realizaron en estructuras de invernaderos de productores en el área geográfica de desarrollo de la tesis.

El capítulo 6 se ha desarrollado en el Departamento de Tecnología Hortícola del Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA), en Cabrils, Barcelona.

## **Resumen**

Esta tesis tiene como objetivo principal documentar las condiciones ambientales durante el invierno, analizar las pérdidas de calor nocturna, la transmisión de luz diurna y evaluar métodos de reducción de las pérdidas de calor de los invernaderos del norte de la Patagonia. La misma consta de 7 capítulos en los cuales se plantean objetivos específicos, revisión bibliográfica referida al tema, materiales y metodología empleada para realizar las experiencias para cumplir con los objetivos planteados, discusión de resultados y conclusiones parciales de los temas. Al final de la tesis se presentan dichas conclusiones parciales en conclusiones finales que interrelacionan las mismas y permiten dar unidad a los distintos temas.

El capítulo 1 contiene información sobre las características geográficas y de la producción bajo cubierta en el norte de la Patagonia y se describen las principales estructuras de los invernaderos desarrollados en la región. En el capítulo 2 se documenta, analiza y describen las variables climáticas registradas durante la temporada de cultivo, de un invernadero característico del norte de la Patagonia, realizándose consideraciones de mejoras para permitir condiciones que permitan aumentar la productividad y calidad de la producción. En el capítulo 3 se analizan las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales y tipos de cubierta utilizados en los invernaderos de la región en lo que respecta a transmisión de luz considerando cubierta sencilla y doble y pérdidas de calor durante la noche.

En el capítulo 4 se presenta la evaluación de la transmisión de radiación fotosintéticamente activa en invernaderos multicapilla con techo a dos aguas y multicapilla con techo semiparabólico, estructuras típicas del norte patagónico, discutiéndose la transmitancia y la distribución de la luz dentro de las distintas estructuras. En el capítulo 5 se presenta el análisis de las pérdidas de calor nocturnas en noches sin calefacción, evaluándose también la eficacia del suelo con acolchado plástico como alternativa de aporte de calor de suelo frente a suelo desnudo y finalmente se presenta el cálculo de las necesidades de calefacción de un invernadero triple capilla del norte de la Patagonia. En el capítulo 6 se simulan alternativas de disminución de pérdidas de calor nocturno empleando el programa Mecánica de Fluidos Computacional (CFD). La tesis se cierra con el capítulo 7 que recoge las conclusiones principales de este trabajo.



## Resum

Aquesta tesi té com a objectiu principal documentar les condicions ambientals durant l'hivern, analitzar les pèrdues de calor nocturnes, la transmissió de llum diürna i avaluar els mètodes de reducció de les pèrdues de calor dels hivernacles del nord de la Patagònia. La tesi consta de 7 capítols en els quals es plantegen els objectius específics, la revisió bibliogràfica referida al tema, els materials i la metodologia emprada per a realitzar les experiències per a complir amb els objectius plantejats, la discussió de resultats i les conclusions parcials dels temes. Al final de la tesi es presenten dites conclusions parcials en conclusions finals que les interrelacionen i permeten donar unitat als diferents temes.

El capítol 1 conté informació sobre las característiques geogràfiques i la producció sota coberta al nord de la Patagònia i s'hi descriuen les principals estructures dels hivernacles desenvolupats a la regió. En el capítol 2 es documenta, analitza i descriuen les variables climàtiques registrades durant la temporada de cultiu d'un hivernacle característic del nord de la Patagònia, realitzant-ne consideracions de millores per a permetre condicions que ajudin a augmentar la productivitat i qualitat de la producció. En el capítol 3 s'analitzen les propietats lumíniques i tèrmiques dels materials i els tipus de coberta utilitzats en els hivernacles de la regió, respecte a la transmissió de llum considerant coberta senzilla i doble, i les pèrdues de calor durant la nit. En el capítol 4 es presenta l'avaluació de la transmissió de radiació fotosintèticament activa en hivernacles multicapella amb sostre a dues aigües i multicapella amb sostre semiparabòlic, estructures típiques del nord patagònic, discutint-ne la transmitància i la distribució de la llum dins de les diferents estructures. En el capítol 5 es presenta l'anàlisi de les pèrdues de calor nocturnes en nits sense calefacció, avaluant-hi també l'eficàcia del sòl amb encoixinat plàstic com a alternativa d'aportació de calor de sòl respecte a sòl nu, i finalment s'hi presenta el càlcul de las necessitades de calefacció d'un hivernacle triple capella del nord de la Patagònia. En el capítol 6 se simulen alternatives de disminució de pèrdues de calor nocturnes mitjançant el programa Mecànica de Fluids Computacional (CFD). La tesis conclou amb el capítol 7 que recull las conclusions principals d'aquesta tesi.

## Summary

This thesis is focussed on the study of relevant physical aspects of greenhouses located in Northern Patagonia. Its main objectives are the examination of the environmental conditions during the winter, the analysis of nocturnal heat losses, the determination of greenhouse light transmission and the evaluation of methods for reducing energy losses. The thesis is formed by an introductory chapter plus 7 chapters in which the specific objectives of the study are defined, the scientific literature related to the subject is reviewed, materials and methods for achieving the specific goals are explained and results for each studied subject are presented and discussed.

Chapter 1 contains information on the geographical characteristics of Northern Patagonia. The main greenhouse structures existing in the area and the greenhouse production sector are described as well. Chapter 2 describes and analyses the climatic variables registered during the growing season in a greenhouse considered as characteristic of the area. Some considerations addressed to the improvement of production and quality are mentioned and discussed. Chapter 3 is about the optical properties of cladding materials used in the area, regarding their light transmission and thermal radiation transmission. Comparisons of light transmission and heat losses for single and double layer claddings are made. Chapter 4 presents the evaluation of Photoactive Radiation (PAR) transmission in multi span greenhouses with flat-sloped roof and arched roof. The overall transmission and light distribution of different structures are discussed. Chapter 5 presents the analysis of nighttime heat losses in unheated greenhouses. Emphasis has been given to the effect of mulching on the nighttime temperature regime as compared to the greenhouse with bare soil. Finally chapter 6 includes an estimation of the heating requirement of a Patagonian greenhouse with double cladding. Chapter 6 analyses different options for the reduction of heat losses at night. For this purpose a number of simulations with Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques have been run. Finally, Chapter 7 attempts to unify the partial conclusions from previous chapters by linking them and developing general conclusions for the improvement of Northern Patagonian greenhouses.

## INDICE

<i>Introducción General</i> .....	2
1- De la Patagonia antigua a la Patagonia actual .....	3
2- Características geográficas y productivas de la Patagonia .....	5
3- Relación entre el microclima dentro de los invernaderos y los cultivos ..	8
4- Objetivos generales de la tesis .....	12
5- Esquema de desarrollo de la tesis .....	12
6- Bibliografía .....	13
Capítulo 1: Descripción de las características geográficas y de la producción bajo cubierta en el norte de la Patagonia .....	19
1.1. Introducción .....	20
1.2. Objetivo .....	21
1.3. Descripción de la Región Patagónica .....	21
1.3.1. <i>Patagonia Andina</i> .....	21
1.3.2. <i>Patagonia Extraandina</i> .....	22
1.4. Características de las actividades agrícolas de la Patagonia .....	26
1.4.1. <i>Los cultivos hortícolas de la Patagonia Norte</i> .....	27
1.4.2. <i>La producción bajo cubierta en el norte de la Patagonia</i> .....	28
1.4.3. <i>Tipos de invernaderos de la región</i> .....	29
Ventajas .....	30
Desventajas .....	30
Combinada .....	31
1.5. Conclusiones .....	34
1.6. Bibliografía .....	34
Capítulo 2: <i>Caracterización del clima de los invernaderos de la Patagonia Norte</i> .....	45
2.1. Introducción .....	46
2.2. Objetivo .....	46
2.3. Antecedentes .....	47
2.3.1. Relación cultivo-condiciones microclimáticas .....	47
2.3.2. <i>Radiación</i> .....	49
2.3.3. <i>Requerimientos térmicos para los principales cultivos hortícolas</i> .....	49
2.4. Materiales y métodos .....	51
2.4.1. <i>Instrumental empleado</i> .....	52
2.5. Resultados y discusión .....	53
2.5.1. <i>Radiación</i> .....	53
2.5.2. <i>Temperatura del aire</i> .....	55
2.5.3. <i>Temperatura del aire día-noche</i> .....	57
2.5.4. <i>Diferencia térmica del aire entre el interior y el exterior del invernadero</i> .....	60
2.5.6. <i>Temperatura de las cubiertas</i> .....	62
2.5.7. <i>Temperatura suelo</i> .....	63

2.5.8. Humedad Relativa .....	66
2.6. Conclusiones.....	68
2.7. Bibliografía.....	69
<i>Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.</i> .....	70
3.1. Introducción .....	72
3.2. Objetivo .....	76
3.3. Materiales y métodos.....	76
3.3.1. Instalaciones y equipamiento de medición. ....	76
3.3.2. Metodología empleada.....	79
3.4. Resultados y discusión.....	85
3.4.1. Transmisión de radiación solar.....	85
3.4.2. Infrarrojo largo .....	91
3.5. Conclusiones.....	93
3.6. Bibliografía.....	93
<i>Capítulo 4: Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.</i> .....	89
4.1. Introducción .....	90
4.2. Objetivo .....	94
4.3. Materiales y métodos.....	95
4.3.1. Instrumental y metodología de registros de datos.....	95
<i>Tabla 4.1. Datos de fábrica de los materiales de las cubiertas</i> .....	95
4.3.2. Descripción de los invernaderos.....	97
4.4. Resultados y discusión.....	100
4.4.1. Invernaderos con techo simple.....	100
4.4.2. Invernadero multi capilla con techo doble. ....	102
4.4.3. Transmitancia entre distintos invernaderos .....	103
4.5. Conclusiones.....	106
4.6. Bibliografía.....	106
<i>Capítulo 5: Análisis de las pérdidas calor, aportes de calor del suelo y necesidades de calefacción en un invernadero triple capilla</i> .....	110
5.1. Introducción .....	111
5.2. Objetivo .....	111
5.3. Antecedentes .....	112
5.3.1. Fundamentos teóricos.....	112
5.3.2. Modelos del clima del invernadero. ....	115
5.3.3. Balance de Energía.....	116
5.4. Materiales y métodos.....	123
5.4.1. Invernadero e instrumental de medición.....	123
5.4.2. Modelo simplificado de los flujos de calor en el invernadero. ....	124
5.4.3. Aportes de calor del suelo en invernadero sin calefacción.....	125
5.4.4. Cálculo del aporte de calor por calefacción y del coeficiente global de pérdida de calor.....	126
5.5. Resultados y discusión.....	126
5.5.1. Pérdidas de calor en el invernadero sin calefacción. ....	126
5.5.2. Aporte de calor del suelo durante la noche en invernadero sin calefacción. ....	131

5.5.3. Cálculo de pérdida de calor en el invernadero con calefacción y coeficiente $U$ .....	136
5.5. Conclusiones.....	137
5.6. Bibliografía.....	138
<i>Capítulo 6: Modelo del clima del invernadero patagónico basado en la Mecánica de Fluidos computacional (CFD)</i> .....	133
6.1 Introducción. ....	134
6.1.1 Principios de CFD. ....	134
6.1.2 Aplicaciones a los invernaderos.....	135
6.2 Objetivos. ....	139
6.3 Materiales y métodos.....	139
6.4 Resultados. ....	143
6.4.1 Invernadero de cubierta doble de polietileno.....	143
6.4.2. Invernadero de cubierta sencilla de PE.....	146
6.4.3. Invernadero de cubierta sencilla de PE y pantalla térmica de PE. ....	147
6.4.4. Invernadero de cubierta sencilla de PE y pantalla térmica de aluminio.....	148
6.6. Conclusiones.....	150
6.7. Bibliografía.....	151

## Tabla de Referencias

Latin	
A	Superficie (m <sup>2</sup> )
A <sub>c</sub>	Superficie de la cubierta del invernadero (m <sup>2</sup> )
A <sub>s</sub>	Superficie del suelo del invernadero (m <sup>2</sup> )
C <sub>p</sub>	Calor específico del aire seco (Jul*Kg <sup>-1</sup> )
C <sub>v</sub>	Poder calorífico del combustible (kJ*l <sup>-1</sup> )
D <sub>H</sub>	Difusividad térmica
d	Espesor (m)
E	Cantidad de energía emitida
E <sub>ce</sub>	Emisividad de la cara externa de la cubierta
E <sub>ci</sub>	Emisividad de la cara interna de la cubierta
E <sub>p</sub>	Cantidad de energía emitida por las plantas
F	Cantidad de combustible requerido
h	Coefficiente convectivo de transmisión de calor (W*m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
HR	Humedad relativa (%)
HRi	Humedad relativa interna (%)
HR <sub>e</sub>	Humedad relativa externa (%)
K	Conductividad del material (W*m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
L <sub>ce</sub>	Radiación de la cara externa de la cubierta (W*m <sup>-2</sup> )
L <sub>ci</sub>	Radiación de la cara interna de la cubierta (W*m <sup>-2</sup> )
L <sub>cielo</sub>	Radiación emitida por la bóveda celeste (W*m <sup>-2</sup> )
L <sub>suelo</sub>	Radiación emitida por el suelo (W*m <sup>-2</sup> )
L <sub>trans</sub>	Radiación emitida por el cultivo o suelo que traspasa la cubierta (W*m <sup>-2</sup> )
N	Tasa de infiltración del invernadero (m <sup>3</sup> de aire intercambiado por hora por m <sup>3</sup> de volumen de invernadero)
PAR	Radiación fotosintéticamente activa (μmol*s <sup>-1</sup> )
Q	Calor total (W)
Q <sub>c</sub>	Cantidad de calor transmitida por convección (W*m <sup>-2</sup> )
Q <sub>ce</sub>	Pérdidas de energía de la cubierta exterior (W*m <sup>-2</sup> )
Q <sub>cal</sub>	Calor aportado por el sistema de calefacción (W*m <sup>-2</sup> de suelo)
Q <sub>ci</sub>	Transferencia de energía por convección entre cara interna de cubierta y aire del invernadero (W*m <sup>-2</sup> cubierta)
Q <sub>cond</sub>	Pérdidas de calor por conducción a través de la cubierta (W*m <sup>-2</sup> )
Q <sub>ext</sub>	Balance de energía de la cara externa de la cubierta (W*m <sup>-2</sup> )
Q <sub>f</sub>	Intercambio de energía por infiltración de aire (W*m <sup>-2</sup> cubierta)
Q <sub>f,s</sub>	Intercambio de energía sensible (W*m <sup>-2</sup> )
Q <sub>f,l</sub>	Intercambio de energía latente (W*m <sup>-2</sup> )
Q <sub>lt</sub>	Pérdidas por calor latente o sensible (W*m <sup>-2</sup> )
Q <sub>int</sub>	Balance de energía de la cara interna de la cubierta (W*m <sup>-2</sup> )
Q <sub>rad</sub>	Pérdidas de calor por radiación (W*m <sup>-2</sup> )
Q <sub>s</sub>	Intercambio de calor entre el aire y el suelo (W*m <sup>-2</sup> de suelo)
Q <sub>scm</sub>	Intercambio de calor entre aire y suelo con cubierta plástica (W*m <sup>-2</sup> )
Q <sub>ssm</sub>	Intercambio de calor entre aire y suelo desnudo (W*m <sup>-2</sup> )
R <sub>n</sub>	Radiación neta (W*m <sup>-2</sup> )
R <sub>ni</sub>	Radiación neta interna (W*m <sup>-2</sup> )
R <sub>ne</sub>	Radiación neta externa (W*m <sup>-2</sup> )
RT	Radiación global, radiación solar o radiación total (W*m <sup>-2</sup> )
RTi	Radiación Global o Total interna (W*m <sup>-2</sup> )

$RT_e$	Radiación Global o Total externa ( $W \cdot m^{-2}$ )
$S_\phi$	Término fuente
$T$	Temperatura ( $^{\circ}C$ )
$T_a$	Temperatura del aire ( $^{\circ}C$ )
$T_{ai}$	Temperatura del aire interno ( $^{\circ}C$ )
$T_e$	Temperatura externa ( $^{\circ}C$ )
$T_i$	Temperatura interna ( $^{\circ}C$ )
$T_{suelo}$	Temperatura del suelo ( $^{\circ}C$ )
$T_{ce}$	Temperatura de la cubierta externa (techo externo) ( $^{\circ}C$ )
$T_{ci}$	Temperatura de la cubierta interna (techo interno) ( $^{\circ}C$ )
$T_{en}$	Temperatura cara norte ( $^{\circ}C$ )
$T_{cs}$	Temperatura cara sur ( $^{\circ}C$ )
$T_c$	Temperatura del cielo ( $^{\circ}K$ )
$T_p$	Temperatura de las plantas ( $^{\circ}K$ )
$T_w - T_f$	Diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido ( $^{\circ}K$ )
$U$	Coefficiente global de transmisión de calor ( $W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$ )
$V$	Volumen del invernadero ( $m^3$ )
$v$	Velocidad del viento
$\vec{v}$	Vector velocidad
$W_s$	Humedad absoluta en la superficie ( $Kg \cdot Kg^{-1}$ )
$W_w$	Humedad absoluta en el aire del invernadero ( $Kg \cdot Kg^{-1}$ )
<b>Griego</b>	
$\alpha$	Absorbancia de radiación
$\alpha_e$	Coefficiente de absorción de radiación térmica cara exterior de la cubierta
$\Delta H$	Calor latente de vaporización ( $Jul \cdot Kg^{-1}$ )
$\Delta q$	Diferencia de humedad absoluta entre el aire del invernadero y el exterior ( $g_{vapor \text{ de agua}} \cdot Kg^{-1}_{aire}$ ).
$\Delta T$	Diferencia térmica ( $^{\circ}C$ )
$\rho$	densidad del aire ( $kg \cdot m^{-3}$ )
$\epsilon$	Emitancia del cuerpo adimensional
$\epsilon_{ci}$	Emitancia del cielo
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman ( $5.67 \cdot 10^{-8}$ ) ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ )
$\tau_r$	Transmitancia
$\tau_{tmc}$	Transmitancia de la cubierta a la radiación térmica
$\tau_r$	Transmitancia
$\phi$	Latitud ( $^{\circ}$ )
$\delta$	Declinación ( $^{\circ}$ )
$\beta$	Pendiente ( $^{\circ}$ )
$\gamma$	Angulo de la superficie del azimuth ( $^{\circ}$ )
$\gamma_s$	Angulo acimutal del sol ( $^{\circ}$ )
$W$	Angulo horario ( $^{\circ}$ )
$\Gamma_\phi$	coeficiente de difusión
$\theta$	Angulo de incidencia ( $^{\circ}$ )
$\Phi$	Densidad
$\eta_{co}$	factor de forma
$\psi_j$	Ángulo de las diferentes caras del techo ( $^{\circ}$ )
$\eta$	Rendimiento de la calefacción

---

---

*Introducción General*

---

---



*La ciencia, adecuadamente modificada, es un instrumento indispensable, pero además es un fin en sí misma; es la manera de satisfacer la necesidad vital de comprender el mundo. (O. Varsavsky 1972)*

## **1- De la Patagonia antigua a la Patagonia actual**

Entender el desarrollo tecnológico de la Patagonia es imposible sin considerar la historia de su gente y su sociedad. América en general se caracteriza por la historia de sus pueblos en un hecho muy concreto, antes y después de la llegada de Colón. Este suceso pasó inadvertido para un territorio tan extenso, tan distante y tan despoblado como es la Patagonia. Sin embargo distintas miradas han sido puestas sobre estas latitudes. También las miradas siguen puestas hacia un futuro que, para la cultura occidental, siempre parece demasiado lejos.

La historia dice que, a comienzo del siglo XVI se suponía que las Indias a las que había arribado Colón eran el extremo oriente de Asia, siendo Américo Vespucio, en 1502, quien anunció que estas tierras no pertenecían al Asia sino que se trataba de un "nuevo mundo". Sin embargo existen evidencias cartográficas que muestran que en épocas anteriores a la llegada de Colón a costas americanas, no solamente otros navegantes habían llegado a América sino que se disponía de información bastante certera de las costas de la actual Patagonia. Entre ellos se puede citar al árabe Al-Juarizmi, quien en su mapa universal ya describía el estrecho y Tierra del Fuego, en el año 833. Según estudios realizados sobre el Estrecho de Magallanes en Al-Juarizmi y en el Martellus, puede deducirse que se conocía mejor la Tierra de Fuego en Bagdad en 833 que en Florencia en 1489 (Museo del Fin del Mundo, 2004)

El 31 de Marzo de 1520, Vespucio llegó a una bahía a la cual llamó San Julián, debiendo esperar dos meses para conocer por primera vez a los habitantes originarios, los cuales llamaron poderosamente la atención a los españoles por su altura y por el tamaño de las huellas dejadas (Reclus 1906). A mediados de octubre y arrastrados por un fuerte temporal hacia el sur llegan a una saliente a la que nombran Cabo de las Once mil Vírgenes, para luego descubrir el estrecho, un aliciente en tierras tan inhóspitas y deshabitadas en las cuales lo único que veían durante las noches eran fuegos de los nativos, por lo que llamaron a esta nuevo lugar "tierra de los fuegos".

En la primera mitad del siglo XVI distintas expediciones españolas recorren las costas logrando en 1534 adentrarse en el territorio en busca de las montañas de oro en la que se basaban los sueños de la conquista. En el año 1577 irrumpe en escena Francis Drake quien fustiga a flotas españolas y portuguesas en forma encubierta de pirata, pero con fines de recaudar dinero que iría a las arcas de la reina de Inglaterra. Con esta incursión de Drake paga sus deudas y fundan la Compañía de Indias Orientales.

Los tesoros obtenidos por Drake hicieron que los españoles decidieran proteger más el estrecho, enviando a Sarmiento de Gamboa, quien funda el villorio Nombre de Jesús, luego Port Disere, Puerto Deseado, al sur de la Patagonia continental. El real motivo de fundar estos asentamientos era tener apostaderos para poder navegar hacia el Pacífico para los tesoros provenientes del Perú.

En 1605 parte de Buenos Aires una expedición comandada por Hernandarias buscando la ciudad de los Césares llegando hasta Neuquén. Durante la segunda mitad del siglo XVII son los misioneros quienes llegan a la cordillera, Mascardi, Van den Meeren y Guillermo, siendo este último quien plantó los manzanos que hicieron conocida la región como País de las Manzanas.

Hacia fines del siglo XVII y durante el siglo XVIII, las tierras patagónicas son recorridas por contrabandistas, corsarios y aventureros de distintas nacionalidades. En 1774 en Inglaterra el médico jesuita Falkner, quien habían recorrido la Patagonia, publica "Descripción de la Patagonia y lugares adyacentes de Sur América" en donde explicita: "...if any nation should think proper to people this country, it might be the cause of perpetual alarm to the Spaniards..." advirtiendo ya entonces sobre el desamparo de estas tierras, aún desiertas de hombre blanco. España reacciona ordenando distintas expediciones y ordenando la formación de asentamientos estables (Extraigas, 1960), fundándose de esta manera la la Colonia de Nuestra Señora del Carmen (Patagones) en 1779, en cercanías de la desembocadura del río Negro con el océano Atlántico, al norte de la Patagonia.

Aún a principios del siglo XX el territorio patagónico estaba pobremente poblado, Reclus (1906), cita que junto a los ríos Limay y Neuquén no se encuentran más que puestos de origen militar, dificultándose la creación de colonias debido a la falta de lluvia. El mismo autor menciona al "pueblecillo de Roca", ubicado en una llanura aluvial, muy fecunda cuando recibe suficiente humedad pero frecuentemente seca en verano. En la actualidad, Gral. Roca es una de las ciudades que conforman el eje urbano de la economía del Alto Valle del Río Negro.

En 1880, el antropólogo Florentino Ameghino, define a la Patagonia como "esa inmensa porción del territorio argentino que se extiende al sur del río Colorado hasta el estrecho de Magallanes... (siendo) una comarca de las más ricas en objetos antropológicos de todas las épocas" y continúa diciendo " es cierto que casi en su totalidad ese territorio se halla aún ocupado por tribus de indios salvajes..."

Recién entre 1880 y 1914 se completa el país en provincias y territorios, en 1878 a partir de la sanción de la Ley 954 se reconoce jurídicamente al territorio patagónico como "Gobernación de la Patagonia". Seis años después, el 16 de Octubre de 1884 se sanciona la Ley de Territorios Nacionales (ley 1532) y así surgen los territorios patagónicos con nombres propios: Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego. El actual territorio de la República Argentina, queda completado en 1991 con la provincialización de Tierra del Fuego lo que habla de la juventud político-institucional del territorio.

Los indicios arqueológicos indican que la Patagonia estaría poblada por lo menos desde fines del Pleistoceno o época glacial, con un máximo de tiempo datado en los 12.500 años. Los primitivos habitantes fueron los Tehuelches, quienes eran nómades y basaban su economía en la recolección de frutos y en la caza de guanacos y ñandúes. A fines del siglo XVIII, los hábitos de vida de estos aborígenes se vieron alterados por la llegada desde Chile de los araucanos, indios belicosos que huían de los colonizadores hispánicos. Los araucanos invadieron los dominios de los tehuelches, y luego de enfrentamientos por más de un siglo los tehuelches se sometieron a los araucanos, después de ser casi aniquilados en batallas muy cruentas. Los sobrevivientes, en su mayoría mujeres y niños acabaron por mezclarse con el pueblo invasor

Los hombres blancos introdujeron el ganado vacuno y el caballo. Esto provocó cambios en su cultura. Comenzaron a consumir la carne de estos animales, aprendieron a montar y manejar con habilidad al caballo. El desplazamiento por el territorio se hizo con mayor facilidad y les permitió avanzar más hacia el norte. La piel de caballo y las plumas de avestruces eran, también, objeto de trueque.

## **2- Características geográficas y productivas de la Patagonia**

La Patagonia es un extenso territorio que ocupa el tercio inferior del territorio de la República Argentina, caracterizándose por la diversidad de su geografía, la importancia de sus recursos naturales y su significativa baja densidad poblacional, 2.27 habitantes\*km<sup>-2</sup>, que disminuye considerablemente en áreas rurales a 0.1 habitante por km<sup>2</sup> (INDEC 2001). Aunque la población nativa de la región data de miles de años antes de Cristo, el desarrollo de centros urbanos, provenientes de corrientes inmigratorias europeas, recién se produjo a fines del siglo XIX. A principios del siglo XX era común observar una gran actividad comercial entre nativos e inmigrantes intercambiando mercancías. En la actualidad, la mitad de esa población se encuentra concentrada en distintos centros urbanos ubicados a lo largo de distintos valles en las márgenes de los ríos Limay, Neuquén, Río Negro y Río Colorado, en el norte de la Patagonia (entre 36 y 40° de latitud sur).

Este espacioso territorio, apenas poblado, es una importante fuente de riquezas naturales aportando el 85% del petróleo del país, el 88% del gas, aproximadamente el 57% de la energía hidroeléctrica y el 100% del carbón, sin mencionar la producción de aluminio. También es rica en producción pesquera y actividades agropecuarias destinadas a la exportación además de ser uno de los territorios considerados como reservorio de agua dulce del planeta.

La incorporación de la Patagonia a la economía nacional fue tardía, en forma de precarias economías regionales de algún modo cerradas. Los cultivos y la ganadería comenzaron a prosperar a fines del siglo XIX, luego afianzada la conquista del desierto, es decir, las campañas militares contra los nativos. Durante siglo XX fue el auge de la economía basada en la explotación de los recursos naturales, principalmente petróleo, gas, minería y recursos hidroeléctricos. También la llegada del ferrocarril, a fines del Siglo XIX, significó el desarrollo de la actividad agrícola de los valles con destino a la exportación. Es así como la población se empieza a concentrar en torno a dichas actividades.

El clima de la Patagonia se caracteriza por ser árido frío, con vientos fuertes provenientes del Oeste distinguiéndose claramente entre sí las cuatro estaciones. El norte de la Patagonia (39°S), área de desarrollo de las actividades del presente trabajo, muestra amplitudes térmicas anuales entre 10° y 17 °C, con temperaturas medias en el invierno es de -2°C, superando los 40°C en el verano en la zona de mesetas continentales.

La vegetación natural de la Patagonia es esteparia debido a la escasez de agua, desarrollándose distintas actividades económicas, según las características geográficas. La desertización, por manejo no sustentable de los recursos, y el despoblamiento durante la década del 90 debido a la falta de rentabilidad (FAO 2003) es uno de los problemas que se deben resolver en los próximos años desarrollando alternativas productivas. Las principales zonas de producción fruti-hortícola se ubican en los valles de regadío de los ríos del norte de la Patagonia, especialmente los ríos Neuquén, Limay y Negro en territorio de las provincias de Río Negro y Neuquén, zona conocida como Patagonia Norte.

La superficie apta para cultivos bajo regadío, entre ambas provincias, suma más de 139.000 hectáreas de las cuales se cultivan aproximadamente 59.000 hectáreas, es decir el 42.4% de la superficie. La economía de estos valles irrigados se basa principalmente en la producción de peras y manzanas, comprendiendo la actividad hortícola el 15.5% de la superficie de cultivos bajo regadío (INTA-GTZ 1999).

La limitante mayor para los cultivos hortícolas es el clima ya que el período libre de heladas desde abril hasta octubre (otoño a primavera), esto se

traduce en un déficit del abastecimiento local del 70-75% del volumen consumido (Iglesias y Frattini, 1995). La horticultura regional, según datos de encuestas y censos (Censar 1993, Censo Frutihortícola 1994, Iglesias 1998) abarca una superficie de entre 7.000 a 9.000 hectáreas de cultivos hortícolas anuales visualizándose un incremento del valor bruto de la producción durante la última década producto de varios factores que favorecen el consumo de productos regionales.

Existen proyectos oficiales de promoción de actividades agropecuarias, en lo que respecta particularmente a la horticultura, para el caso de la provincia de Neuquén, dado que el 90% de las hortalizas consumidas en el lugar provienen de otras regiones del país, incorporándose 10 ha por año, existe un programa oficial de incorporar 50 ha por año, achicando la importación, facilitando la comercialización y ampliando el calendario de oferta (De Lorenzo, 2001)

Las grandes distancias a los principales centros productivos, sumado a las condiciones climáticas adversas, se traducen en desabastecimiento de productos frutihortícolas durante los meses de temperaturas más bajas. Esto conlleva a adaptación y desarrollo de tecnologías locales para abastecer una demanda creciente, tanto de la población estable como de la industria de turismo que ha empezado a desarrollarse en los últimos años. La producción bajo cubierta, que permite ampliar el período de cultivo, es una tecnología relativamente nueva en la región y requiere de tecnología adaptada que permita disminuir los costos de producción para permitir productos competitivos.

Aunque a nivel nacional no existen estadísticas oficiales sobre la superficie de cultivos bajo cubierta, Carluccio y col. (2002) estiman que la superficie total oscila entre 3.000 y 3.500 ha ubicadas principalmente en la región Nor-Oeste, Nor-Este y cinturones verdes de Buenos Aires y Santa Fe. La política económica nacional de la década de los '90 afectó las actividades agropecuarias relacionadas con la exportación, viéndose favorecidas las actividades que permitieran un rápido retorno de capital al sector productivo (Iglesias y col., 2001; Alvarez y col., 1997), aumentó la superficie de producción de hortalizas bajo cubierta, tanto a nivel regional como nacional.

El tamaño de las explotaciones bajo cubierta en el Alto Valle del Río Negro, fue aumentando desde pequeños módulos de 650-1000m<sup>2</sup> a superficies medias de 1000-1500 m<sup>2</sup> (Schaljo, 1992; Ayala y col., 1995; Iglesias y col., 2001) incorporándose tecnología adaptada a las condiciones climáticas locales. Los modelos de invernaderos regionales (Ayala y col., 1995; Iglesias y Frattini, 1996, Iglesias y col., 2001; Iglesias, 2002) fueron adaptados a partir de estructuras desarrolladas principalmente en la región del Mediterráneo (FAO 2002) y del norte argentino (Carluccio y col., 2002), incorporando sistemas de calefacción para los meses más fríos.

La producción bajo cubierta, en el norte de la Patagonia, se centra fundamentalmente en la oferta de tomate como primicia en el mercado regional, esto significa un ciclo principal de cultivo entre agosto y enero (primavera-verano). Durante el resto de los meses se suele cultivar especies de menor demanda de temperatura, como por ejemplo apio, acelga, espinaca y lechuga (Iglesias y Frattini, 1996). La necesidad de calefaccionar para lograr las temperaturas óptimas para los cultivos obligan a buscar formas de reducir el uso del combustible empleado para la calefacción de los meses fríos.

### *3- Relación entre el microclima dentro de los invernaderos y los cultivos*

Cuando la temperatura ambiental se encuentra fuera de los rangos óptimos para estos procesos la actividad enzimática se ve comprometida afectando dichos procesos (Brugginik y Heuvelink, 1987; de Koning, 1988, 1989, 2000; Grange y Andrews, 1993, 1995; Pearce y col., 1993; Schoch y col., 1990, Yao y col., 2000). Cada especie, inclusive cada cultivar, presentan requerimientos específicos para crecimiento y desarrollo normal. Los procesos alcanzan su velocidad óptima dentro de determinados rangos denominado rango de temperatura óptima.

Las características de las estructuras y las cubiertas de los invernaderos deben permitir el adecuado manejo de la transmisión de luz (Hwa-sung Cheng 1977; Brugginik y Heuvelink, 1987; Cockshull, 1988; Cockshull y col., 1992; Castilla y col., 1988, 1990; Castilla, 1998, Jones y col., 1999; Yao y col., 2000) y regulación de la temperatura (Urban 1997, Montero y Antón, 1993) ya que ambos factores influyen sobre el desarrollo y la productividad de los cultivos. El crecimiento, y desarrollo de los frutos de tomate se relaciona tanto con los niveles de luz recibida como con las temperaturas medias durante el día y la noche (Brugginik y Heuvelink, 1987; de Koning, 1989; Francesgangel, 1994; Urban, 1997; Schoch y col., 1990; Araki y col., 2000; Pilatti y Buyatti, 2002). Por otro lado, tanto la tasa de crecimiento de los frutos está condicionada por las variaciones de la temperatura (Grange y Andrews, 1995; de Koning 2000), como el tamaño final del fruto se relaciona con la temperatura Grange y Andrews. (1993). Estos efectos son similares a los observados en frutos de pimiento (Yao y col., 2000)

La composición química de los materiales de cubierta para invernaderos es muy variada, y por tanto las propiedades de dichos materiales son variadas también. La radiación fotosintéticamente activa (PAR), que implica la radiación comprendida en el rango 400-700nm, es un recurso necesario a ser considerado en aplicaciones relacionadas con la fisiología vegetal, producción de biomasa e iluminación natural de los invernaderos

(Heuvelink y col., 1995). Es importante determinar la capacidad de transmitir radiación solar, fundamentalmente PAR, que presentan los materiales de cubierta (Pearson y col., 1995; Alados y col., 1996)

El tiempo de exposición de la cubierta a las condiciones del medio ambiente, disminuye la luz transmitida a través de la cubierta (Nijskens y col., 1990; Papadakis y col., 2000; Orden y col., 2000). Los distintos materiales tanto como la procedencia de los mismos (Wang y col., 1999; Golberg y col., 1996; Zhang y col., 1996), pueden dar respuestas diferentes en el porcentaje de luz transmitida. La inclinación del techo, la época del cultivo y la orientación del techo determinan distintos determina distintos ángulos de incidencia del rayo solar que se deben considerar en el momento de comparar propiedades de transmisión de luz (Bot, 1983; Critten, 1984; Nijskens y col., 1985; Pearson y col., 1995; Guertal y Elkins, 1996; Golberg y col. 1996; Zhang y col, 2000; Stoffers, 1998; von Zabeltitz, 1998; Geoola y col., 2000).

Las cubiertas plásticas utilizadas en los invernaderos presentan distinta capacidad de retener la radiación infrarroja larga. Las pérdidas por radiación del invernadero dependen de las propiedades de emisividad y transmisividad del material de cubierta en las longitudes de onda de la radiación térmica entre 2.5 y 40  $\mu\text{m}$  (Muñoz y col., 1998). La transmisión de la radiación térmica es un importante mecanismo responsable de las pérdidas de calor en las cubiertas plásticas de los invernaderos ya que las cubiertas de polietileno, a diferencia del vidrio, presentan alta transmisividad de la radiación térmica (Garzoli y Blackwell, 1981; Nijkens y col., 1984, Papadakis y col., 2000).

La transmisividad global del invernadero, debe integrarse como valor medio en todo el invernadero debido a la variabilidad de la radiación incidente en los diversos sectores del invernadero en días despejados, debido al predominio de la radiación directa (Bot, 1983). En días completamente nublados la situación es diferente, dado que no existen sombras definidas la radiación se distribuye en forma más homogénea dentro del invernadero (Baille, 1998). Por otro lado, factores como la condensación de humedad, también han sido materia de estudio con respecto a las propiedades de la cubierta con respecto a la transmisión de luz (Pieters, 1994; Pieters y col., 1995, 1997, Pieters y Deltour, 1997, Pollet y Pieters, 1999, 2000<sup>a</sup>, 2000<sup>b</sup>, 2002).

Muchos estudios han cuantificado las propiedades de la transmisión de la radiación en los invernaderos (Nijskens y col., 1985; Kittas, 1994, Kittas y col., 1999; Castilla y col.1999; Castilla y col., 2001) examinando la transmisión espectral de los films. La orientación del eje de la cumbrera, el ángulo del techo y la geometría del invernadero determinan la transmisión de luz del invernadero durante las distintas estaciones del año (Critten 1984, 1987, 1988; Jaffrin y Urban, 1990; Kurata, 1990; Papadakis y col., 1998; Zhang y col., 1996; Bouzo y Pilatti, 1999; Giacomelli y Ting, 1999). Por otro lado, la cantidad de módulos de los invernaderos también incide en la

transmisividad de la radiación solar (Giacomelli y Ting, 1999; Castilla y col.2001).

La simetría de los techos ha sido también estudiada con la finalidad de aumentar la transmisividad, distintos autores, (Quesada y col. 1998 y Castilla y col. 1999; Castilla y col. 2001), trabajando con distintos ángulos de techo de invernaderos asimétrico orientados en los ejes E-O y N-S, han encontrado diferencias en la radiación transmitida en relación a la época del año, la orientación y el ángulo de inserción del techo.

En ciertas épocas, desde el litoral argentino hasta la Patagonia, es necesario usar sistemas de calefacción en los invernaderos lo cual permite un control eficaz de la temperatura interna (Carluccio y col., 2002; Pilatti y Buyatti, 2000, 2002). A nivel mundial existe numerosa información sobre el uso de calefacción en invernadero, sobre todo a partir de la llamada *Crisis del petróleo*, en los años 70 (von Zabeltitz, 1986; 1988; Baille, 1995, 2001; Benavente y col., 1998; Bouzo y col., 1994; García y col., 1998; González y Baille, 1998; Iriarte y col., 2001; Jolliet 1991; Kempkes y Van de Braak, 2000; Kempkes y col., 2000, López Hernández, 2004). Los estudios enfocaron la problemática de la reducción del consumo de energía mediante distintas alternativas: otras fuentes energéticas, mejorar la eficiencia de conversión de la energía en los equipos calefactores, mejorar la eficiencia de la distribución dentro del invernadero, nuevos materiales de cubierta (Zhang y col. 1996; Papadakis y col., 2000) e implementación de estrategias de calefacción para reducir las pérdidas de calor en el invernadero.

El intercambio de calor entre el exterior y el interior de los invernaderos ha sido ampliamente estudiado determinándose distintos modelos (Vollebregt y van de Braak, 1995; Yang 1995; Teitel y Segal, 1995; Pieters y Deltour, 1997 Wang y col., 1997, Navas y col., 1998; Pita y col.,1998). El empleo de calefacción, en áreas de clima templado, permite optimizar la temperatura en función de las necesidades de los cultivos, siendo fundamental diseñar sistemas y tecnologías que permitan la mejor relación costo-beneficio (Baille 2001). Distintos sistemas de calefacción han sido propuestos y evaluados (García y col.,1998, Wei y col., 1998, Teitel y col. 1999, Kempkes y col. 2000) así como la respuesta del cultivo de tomate al aporte de calefacción ( Pilatti y Buyatti, 2000, 2002).

El suelo almacena calor durante el día en cuando el cielo no presenta nubes y las temperaturas son elevadas, el mismo es liberado desde el suelo al interior del invernadero si la temperatura del aire interno es menor a la temperatura del suelo. Estudios realizados con distintos materiales de cubiertas plásticas de suelo (fundamentalmente el color) muestran resultados diferentes con respecto al aumento de la temperatura del suelo, el aporte de calor al aire y la incidencia sobre los cultivos (Ham y col., 1993;



Ham y Kluitenberg, 1994, Tarara, 2000; Lorenzo y col., 2001; Hernández y col.,2001)

Para determinar las necesidades de calor de un invernadero deben de determinar las pérdidas que se producen considerando el invernadero como un colector solar, hecho que permite la aplicación de un modelo simplificado del balance de energía (Boulard y Baille, 1987, 1993). El consumo de energía de un invernadero se determina en función del salto térmico entre el exterior y el interior, la superficie cubierta y un coeficiente global de transmisión de calor (Von Zabeltitz, 1988) que sintetiza las características térmicas del material de cubierta. y hace posible estimar el consumo de energía del invernadero.

El coeficiente de transferencia de calor de la cubierta del invernadero se calcula por lo general a partir de un modelo estático unidimensional en el cual hay estratos homogéneos y paralelos: vegetación-suelo, aire interior, cubierta, aire exterior y cielo. La transferencia de calor desde y hacia la cubierta ha sido modelada por 4 modos clásicos de intercambio: conducción, convección, radiación térmica y calor latente (Wang y col.,1999). Las pérdidas de calor a través del material de cubierta, por unidad de superficie, pueden determinarse a partir de una expresión simplificada en función de un coeficiente global de pérdidas de calor, el salto térmico entre el interior y el exterior y la superficie de cubiertas y suelo (Montero y Antón, 1993).

Las condiciones limitantes para los cultivos hortícolas en la Patagonia, son fundamentalmente, las bajas temperaturas. Teniendo en cuenta los registros históricos de la temperatura media, la imposibilidad de realizar cultivos al aire libre se circunscribiría a los meses comprendidos entre mayo y agosto (fines de otoño e invierno para el hemisferio sur). Pero si se tiene en cuenta las temperaturas mínimas medias, que no solo afectan los procesos fisiológicos sino además comprometen la vida de dichos cultivos, esta limitante climática se extiende entre los meses de marzo a octubre (comienzo del otoño a mediados de primavera).

La necesidad de calefaccionar, tanto sea para reducir el efecto de heladas como para brindar condiciones óptimas para los procesos de crecimiento y fructificación de las especies cultivadas, conlleva a un importante costo energético, problema común a otras zonas productivas del mundo.

Este trabajo toma como eje esa problemática y se propone la manifestación de alternativas de reducción del costo energético evaluando la calidad de las cubiertas frecuentemente utilizadas tanto con respecto a la transmisión de luz como la pérdida de calor nocturno.

#### *4- Objetivos generales de la tesis*

El objetivo general de la tesis es documentar las condiciones ambientales durante el invierno, analizar las pérdidas de calor nocturna, la transmisión de luz diurna y evaluar métodos de reducción de las pérdidas de calor de los invernaderos del norte de la Patagonia.

Para cumplir con dicho objetivo se propusieron los siguientes objetivos parciales:

1. Documentar las condiciones ambientales, durante la época invernal, en un invernadero característico del norte de la Patagonia.
2. Estudiar las propiedades de los materiales y tipos de cubierta utilizados en los invernaderos de la región en lo que respecta a transmisión de luz considerando cubierta sencilla y doble y la forma del techo del invernadero
3. Analizar las pérdidas de calor del invernadero durante la noche, proponer y evaluar métodos de reducción de las pérdidas de calor
4. Potenciar la eficacia del suelo como almacén térmico diurno de calor y como liberador de calor nocturno.
5. Simular alternativas de disminución de pérdidas de calor nocturno empleando el programa CFD (Dinámica de Fluidos Computacional)

#### *5- Esquema de desarrollo de la tesis*

La tesis consta de 6 capítulos en los cuales se plantean objetivos específicos, revisión bibliográfica referida al tema, materiales y metodología empleada para realizar las experiencias para cumplir con los objetivos planteados, discusión de resultados y conclusiones parciales de los temas. Al final de la tesis se presentan dichas conclusiones parciales en conclusiones finales que interrelacionan las mismas y permiten dar unidad a los distintos temas.

Las experiencias presentadas en los capítulos 2, 3, 4 y 5 se realizaron en el norte de la Patagonia (Argentina), entre la latitud 38-39° S, entre las localidades de Allen y General Roca, en la Provincia de Río Negro. El capítulo 6 se desarrolló en el Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA), Cabrils, Barcelona, España sobre datos relevados en el área de desarrollo de la tesis. Los trabajos de recolección de datos de campo se llevaron a cabo entre setiembre de 2001 y noviembre de 2004, abarcando tres períodos primavera-estivales de cultivo de tomate en invernadero (meses desde setiembre a enero), y 3 períodos de meses de otoño-invierno (marzo a junio) durante los cuales se relevaron datos de clima sin cultivo.

Los capítulos que componen esta tesis son:

- Capítulo 1- Descripción de las características geográficas y de la producción bajo cubierta en el norte de la Patagonia
- Capítulo 2: Caracterización del clima de los invernaderos del norte de la Patagonia
- Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubiertas empleados en la zona.
- Capítulo 4: Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos
- Capítulo 5: Análisis de las pérdidas de calor, aportes de calor de suelo y necesidades de calefacción de un invernadero triple capilla del norte de la Patagonia.
- Capítulo 6: Modelo del clima del invernadero patagónico basado en la Mecánica de Fluidos computacional (CFD)
- Conclusiones finales

## *6- Bibliografía*

- Alados, I.; Foyo\_Moreno, I.; Alado\_Arboledas, L. 1996 Photosynthetically active radiation: measurements and modeling. *Agricultural and forest meteorology* 78:121-131 2003.
- Alvarez, A.J.; García, L.; Iglesias, N.; Nolting, J.; Sansinanea, A; Villarreal, P. 1997. Estudio técnico-económico de parcelas fruti-hortícolas del Ente Provincial del Río Colorado (La Pampa). Documento principal. EPRC-INTA EEA Alto Valle. 83pp
- Ameghino, F. 1880. La antigüedad del hombre del Plata. La cultura Argentina Ed. 347 pp. 1918.
- Araki, T.; Gitano, M.; Eguchi; H. 2000 Dynamics of fruit growth and photoassimilate translocation in tomato plant under controlled environment. *Acta horticulturae* 534. ISHS. 85-92
- Ayala, C.; Iglesias, N.; Frattini, M.; Villarreal, P. 1995. Análisis económico de las principales estructuras de invernáculo del Alto Valle. Res. XVIII Congreso Argentino de Horticultura. Santiago del Estero. 11-14 set 1995 (231)
- Baille M. 1995. Tecnología de calefacción de invernaderos. Curso de doctorado de calidad. Universidad Politécnica de Madrid.
- Baille, A. 1998. Energy Cycle. En: *Greenhouses ecosystems*. 265-286. Stanhill; G. Enoch; H.Z. Ed. Elsevier. Amsterdam.
- Baille, A. 2001. Trends in greenhouse technology for improved climate control in mild winter climates. *Acta horticulturae* 559: 161-168
- Benavente, R.M.; de la Plaza, S.; Navas, L. M.; García, J.L.; Hernández, E.; Luna, L. 1998. Establishment and validation of a model to estimate energy consumption of localized heating of greenhouse substrates. *Acta horticulturae*. 456: 339-346

***Tesis Doctoral. Estudio de condiciones térmicas y lumínicas y determinación de alternativas tecnológicas para el ahorro de energía en invernaderos de la Patagonia Norte - Argentina***

---

- Bot, G.P.A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. PhD. dissertation. Agric. Univ. Wageningen
- Bot, G.P.A. 1995. Greenhouse Climate Control: Physics of Greenhouse Climate. Wageningen Pers. The Netherlands
- Boulard, T; Baille, A. 1987. Analysis of thermal performance of greenhouse as a solar collector. *Energy Agriculture*. 6: 17-26.
- Boulard, T; Baille, A. 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology*; 79: 61-77.
- Bouzo, C.; Pilatti, R.; Gauchat, J.M.; Alcober, C. 1994. Diseño y desarrollo de un sistema de calefacción para invernáculos. Res. XVII Congreso Arg. y VI Latinoamericano de Horticultura. Córdoba. (23)
- Bouzo, C.; Pilatti, R. 1999. Evaluación de algunos factores que afectan la transmisión de radiación solar en invernaderos. *Revista FAVE* 13 (2): 13-19
- Bruggink, G.T.; Heuvelink, E. 1987. Influence of Light on the Growth of Young Tomato; Cucumber and Sweet Pepper Plants in the Greenhouse: Effects on Relative Growth Rate; Net Assimilation Rate and Leaf Area Ratio. *Scientia Horticulturae*; 31: 161-174
- Carluccio, C.; Lenscak, M. ; Panelo, M.; Colombo, M.; Cáceres, S.; Molina, N.; Scaglia, E.; Pernuzzi, C. 2002. Desarrollo actual de los cultivos protegidos en la República Argentina. En: Díaz Alvarez; R. y J. López Gálvez. Ed. Situación de la Agroplasticultura en Países Iberoamericanos. Tercera Reunión de Coordinación en Caracas; Venezuela. Cyted; Almería; España. Setiembre. p. 30-71.
- Castilla, N.; Lorenzo, P.; Montero, J.I.; Federes, E.; 1988. Alternative greenhouses for mild winter areas of Spain. *Acta Horticulturae* 245; pp: 63-70.
- Castilla, N.; Lorenzo, P.; Perez-Parra J.; Montero, J.I. Fereres, E.; Bretones, F.; López-Galvez, J. . 1990 New greenhouse structures for the south of Spain. *Acta Horticulturae* 281:153-158.
- Castilla, N. 1998. Condiciones ambientales en invernaderos no climatizados. *Tecnología de Invernaderos II. Curso Superior de Especialización. F.I.A.P.A. Pérez Parra y Cuadrado Gómez Ed.*
- Castilla, N.; Hernández, J.; Quesada, F.M.; Morales, M.I.; Guillén, A.; Escobar, I.; Montero, J.I. 1999. Alternative asymmetrical greenhouses for the Mediterranean area of Spain. *Acta Horticulturae* 491:83-85
- Castilla, N.; Hernández, J.; Quesada, F.M.; Morales, M.I.; Guillén, A.; Soriano, T. Escobar; I.; Antón; A.; Montero; J.I. 2001. Comparison of asymmetrical greenhouse types in the Mediterranean area of Spain. *Acta Horticulturae* 559: 183-186.
- CENSAR 93- 1993. Ministerio de Economía de la Provincia de Río Negro- Argentina
- Censo Fruti-Hortícola. 1994. Ministerio de la Producción. Provincia de Neuquén- Argentina

- Cockshull, K.E. 1988 The integration of plant physiology with physical changes in the greenhouse climate. *Acta Horticulturae* 229; pp: 113-121.
- Cockshull, K. E.; Graves, C. J.; Cave, R.J. 1992. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*; 67: 11-24
- Critten, D.L. 1984. The effect of geometric configuration on the light transmission of greenhouses. *J. Agr. Engng. Res.* 29 (3): 199-206
- Critten, D.L. 1987. Light transmission losses due to structural members in multispans under direct light conditions. *J. Agr. Engng. Res.* 38 (3): 209-215
- Critten, D.L. 1988. The transmission of direct light by structureless symmetric-roofed multispans greenhouses with non-absorbing cladding. *J. Agr. Engng. Res.* 40 (3): 225-232
- de Koning, A.N.M. 1988. The effect of different day/night temperature regimes on growth; development and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science.* 63 (3) 465-471
- de Koning, A.N.M. 1989. The effect of temperature on fruit growth and fruit load of tomato. *Acta Horticulturae.* 248; 329-336.
- de Koning, A.N.M. 2000. The effect of temperature fruit load and salinity on development rate of tomato fruit. *Proc. XXV IHC. Part 9. Acta horticulturae* 519. ISHS. 85-93
- De Lorenzo, M.F. 2001. Economía regional Patagónica. El desarrollo de las microrregiones. Programa de investigación geográfico político patagónico. Escuela de Ciencias Políticas. Universidad Católica Argentina. 55pp.
- Entraigas, R.A. 1960. El fuerte del Río Negro. 305 pp. Ed. Don Bosco. Bs. As.
- FAO. 2002. Dirección de Producción y Protección Vegetal 90. Manual preparado por el Grupo de Cultivos Hortícolas. Dirección de Producción y Protección Vegetal. Roma; 2002
- FAO. 2003. Evaluación de la degradación de la tierra en zonas áridas. LADA. Land degradation assessment in drylands. Roma.
- Feuilloley, P.; Issanchou, G. 1996. Greenhouse covering materials measurement and modelling of thermal properties using the hot box method; and condensation effects. *J. Agr. Engng. Res.* 65: 129-142
- Francescangeli, N. 1994. El invernáculo. en: 2ºCurso a distancia de producción de hortalizas en invernáculo. Mod.2. INTA San pedro.
- García, J.L.; de la Plaza S.; Navas L.M.; Benavente R. M.; Luna L.; Duran; J.M.. 1998. Energy modeling for heated concrete floors in greenhouses. *Acta Horticulturae* 456: 451-456
- Garzoli, K.V.; Blackwell, J. 1981. An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. *J. Agr. Engng. Res.* 26; 203-214
- Geoola, F.; Kashti, Y.; Peiper, U.M. . 2000. Solar radiation transmissivity of greenhouse cladding materials. *Acta Horticulturae.* 534:109-116
- Giacomelli, G.A.; Ting, K.C. 1999. Horticultural and engineering considerations for the design of integrated greenhouse plant production systems. *Acta Horticulturae* 481: 475-487.
- Golberg, M.; Mascarini, L.; Orden, S.; Sierra, E.M. 1996. Transmisión espectral en la banda de la radiación fotosintéticamente activa de las

- cubiertas plásticas para invernadero. *Horticultura Argentina* 15 (38): 51-54
- Gonzalez, M; Baille A. 1998. Calefacción de Invernaderos. Tecnología de Invernaderos II. Curso Superior de Especialización. F.I.A.P.A. Pérez Parra y Cuadrado Gómez Ed.
- Grange, R.I.; Andrews, J. 1993. Growth rates of glasshouse tomato fruit in relation to final size. *Journ. Hort. Scie.* 68 (5):747-754
- Grange, R.I.; Andrews, J. 1995. Respiration and growth of tomato fruit. *Plant cell and environment.* 18:8; 925-930.
- Guertal, E.A.; Elkins, C.B. 1996. Spatial variability of photosynthetically active radiation in a greenhouse. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 121 (2) : 321 - 325
- Ham, J.M.; Kluitenberg, G.J.; Lamont, W.J. 1993. Optical properties of plastic mulches affect the field temperature regime. *Journal Amer. Soc. Hort. Sci.* 118 (2):188-193.
- Ham, J. M.; Kluitenberg, G.J. 1994. Modeling the effect of mulch optical properties and mulch-soil contact resistance on soil heating under plastic mulch culture. *Agricultural and forest meteorology.* 71: 403-424
- Hernández, J.; Morales, M.I.; Escobar, I. 2001. Bean response to mulching in unheated plastic greenhouse *Acta horticulturae.* 559:79-84
- Heuvelink, E.; Batta, L.G.G.; Damen, T.H.J.. 1995. Transmission of solar radiation by a multispan Venlo-type glasshouse: validation of a model. *Agricultural and Forest Meteorology.* 74: 41-59
- Hwa-sung, C.; Gap, P.; Chae Cheng Soon-Ju. 1977. Environmental factors in the plastic house and their effects on the physiology and ecology of vegetables crops. *Theses of Chonnam Univ.* Vol.23.
- Iglesias, N.; Frattini, M. 1995. Situación de la producción hortícola bajo cubierta en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén. XVIII Congreso Argentino de Horticultura. Santiago del Estero. (246)
- Iglesias, N.; Frattini, M. 1996. Los invernáculos del Alto Valle: relevamiento de las estructuras y análisis económico de las principales alternativas. *Actas IV Congreso Argentino y II Internacional de Ingeniería Rural- Neuquén.* Argentina. Tomo II- (817-822)
- Iglesias, N. 1998. La horticultura en la Patagonia Norte. INTA EEA Alto Valle. Documento interno. 27 pp.
- Iglesias, N.; Merlo, V.; Romagnoli, S. 2001. Hortalizas frescas: Tendencias; mercados; costos y estrategias productivas para la producción bajo cubierta en la Patagonia Norte. INTA. EEA Alto Valle. 52 pp.
- Iglesias N. 2002. Producción de hortalizas bajo cubierta: Estructuras y manejo de cultivo para la Patagonia Norte. *Boletín de Divulgación Técnica* N° 49 INTA EEA Alto Valle 90 pp
- INDEC. 2001. Argentina. Población total por sexo; razón de masculinidad y densidad de población; según provincia .Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos. Buenos Aires. <http://www.indec.mecon.ar>
- INTA-GTZ. 1999. Fruticultura Moderna: Tecnología; transferencia; capacitación; organización; 9 años de cooperación técnica.

- Iriarte, A.; García V.; Saravia, L.. 2001. Modelo para la predicción de pérdidas nocturnas y necesidades de calefacción de invernaderos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. ASADES 5: 02.55-02.60
- Jaffrin, A.; Urban, L. 1990. Optimisation of light transmission in modern greenhouses. *Acta Horticulturae* 281: 25-33.
- Jolliet, O. 1991. Horticorn: An improved static model for predicting the energy consumption of greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*; 55: 265-294.
- Jones, J.W.; Kening, A.; Vallejos, C.E. 1999. Reduced state-variable tomato growth model. *Transaction of the ASAE*. Vol. 42(1):255-265
- Kempkes, F.L.K.; van de Braak, N.J.. 2000. Heating system position and vertical microclimate distribution in chrysanthemum greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*. 104: 133-142
- Kempkes, F. L. K.; Van de Braak, N. J.; Bakker, J.C. 2000. Effect of heating System position on vertical distribution of crop temperature and transpiration in greenhouse tomatoes *J. Agr. Engng. Res.* 75: 55-64
- Kittas, C. 1994. Determination du coefficient global de transmission de chaleur a travers la paroi d'une serre. *Agricultural and Forest Meteorology*. 69:205-221
- Kittas, C. Baille, A.; Giaglaras, P. 1999. Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouses. *J. Agr. Engng. Res.* 73: 341-351
- Kurata, K. 1990. Role of reflection in light transmissivity of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*; 52:319-331
- López Hernández, J.C. 2004. Sistemas de calefacción en invernaderos cultivados de judía en el litoral mediterráneo. Tesis doctoral. Departamento de producción vegetal. Escuela politécnica superior. Universidad de Almería. pp. 164
- Lorenzo, P.; Medrano, E.; Perez Parra, J.; Castilla, N. 2001. Cucumber growth and yield as affected by mulching in soilless culture in unheated greenhouse. *Acta Horticulturae*. 559: 107-112
- Montero, J. I.; Antón, A. 1993. Tecnología del invernadero. Curso de Tecnología de la Horticultura Protegida. INTA-UBA. Carpeta 220 pp
- Montero, J.I.; Antón, A.; Hernández, J.; Castilla, N. 2001. Direct and diffuse light transmission of insect-proof screen and plastic films for cladding greenhouses. *Acta Hort. (ISHS)* 559:203-210
- Muñoz, P.; Antón, A.; Montero, J.I. 1998. Estructuras de invernaderos; Tipología y materiales. En tecnología de Invernaderos II. Curso Sup. De Especialización. Perez Parra; Cuadrado Gomez Ed. Cap III: 65-99
- Museo del Fin del Mundo. 2004. La Tierra del Fuego en el mapa del siglo IX de Abu Jafar Mohamed Ben Muza Al-Juarizmi. <http://www.tierradelfuego.org.ar/museo/arabe.htm>
- Navas, L.M.; de la Plaza, S.; García, J.L.; Luna, L.; Benavente, R.; Durán, J.M.; Retamal, N. 1998. Formulation and sensitivity analysis of a dynamic model of the greenhouse climate validation for a mild mediterranean climate. *Acta Horticulturae*. 456:305-312

- Nijkens, J.; Deltour, J.; Coutisse, S.; Nisen, A. 1984. Heat transfer through covering materials of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*. 33: 193-214
- Nijkens, J.; Deltour, J.; Coutisse, S.; Nisen, A. 1985. Radiation transfer through solar and thermal screens of greenhouses. *Agric. And Forest Meteorology*. 35:229-242
- Nijskens, J.; Deltour, J.; Albrecht, E.; Gratraud, J.; Feuilloley, P. 1990. Comparative studies on the ageing of polyethylene film in the laboratory and in the practical use. *Plasticulture*. 87:11-20
- Orden, S.; Goldberg, M.; Quartino, R.; Mascarini, L.; Landini, A.; Malleville, H.; Bottini, L. 2000. Estudio comparativo entre ensayos de exposición natural y envejecimiento acelerado de films de polietilenos para invernaderos. *Agr. Técnica*. 60(3):95-304
- Papadakis, G.; Manolakos, D.; Kyritsis, S. 1998. Solar Radiation Transmissivity of a Single-Span Greenhouse through Measurements on Scale Models. *J. Agric. Engng. Res.* 71: 331-338
- Papadakis, G.; Briassoulis, D.; Scarascia Mugnozza, G.; Vox, G.; Feuilloley, P.; Stoffers, J.A. 2000. Radiometric and thermal properties of; and Testing methods for; greenhouse covering material (review paper). *J. Agr. Engng. Res.* 77 (1) 7-38
- Pearce, B.D.; Grange, R.J.; Hardwick, K. 1993. The growth of young tomato fruit. I. Effects of temperature and irradiance on fruit grown in controlled environments. *Journal of Horticultural Science* 68(1)1-11
- Pearson, S.; Wheldon, A.E.; Hadley, P. 1995. Radiation transmission and fluorescence of nine greenhouse cladding material. *J. Agr. Engng. Res.* 62: 61-70
- Pieters, J.G. 1994. Condensation and PAR transmittance of greenhouses. *Plasticulture* 112: 23-31
- Pieters, J.G.; Deltour, J. M.; Debruyckere, M.J. 1995. Onset of condensation on the inner and outer surface of greenhouse covers during night. *J. Agr. Engng Res.* 61: 165-171
- Pieters, J.G.; Deltour, J.M. 1997. Performances of greenhouses with the presence of condensation on cladding materials. *J. Agr. Engng. Res.* 68: 125-137
- Pieters J.G.; Deltour J.M.; Debruyckere, M.J. 1997. Light transmission through condensation on glass and polyethylene. *Agricultural and forest meteorology*. 85: 51-62
- Pilatti, R.; Buyatti, M.A. 2000. Duración de la calefacción sobre la producción en el cultivo de tomate. *Actas XXIII Cong. Arg. X Latinoamericano y III Iberoamericano de Horticultura*. Pag. 118
- Pilatti, R.; Buyatti, M.A. 2002 Efecto de la calefacción sobre la producción de tomate *Actas XXV Congreso Argentino de Horticultura*.
- Pita, P.A.; Pontes, M.; Vargues, A. 1998. Mediterranean greenhouse energy balance. *Acta Horticulturae*. 456:375-382.



- Pollet, I.V.; Pieters, J.G. 1999. Laboratory measurements of PAR transmittance of wet and dry greenhouse cladding materials. *Agricultural and forest meteorology* 93: 149-152
- Pollet, I.V.; Pieters, J.G. 2000(a). PAR transmittance of dry and wet glass. *Acta Horticulturae* 534:285-292.
- Pollet, I.V.; Pieters, J.G.. 2000(b). Condensation and radiation transmittance of greenhouse cladding materials; Part 3: Results for glass plates and plastic films. *J. Agr. Engng. Res.* 77 (4): 419-428.
- Pollet, I.V.; Pieters, J.G. 2002. PAR transmittances of dry and condensate covered glass and plastic greenhouse cladding. *Agricultural and forest meteorology.* 110:285-298
- Quesada, F.M.; Hernández, J.; Morales, M.I.; Guillén, A.; Castilla, N. 1998. Pendientes de cubierta en invernaderos asimétricos: respuesta de un cultivo de pepino. *Actas de Horticultura* vol. 21: 45-50
- Reclus, O. 1906. *Novísima geografía universal.* Tomo VI. América del Sur y Oceanía. 503 pp. Prometeo Ed.
- Schaljo, E. 1992. Perspectivas regionales y mercados potenciales. Propuestas para los cultivos protegidos. En: *Curso internacional de cultivos protegidos.* INTA
- Schoch; P.G.; L'Hotel; J.C.; Brunel; B. 1990. Increase in diameter of stem in tomato: effects of light and of the night temperature. *Agricultural and Forest Meteorology.* 50(3): 229-238
- Stoffers, J.A. 1998. Light transmission of zig-zag-shaped multispan greenhouses. *Acta Horticulturae* 456: 383-390.
- Tarara, J.M. 2000. Microclimate modification with plastic mulch. *HortScience.* Vol 35 (2). 169-180
- Teitel, M.; I Segal, I. 1995. Net thermal radiation under shading screens. *J. Agr. Engng. Res.* 61: 19-26
- Teitel, M.; Segal, I.; Shklyar, A.; Barak, A. 1999. A compararison between pipe and air heating methods for greenhouses. *J. Agr. Engng. Res.* 72: 259-273
- Urban, L. 1997. *Introduction à la production sous serre.* Tome 1: La gestion du climat. Lavoisier Tec&Doc. Paris.
- Vollebregt, H. J. M. van de Braak,, N.J. 1995. Analysis of radiative and convective heat exchange at greenhouse wall.s *J. Agr. Engng. Res.* 60: 99-106
- von Zabeltitz, C.V. 1986. Energy conservation and renewable energies for greenhouses heating. REUR Technical serie 3. European cooperative networks on rural energy. CNRE Guideline n°2 FAO
- von Zabeltitz; C.V. 1988. Energy conservation and renewable energies for greenhouse heating. FAO. REUR Technical Series 3
- von Zabeltitz; C.V. 1998. Greenhouse structures. En: *Greenhouses ecosystems.* 265-286. Stanhill; G. Enoch; H.Z. Ed. Elsevier. Amsterdam.
- Wang, S. Pieters, J.G.; Deltour, J. 1999. Studies of radiometric; thermal and climatic properties of a new greenhouse covering material. *Acta Horticulturae* 486:49-54

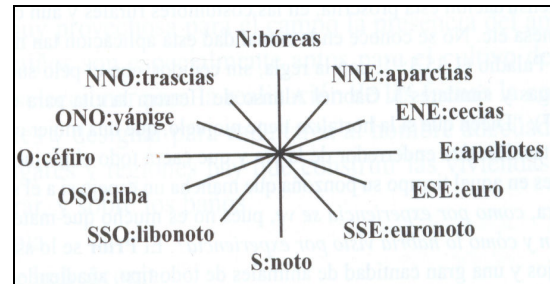
- Wei, Y. Q.; Bailey, B. J.; Wilkinson, D.; Lockwood, A.; Stenning, B.C. 1998. Detecting surface condensation on tomato plants in greenhouses. *Acta Horticulturae*. 421:57-63.
- Yao, C.; Moreshet, S.; Aloni, B.; Karni, L. 2000. Effects of climatic factors and water stress on the diurnal fluctuation in diameter of bell pepper fruit. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*. 75 (1)6-
- Yang, X. S. 1995. Greenhouse micrometeorology and estimation of heat and water vapour fluxes. *J. Agr. Engng. Res.* 61: 227-238
- Zhang, Y.; Gauthier, L.; de Halleux, D.; Dansereau, B.; Gosselin, A. 1996. Effect of covering materials on energy consumption and greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology* 82: 227-244

---

---

**Capítulo 1: Descripción de las características geográficas y de la producción bajo cubierta en el norte de la Patagonia**

---



“hay que esperar viento allí donde se dirigen los astros en su caída”  
Geopónica o extractos de agricultura de Casiano Baso. S. VI d.C. Libro 1 Cap 11.9

## 1.1. Introducción

La República Argentina (*Figura 1.1*), ubicada entre los 21° 46' S hasta 55° 88'' S, con una longitud de 7500 Km., presenta todos los climas aunque predomina el templado. El territorio nacional comprende 23 provincias ocupando el sexto lugar mundial por su extensión, 3.761.274 km<sup>2</sup> que incluyen 969.464 km<sup>2</sup> de territorio antártico e islas del Atlántico sur. La llamada región de la Patagonia no tiene límites precisos, comprende la parte sur de las provincias de La Pampa y Buenos Aires, y por completo los territorios de Neuquén, Río Negro, Chubut, Santa Cruz y Tierra del Fuego.

Según las estadísticas del año 2001 del INDEC, la población de la República Argentina es de 36.260.130 habitantes lo cual significa aproximadamente una densidad poblacional de 13 habitantes\*km<sup>-2</sup>, representando la Provincia de Buenos Aires el 38.13% de la población nacional. En contraste con esa realidad, la población patagónica es de 1.738.257 personas lo cual significa una densidad poblacional de 2.27 habitantes\*km<sup>-2</sup>, disminuyendo considerablemente en áreas rurales a 0.1 habitante por km<sup>2</sup>.

*Figura 1.1: ubicación de la República Argentina en el contexto geográfico de América del Sur.*



## *1.2. Objetivo*

Este capítulo tiene como finalidad:

- caracterizar las condiciones ambientales del entorno productivo del área de cultivos en la cual se desarrollan los trabajos de tesis
- describir las características de los invernaderos típicos de la región

## *1.3. Descripción de la Región Patagónica*

La Patagonia es una extensa región ubicada al sur de la República Argentina, poseyendo una riqueza escénica, cultural y ambiental de grandes proporciones, con importantes expresiones de endemismos florísticos y faunísticos. Comprende una superficie de 750.000 km<sup>2</sup>, (27% del territorio nacional). Su clima se caracteriza por ser semiárido a árido y frío, con fuertes vientos que provienen del oeste. La Cordillera de los Andes retiene las masas de aire húmedo provenientes del océano Pacífico, de tal manera que los vientos pasan secos a la porción oriental. En esta vasta región las principales actividades son la cría de ganado ovino, la extracción de gas y petróleo y la producción de energía eléctrica en la zona de llanuras mientras que la cordillera presenta bosques de coníferas y extensos lagos.

A lo largo de su extensión (2000 km de largo), la Patagonia presenta gradientes térmicos, hídricos y edáficos que determinan la existencia de distintas áreas ecológicas o biozonas, con vegetación que varía desde bosques nativos, estepas arbustivas, estepas arbustivo-graminosas, estepas graminosas, praderas graminosas y eriales de subarbustos, entre otros.

Desde un punto de vista estructural y morfológico, se distinguen una Patagonia andina, de relieve montañoso, y una Patagonia extra-andina, de relieve mesetario.

### *1.3.1. Patagonia Andina*

La Patagonia andina se caracteriza por poseer un relieve montañoso, representado por los Andes Patagónico-Fueguinos, originados por el plegamiento andino de la era cenozoica. Estas montañas no forman un encadenamiento continuo sino que se presentan en forma de cordones aislados, separados por valles anchos y bajos, ocupados por lagos o por ríos. En Tierra del Fuego, los Andes cambian de rumbo, presentándose con dirección Oeste-Este y pierden altura hasta sumergirse en el océano; continúan en el arco de las Antillas Australes y luego en los Antartandes, ya en la Antártida.

En este paisaje geográfico andino patagónico, se destacan netamente la fuerte erosión fluvial y la acción glaciaria, que ha dejado como restos picos erguidos y agujas muy puntiagudas, gran cantidad de lagos ramificados (como el lago Nahuel Huapi y el lago Argentino), glaciares y el campo de hielo, que es un relictos de las glaciaciones.

Las bajas temperaturas (de alrededor de los 7 C° en promedio) y los vientos húmedos del Oeste provenientes del anticiclón del Pacífico originan abundantes precipitaciones

con máximas de invierno, que permiten el desarrollo de una vegetación boscosa sobre los faldeos orientales de las montañas que llega normalmente hasta las nieves eternas. Las características naturales le otorgan a la región una gran belleza aprovechada para el turismo, principal actividad económica de la Patagonia andina.

### ***1.3.2. Patagonia Extraandina***

La Patagonia extraandina, ubicada al este de la andina, está formada por distintas estructuras que, por sus características comunes le otorgan unidad. Estos rasgos geográficos son:

- Predominio de mesetas escalonadas desde los Andes patagónicos hasta la costa atlántica, presentando grandes superficies llanas que se denominan pampas. Estas mesetas se comunican con los valles a través de los cañadones, antiguos cauces fluviales de perfil muy agudo, que responden a una red hidrográfica muerta.
- Serranías aisladas, de cumbres chatas y escasa altura y también frecuentes áreas deprimidas debidas principalmente a la erosión eólica sobre terrenos blandos y a hundimientos tectónicos. La laguna del Carbón en el Gran Bajo de San Julián, en la provincia de Santa Cruz, con 105 metros de profundidad, es la máxima depresión de Argentina.
- Amplios valles fluviales aterrizados, con dirección oeste-este, labrados por ríos que se originan en los Andes Patagónicos. Las terrazas están limitadas por barrancas, denominadas localmente, bardas. Los valles fluviales más importantes son los recorridos por los ríos Negro y Chubut, en el norte de la Patagonia, éste último es el sitio geográfico que sirve de escenario para la presente tesis.

El clima de la Patagonia extra andina es árido frío, con vientos fuertes provenientes del Oeste, muy aptos para la obtención de la energía eólica. La aridez del clima actual fue originada por el levantamiento de los Andes Patagónicos que impiden el paso de los vientos húmedos del Oeste.

La Cordillera de los Andes juega un papel central como determinante del clima patagónico. La distribución N-S de la cordillera genera una fuerte barrera orográfica para las masas de aire húmedas provenientes del océano Pacífico. Estas masas de aire se calientan y desecan a medida que atraviesan la cordillera y el continente. La Patagonia extra-andina se caracteriza por precipitaciones anuales menores de 500 mm (principalmente menores de 200 mm), siendo las precipitaciones predominantemente invernales o tempranas en la primavera (*Figura 1.2*).

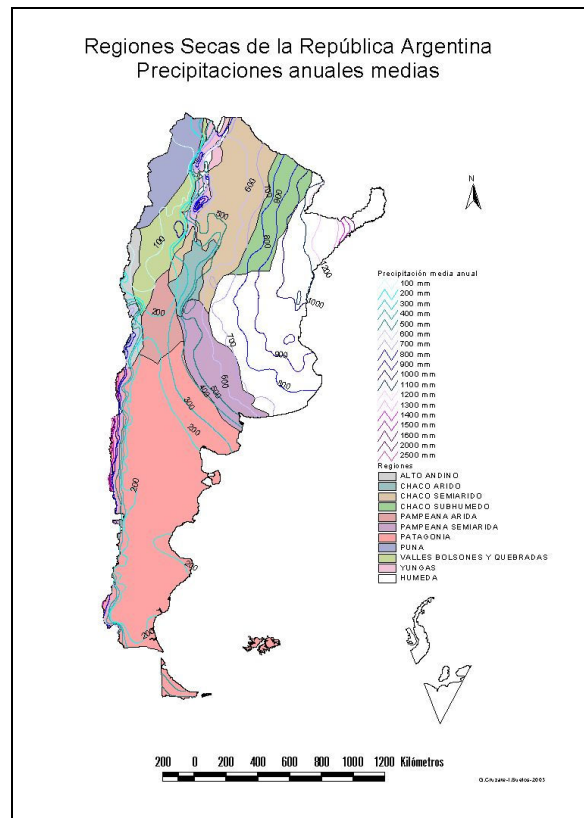
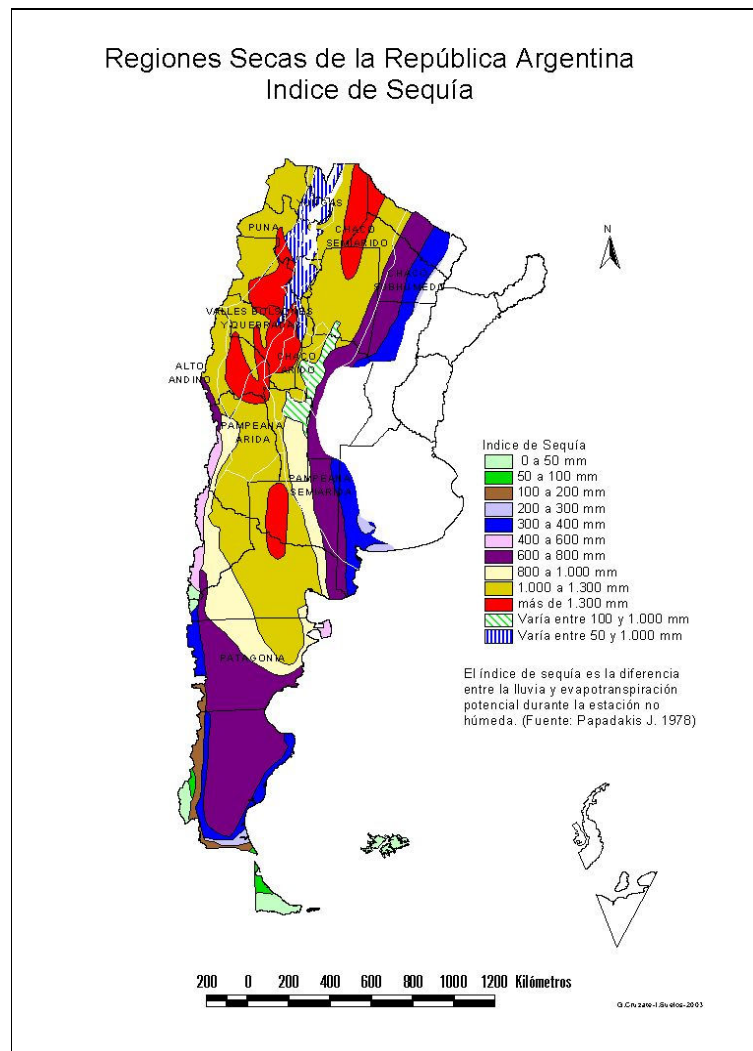


Figura 1.2- Régimen de precipitaciones de la República Argentina.

Esta distribución invernal de las precipitaciones determina una asincronía entre la estación húmeda y la estación de crecimiento de la vegetación. Así surge una de las características sobresalientes de la Patagonia: su aridez.

Si bien en algunas partes las precipitaciones superan la demanda atmosférica, la gran mayoría de la región experimenta déficits hídricos estivales muy marcados (Figura 1.3).



*Figura 1.3: Índice de sequía de las regiones de la República Argentina*

Un hecho destacable del clima de la región Patagónica es la gran velocidad de los vientos del oeste - sudoeste. Estos se caracterizan no solo por su persistencia durante el año sino también por su intensidad. Los valores observados de velocidad de viento media anual en la región centro-oeste de Chubut varían entre 15 y 22 km\*h-1. La región del Alto Valle de Río Negro, al norte de la Patagonia, se caracteriza por vientos dominantes del sector s-so, con velocidad promedio de 25 km/h. (*Figura 1.4*). La distribución anual de las velocidades de viento indica máximos entre setiembre y enero y mínimos en invierno. En el promedio anual y para toda la región el efecto del viento reduce las temperaturas en 4.2° C y el efecto enfriante es mayor en verano.



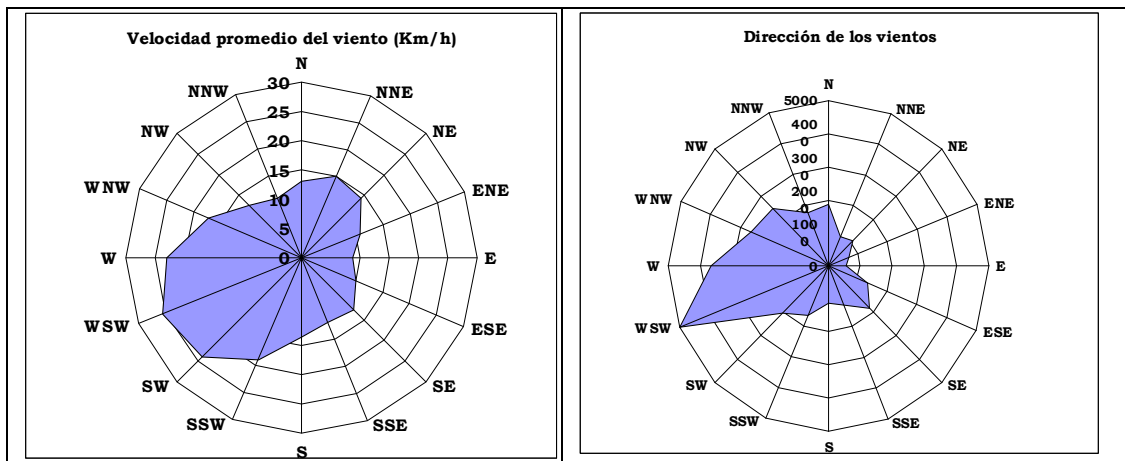


Figura 1.4 : Registros de velocidad promedio (Km/h) y dirección del viento durante el período 01/07/2003 a 15/02/2004 en el Alto Valle de Río Negro. Elaboración propia a partir de datos de INTA Estación Experimental Alto Valle

De esta manera, el clima de la Patagonia se ubica en los de tipo moderado, con cuatro estaciones bien definidas, con primaveras y otoños cortos e inviernos largos con gran amplitud entre las temperaturas de invierno y de verano. Un corte transversal en la geografía de la Patagonia Norte (39°S), (Figura 1.5) área de desarrollo de las actividades del presente trabajo, muestra amplitudes térmicas anuales de más de 10° en San Carlos de Bariloche, de más de 17° en Maquinchao, en el corazón de la Meseta, y de unos 13° en Carmen de Patagones, a 30 Km. del Atlántico. Debido a su altura, el área de Maquinchao (cerca de 800 mts. sobre el nivel del mar) alcanza excepcionalmente los 30° bajo cero, con lo que resulta tan fría como las áreas más frías de la Patagonia Austral. La temperatura media en invierno, sin embargo, es de -2°C, la misma que en Tierra del Fuego, extremo sur de Argentina.

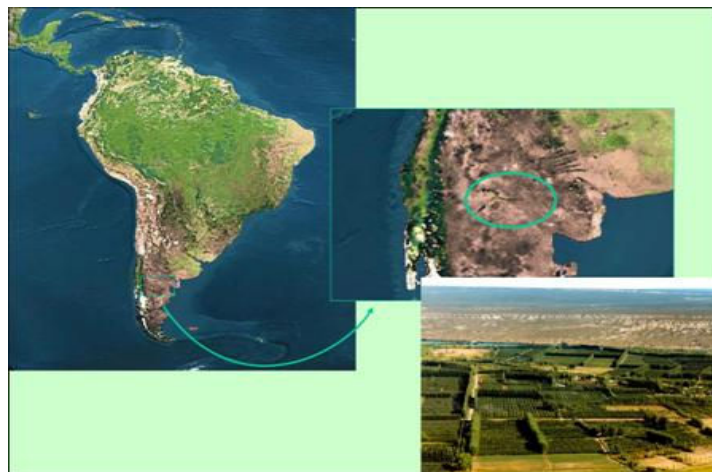


Figura 1.5. Ubicación de la zona norte de la Patagonia.

Las temperaturas máximas absolutas son altas en la Patagonia, con marcas de hasta 45° en la parte oriental de la mesopotamia configurada por los ríos Colorado y Negro, y un poco menos en Carmen de Patagones.

#### 1.4. Características de las actividades agrícolas de la Patagonia

La vegetación natural es esteparia debido a la escasez de agua, desarrollándose distintas actividades económicas, según las características geográficas:

- en las mesetas patagónicas, se desarrolla la explotación ovina, principal complejo económico de la región.
- en los valles fluviales, se han formado importantes oasis agroindustriales, destacándose el Alto Valle del río Negro y el valle inferior del río Chubut.
- en la franja costera, se desarrollan diversas actividades económicas, entre las que se destacan la pesca, el turismo, la extracción de petróleo y las industrias.

Existen más de 10 millones de hectáreas en la Patagonia que fueron abandonadas por sus pobladores durante la década del 90 debido a la falta de rentabilidad y al proceso de desertificación de las tierras (FAO 2003)

Las principales zonas de producción fruti-hortícola se ubican en los valles de regadío de los ríos del norte de la Patagonia, especialmente Neuquén, Limay y Negro en territorio de las provincias de Río Negro y Neuquén, zona conocida como Patagonia Norte (Figura 1.6).

*Figura 1.6: Provincias de Río Negro y Neuquén, al norte de la Patagonia, en amarillo, los valles de regadío del río Negro.*



Según fuentes regionales (INTA-GTZ 1999), la superficie apta para cultivos bajo regadío, entre las provincias de Río Negro y Neuquén, suma más de 139.000 hectáreas situada en los distintos valles sobre los ríos Limay, Neuquén y Río Negro. Actualmente se cultivan aproximadamente 59.000 hectáreas, es decir el 42.4% de la superficie, lo cual conforma un paisaje productivo contrastante con la zona de mesetas que rodea dichos valles (Foto inferior derecho en la figura 1.5.). Los cultivos son fundamentalmente frutales de pepita (manzana y pera) y menor porcentaje de carozo (durazno y ciruela). Los cultivos hortícolas comprenden el 15.5% de la superficie de cultivos bajo regadío.

#### *1.4.1. Los cultivos hortícolas de la Patagonia Norte*

La superficie cultivada de la República Argentina es de 30.524.814 ha de las cuales se dedican a la producción hortícola aproximadamente 620.000 hectáreas, lo cual representa solamente el 2% del total. En general, la mayor proporción de la producción se destina al mercado interno para consumo fresco representando las hortalizas industrializadas solo el 4% del total. La mitad de la producción en fresco tiene como destino abastecer el área metropolitana de la ciudad de Buenos Aires atendiendo a la demanda de más de 12 millones de habitantes.

En la Patagonia Norte existen tres valles irrigados (Alto, Medio e Inferior del Río Negro) donde se localizan las áreas de regadías las cuales se dedican fundamentalmente a la fruticultura (60.000 Ha) y en menor proporción a la horticultura (aproximadamente 9.000 Ha). La limitante mayor para los cultivos hortícolas es el clima ya que el período libre de heladas es de 174 días (desde abril hasta octubre) lo cual obliga al abastecimiento extra regional distante a más de 1000 Km. Esto se traduce en un déficit del abastecimiento local del 70-75% del volumen consumido (Iglesias y Frattini, 1995).

La horticultura regional, según datos de encuestas y censos (Censar, 1993; Censo Frutihortícola, 1994; Iglesias, 1998) abarca una superficie de entre 7.000 a 9000 hectáreas de cultivos hortícolas anuales, habiendo manifestado solo un 18 % de aumento en el período 1993-1998 frente al 41 % de aumento de la superficie desde el período 1988-1993. Sin embargo si se considera el valor bruto de la producción para el período 89/93 se visualiza un incremento del 47% que se mantiene constante para el período siguiente (93/98), en el cual fue del 48 % (Iglesias, 1998). Este importante aporte del sector se ha debido fundamentalmente a la incorporación de tecnologías de producción que permitieron una mayor productividad y a la aparición de nuevos mercados.

Aunque la producción bajo cubierta plástica comienza a aparecer en el país en la década del 70, sobre todo como túneles bajos para protección de bajas temperaturas, se puede afirmar que el avance de la plasticultura argentina se hace evidente a partir de los años 80, incorporando además nuevas tecnologías y materiales de cubierta. Aunque no existen estadísticas oficiales, documentos recientes estiman que la superficie con invernaderos en la República Argentina oscila entre 3.000 y 3.5000 ha ubicadas principalmente en la región Nor-Oeste, Nor-este y cinturones verdes de Buenos Aires y Santa Fe. (Carluccio y col., 2002).

Los cultivos de hortalizas bajo cubierta, en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén empezaron a desarrollarse a fines de la década del '80, sin embargo el crecimiento más notorio se produjo, según estadísticas propias de INTA EEA Alto Valle, a partir de 1995, como producto de la crisis del principal sector exportador regional, la fruticultura y a consecuencias de políticas nacionales producto de la paridad cambiaria 1:1 del peso respecto al dólar que perjudicó las exportaciones. El desarrollo tecnológico agropecuario debió obligado a dar respuestas de producciones de rápido retorno de capital (Iglesias y

col., 2001; Alvarez y col., 1997), por lo cual la horticultura se vio favorecida, sobre todo en la primera mitad de la década del '90, impactando a favor de la producción de hortalizas bajo cubierta, tanto a nivel regional como nacional.

En todo el territorio argentino se evidenció un proceso al cual no fue ajena la Patagonia: el incremento de la superficie cultivada bajo invernadero estuvo también acompañado por la incorporación de tecnología adaptada de otras zonas productivas tanto del país, como de países de referencia, principalmente España, lo cual llevó a un aumento de los rendimientos por unidad de superficie. Este desarrollo tecnológico y el consecuente aumento de la producción repercutió notoriamente en el mercado interno de hortalizas en Argentina con un descenso de los precios, exigiendo un replanteo constante en el desarrollo de tecnologías productivas de menores costos.

#### *1.4.2. La producción bajo cubierta en el norte de la Patagonia*

Durante la década del 80 el tamaño inicial de las explotaciones era de 650-1000m<sup>2</sup> (Schaljo, 1992; Ayala y col., 1995) superficie que permitía retorno de capital y crecimiento de la actividad. Posteriormente, y relacionado con el marco socioeconómico nacional y regional, la superficie recomendada para iniciarse en la actividad aumentó a 1000-1500 m<sup>2</sup> debiendo el productor incorporar adelantos tecnológicos que permitieran aumentar la rentabilidad en función del incremento de los rendimientos y disminución de los costos (Iglesias y col., 2001). El tipo de estructura adaptada a las condiciones locales debe presentar resistencia a la tracción debido a que el viento es uno de los factores climáticos que debe considerar el productor (Bonet Martinez y Monera Olmos, 1992).

La superficie bajo cubierta ha aumentado considerablemente (tabla 1.1), observándose distintos tipos de estructuras que deben adaptarse a las condiciones climáticas regionales para permitir el cultivo adecuado de distintas especies. Los primeros modelos del Alto Valle fueron estructuras en forma de capilla (simple o múltiple) de estructura de madera, generalmente de álamo sulfatado extraído de las cortinas rompavientos de las explotaciones frutícolas. El ancho de los módulos solía ser de 10-12 metros, tratando de adaptar estructuras desarrolladas en el norte argentino (Carluccio y col., 2002). Rápidamente estos modelos se adaptaron a las condiciones de clima extremo de la región, principalmente viento y temperatura.

*Tabla 1.1: Evolución de la superficie de cultivos hortícolas bajo cubierta en el Alto Valle*

<b>Año</b>	<b>Superficie de invernaderos con horticultura (ha)</b>
1992	2.7
1993	3.5
1994	7.5
1995	10.1
1996	16.8
1997	21.8

1998	24.6
1999	27
2000	28.5

*fuentes: INTA Alto Valle, elaboración propia*

Uno de los problemas que enfrenta la producción de hortalizas bajo sistemas forzados es el mantenimiento de las temperaturas dentro de los rangos óptimos para los cultivos, es así que tanto los sistemas de calefacción como los de ventilación deben adaptarse a las condiciones locales, implementando sistemas económicos, de fácil acceso y manejo (Bouzo y col., 1994).

Las condiciones limitantes para los cultivos, como se puede apreciar en el Anexo I, son las bajas temperaturas. Teniendo en cuenta los registros históricos de la temperatura media, la imposibilidad de realizar cultivos al aire libre se circunscribiría a los meses comprendidos entre mayo y agosto (fines de otoño e invierno para el hemisferio sur). Pero si se tiene en cuenta las temperaturas mínimas medias, que no solo afectan los procesos fisiológicos sino además comprometen la vida de dichos cultivos, esta limitante climática se extiende entre los meses de marzo a octubre (comienzo del otoño a mediados de primavera).

#### *1.4.3. Tipos de invernaderos de la región*

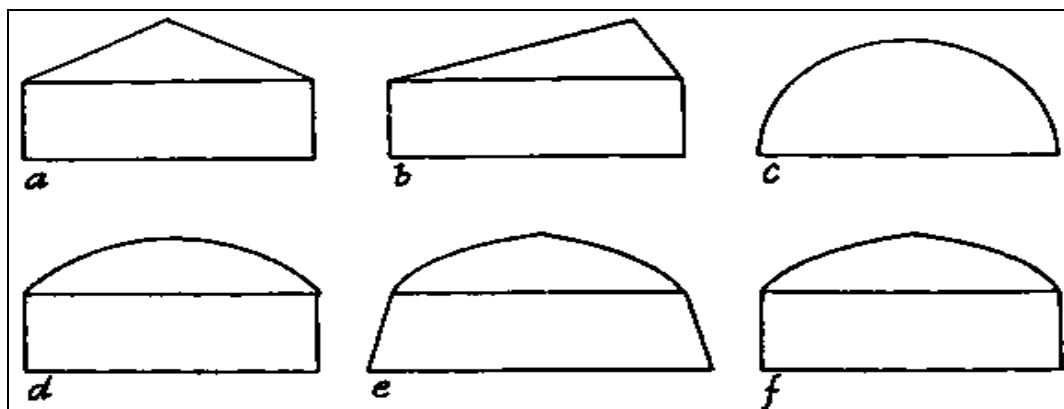
Las estructuras desarrolladas en norte de la Patagonia se caracterizan fundamentalmente por estar adaptadas a los fuertes vientos primaverales con ráfagas que superan los 120 km./h en dirección predominante O-E,. Comúnmente son estructuras de 12 a 24 m de ancho, por lo general del tipo multitúnel o multicapilla, formado por 2 o 3 módulos de 6 metros de ancho, 2.5 a 3 metros de altura en canaleta y de 3.5 a 5 metros en cumbrera.

No se emplea sistema de ventilación cenital sino lateral mediante cortinas enrollables a partir de un zócalo de 0.50-0.80 m de altura. En cuanto al uso de calefacción, el 80 % son invernaderos calefaccionados y el 20 % fríos. Debido a las bajas temperaturas y al ciclo del principal cultivo, tomate primicia, se trabaja con doble cobertura de techo empleándose como cubierta externa polietileno térmico larga vida (PE LDT) de 150 µm y polietileno cristal de 50 a 100 µm para el doble techo interno.

Se produce principalmente tomate primicia el cual se trasplanta en agosto-setiembre para abastecer el mercado a partir de octubre como producción primicia. En el período otoño invernal se cultivan fundamentalmente hortalizas de hojas sin aporte calórico por calefacción (Iglesias y Frattini, 1996).

La plasticultura de la Patagonia, en sus inicios, se basa en modelos de otras zonas productivas del país y principalmente de los modelos mediterráneos, adaptándolas a las condiciones climáticas de la región. Es así como de las formas de los invernaderos mediterráneos descritos en documentos de la FAO (2002), (*Figura 1.7*),

fundamentalmente se adaptan las formas de invernaderos de techo plano simétrico a dos aguas y el arco redondeado con paredes verticales.



*Figura 1.7.: Formas de invernaderos (FAO 2002). a) techos planos simétricos a dos aguas, b) techos planos asimétricos, c) arco redondeado, d) arco redondeado con paredes verticales, e) arco en punta con paredes laterales en pendiente y f) arco en punta con paredes verticales laterales.*

Según distintos trabajos de relevamiento de los principales tipos de estructuras de invernaderos existentes en el norte de la Patagonia (Iglesias 2002; Iglesias y Frattini, 1996), se puede determinar que las estructuras son de techo simétrico realizadas en tres tipos de material: madera, metal y combinación de ambos (Tabla 1.2).

Las estructuras de metal, mejor adaptadas a la zona, son las adoptadas por productores más experimentados, las mismas requieren mayor inversión inicial pero en proyectos productivos superiores a 10 años muestran el mejor retorno de capital en un esquema productivo tomate-apio, por otra parte, para proyectos de 5 a 10 años la estructura económicamente más aconsejable es la que combina postes de madera y techo metálico. (Ayala y col.,1995; Iglesias y Frattini, 1996; Iglesias y col., 2001)

*Tabla 1.2: Tipo de estructuras de invernaderos existentes en la Patagonia (Argentina), sus ventajas y desventajas.*

<b>Tipo de estructura</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Madera</b>	Económica Disponibilidad de material en la zona	Poca duración Produce sombreado Baja hermeticidad Problemas de fijación del polietileno Menor transmitancia de luz
<b>Metálica</b>	Resistencia a los vientos. Duración. Fácil armado Menores pérdidas de calor Bajo sombreado interno	Más costosas que las de madera. Si son de hierro no galvanizado se pueden oxidar.

	Mejor sujeción del polietileno Mayor transmitancia	
<b>Combinada</b>	Costos intermedios. Fácil armado. Transmitancia similar a la estructura metálica Buena fijación del polietileno	Menor duración, de la parte de madera, que la metálica. Menor resistencia a los vientos que la metálica.

Dentro de las estructuras metálicas se emplean dos tipos de modelos, uno de plano simétrico a dos aguas (figura 1.7a) y otro de arco redondeado con paredes laterales (figura 1.7d y 1.10). El primero generalmente se construye de hierro estructural o estructura de hierro aleteado (figura 1.13) y el segundo se ha diseñado para aprovechar los caños de desecho de la industria petrolera local (caños tubing, figura 1.14). Los invernaderos de madera presentan en su totalidad techo a dos aguas o techo capilla (Figuras 1.7a , 1.8 y 1.9). Por lo general se emplea madera de álamo extraída de las cortinas rompevientos locales tratada para impedir su degradación, aunque también existen invernaderos de madera de larga conservación. Un tercer tipo de estructura muy difundido es una combinación de postes de madera y techo de caño metálico, denominada estructura combinada (Figura 1.12).

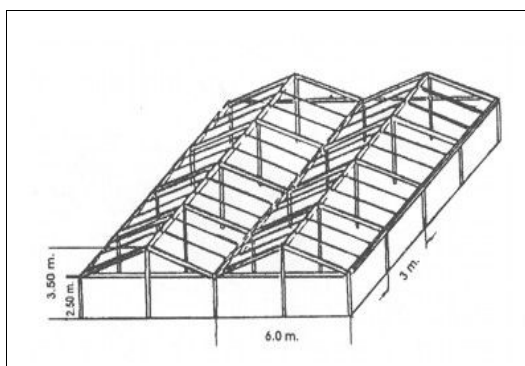


Figura 1.8 : esquema de una estructura de invernadero multicapilla de la Patagonia.

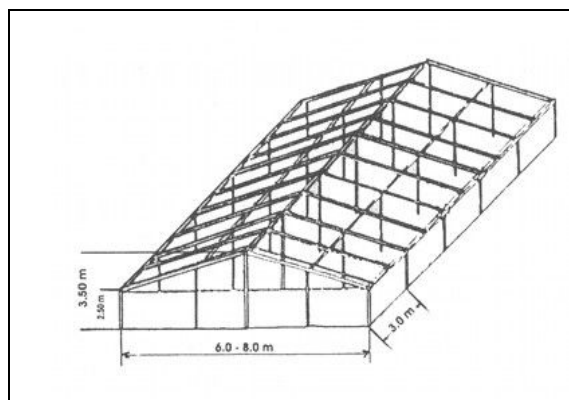
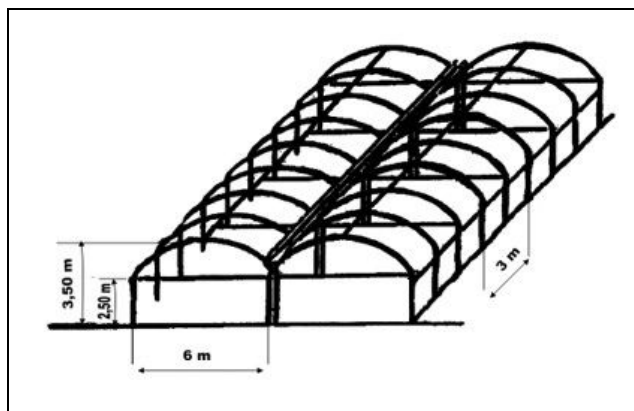


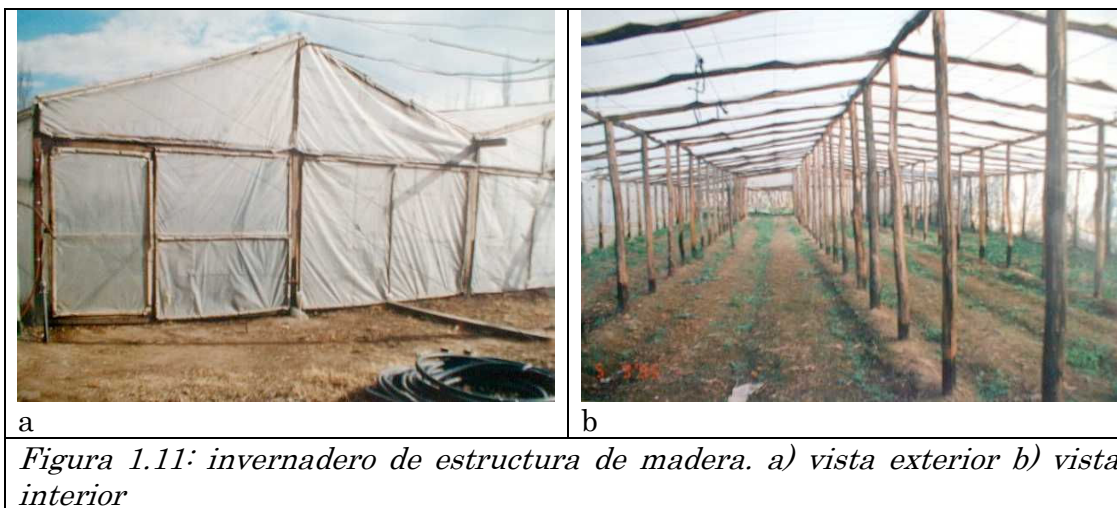
Figura 1.9: esquema de la estructura de un invernadero simple capilla de la Patagonia.



*Figura 1.10: esquema de la estructura de un invernadero semiparabólico de la Patagonia.*

**Estructura de madera:** La más usada por los productores que recién se inician. Son de techo a dos aguas con postes de álamo sulfatado o madera dura (por ej. anchico colorado). La principal ventaja es la menor inversión inicial, pero que en un proyecto a varios años presentan la desventaja de su corta duración y su difícil manejo.

Dimensiones más comunes : 12 metros de ancho en una nave o en dos naves de techo a dos aguas y 40-50 metros de largo, con 3,20 m a cumbrera y 2,20 m en los laterales. Los postes se colocan cada 3 metros lo cual provoca un importante sombreado de los cultivos (Figuras 1.8, 1.9 y 1.11).



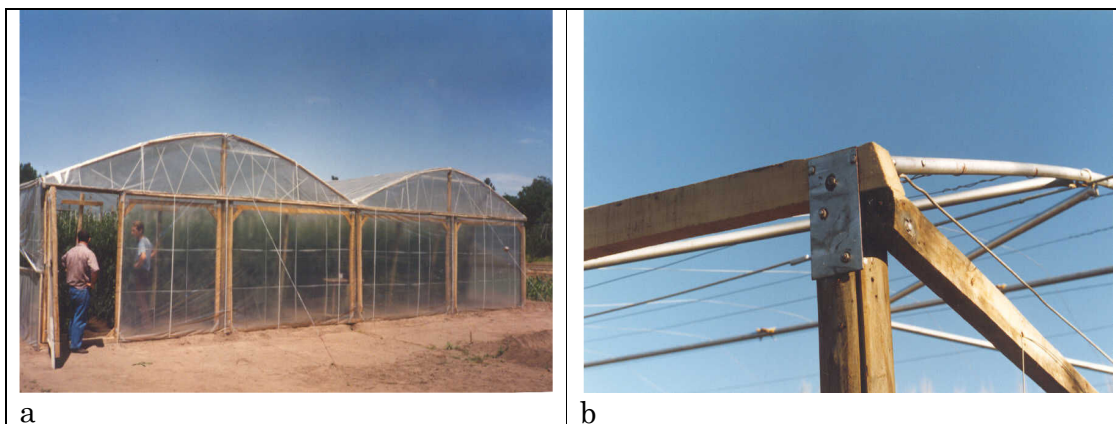
*Figura 1.11: invernadero de estructura de madera. a) vista exterior b) vista interior*

**Estructura combinada:** Adoptada también por productores que se inician en la actividad se caracteriza por postes de madera y cabreadas metálicas. Es más eficiente que la anterior debido a la mayor vida útil de la estructura y de la cubierta ya que se puede tensar mejor el polietileno.

En general se disponen en baterías de módulos de 5.5 a 6 m de ancho, totalizando 11-12 metros de ancho y 50-60 metros de largo, con una altura de 2.5 metros en los laterales y 3.5 metros en cumbrera. Los postes laterales principales se colocan cada 4 m

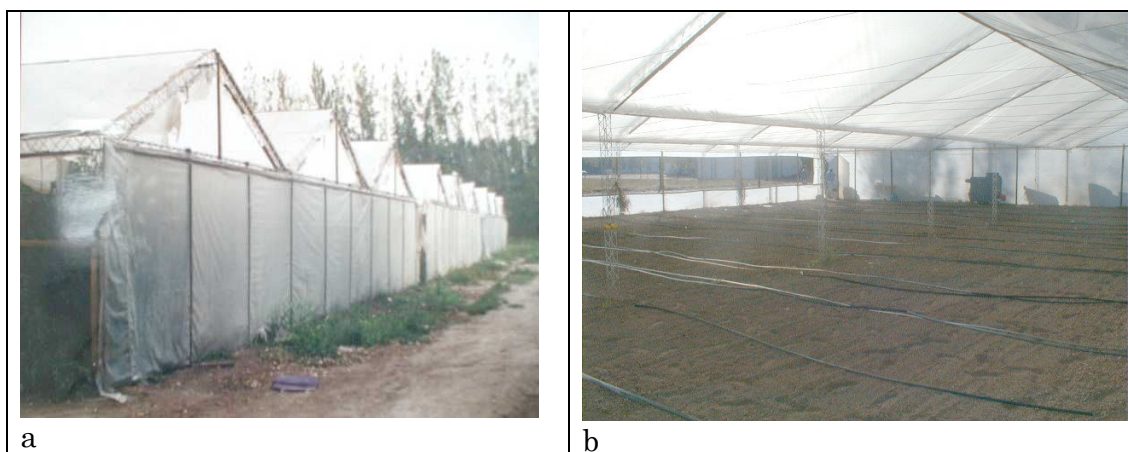


coincidiendo con los arcos metálicos del techo. En el medio se colocan postes de menor diámetro que sirven para soportar el techo y dar resistencia a la estructura (Figura 1.12).

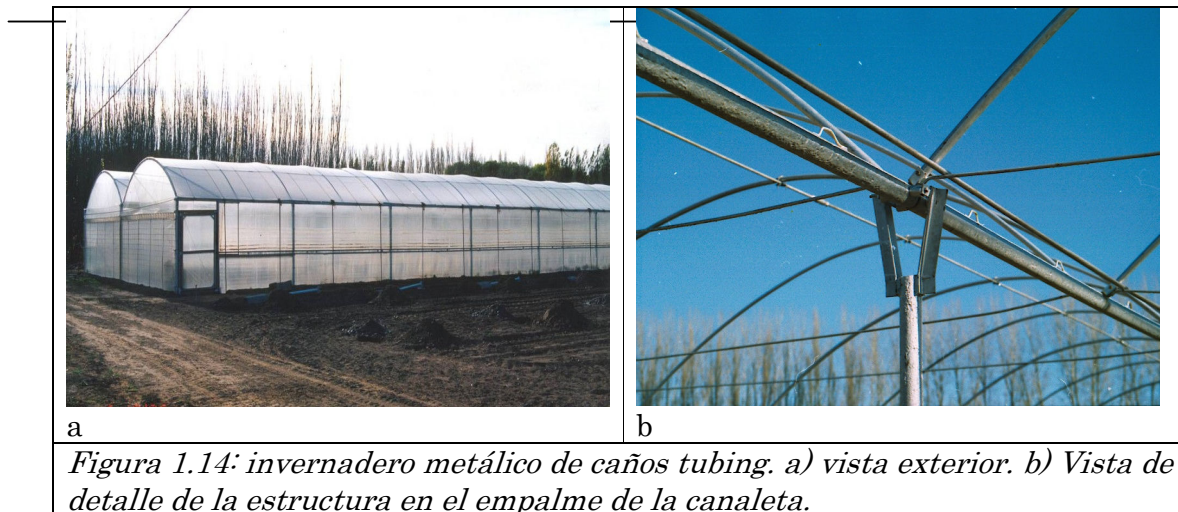


*Figura 1.12: invernadero de estructura combinada. a) vista exterior. b) detalle constructivo del empalme de las columnas de madera con las cabreadas metálicas del techo.*

**Estructura metálica:** Los productores que ya han adquirido experiencia en la actividad optan por estructuras metálicas, en mayores superficies cubiertas medias por productor que las anteriores. Las mismas respetan las dimensiones mencionadas, existiendo dos tipos de construcción: **a) estructura hierro de construcción** soldado en forma aletadas con techo capilla (Figura 1.13) y **b) estructura de tubos** de extracción de petróleo, tubing, reciclados de 3 pulgadas de diámetro con paredes de 6 mm de espesor (Figura 1.14). El techo es parabólico. Esta estructura se caracteriza por su fácil armado ya que las piezas se ensamblan sin necesidad de mano de obra especializada.



*Figura 1.13: Invernadero metálico de estructura soldada. a) vista exterior. b) vista interior con cubierta doble.*



El 41 % de la superficie son estructuras metálicas, el 39% de madera y el 20% combinadas, pero solo el 20% de los productores tienen estructura metálica, el 33% tiene estructura combinada y el 47 % de madera, esto se relaciona con el tamaño de las explotaciones y el tiempo que los mismos llevan en la actividad. En cuanto al uso de calefacción, el 80 % son invernaderos calefaccionados y el 20 % fríos.

### *1.5. Conclusiones*

Los invernaderos del norte de la Patagonia son adaptaciones de modelos mediterráneos ajustados a las condiciones climáticas locales, principalmente el viento, que obliga a diseñar estructuras reforzadas.

La ventilación es casi exclusivamente lateral, mediante cortinas enrollables, ya que el empleo de una doble cubierta de techo complica diseños con ventilación cenital.

Los invernaderos del norte patagónico no cubren superficies totales superiores a 5000 m<sup>2</sup>, siendo superficies compuestas por módulos entre 6 y 6.5 metros de ancho con alturas promedio a canalón de 2.5 metros y altura promedio a cumbre de 3.5 metros.

El principal ciclo de cultivo es durante la primavera-verano siendo el tomate la especie más difundida, las bajas temperaturas al inicio del ciclo obligan al aporte suplementario mediante sistemas de calefacción por lo general de aire forzado.

### *1.6. Bibliografía*

Alvarez, A.J.; García L.; Iglesias, N.; Nolting J.; Sansinanea, A; Villarreal. P1997. Estudio técnico-económico de parcelas fruti-hortícolas del Ente Provincial del Río Colorado (La Pampa). Documento principal. EPRC-INTA EEA Alto Valle. 83pp

- Ayala, C.; Iglesias, N.; Frattini, M.; Villarreal, P. 1995. Análisis económico de las principales estructuras de invernáculo del Alto Valle. Res. XVIII Congreso Argentino de Horticultura. Santiago del Estero. 11-14 set 1995 (231)
- Bonet Martínez, J.; Monera Olmos, R.V. 1992. (El viento, prevención de sus daños en agricultura). *Agrícola Vergel* XI- 125 (349-357)
- Bot, G.P.A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. PhD. dissertation. Agric. Univ. Wageningen
- Bouzo, C.; Pilatti, R.; Gauchat, J.M. Alcober, C. 1994. Diseño y desarrollo de un sistema de calefacción para invernáculos. Res. XVII Congreso Arg. y VI Latinoamericano de Horticultura. Córdoba. (23)
- Carluccio, C.; Lenscak, M.; Panelo, M.; Colombo, M.; Cáceres, S.; Molina, N.; Scaglia, E.; Pernuzzi, C. 2002. Desarrollo actual de los cultivos protegidos en la República Argentina. En: Díaz Alvarez, R. y J. López Gálvez. Ed. Situación de la Agroplasticultura en Países Iberoamericanos. Tercera Reunión de Coordinación en Caracas, Venezuela. Cytel, Almería, España. Setiembre 2002. p. 30-71.
- CENSAR 93- 1993. Ministerio de Economía de la Provincia de Río Negro- Argentina
- Censo Fruti-Hortícola. 1994. Ministerio de la Producción. Provincia de Neuquén- Argentina
- FAO. 2002. Dirección de Producción y Protección Vegetal 90. Manual preparado por el Grupo de Cultivos Hortícolas. Dirección de Producción y Protección Vegetal. Roma, 2002
- FAO. 2003. Evaluación de la degradación de la tierra en zonas áridas. LADA. Land degradation assessment in drylands. Roma.
- Francescangeli, N. 1994. El invernáculo. en: 2º Curso a distancia de producción de hortalizas en invernáculo. Mod.2. INTA San Pedro.
- Iglesias, N.; Frattini, M. 1995. Situación de la producción hortícola bajo cubierta en el Alto Valle de Río Negro y Neuquén. Res. XVIII Congreso Argentino de Horticultura. Santiago del Estero. (246)
- Iglesias, N.; Frattini, M. 1996. Los invernáculos del Alto Valle: relevamiento de las estructuras y análisis económico de las principales alternativas. Actas IV Congreso Argentino y II Internacional de Ingeniería Rural- Neuquén. Argentina. Tomo II- (817-822)
- Iglesias, N. 1998. La horticultura en la Patagonia Norte. INTA EEA Alto Valle. Documento interno.
- Iglesias, N.; Merlo, V.; Romagnoli, S. 2001. Hortalizas frescas: Tendencias, mercados, costos y estrategias productivas para la producción bajo cubierta en la Patagonia Norte. INTA. EEA Alto Valle 52 pp.
- Iglesias, N. 2002. Producción de hortalizas bajo cubierta: Estructuras y manejo de cultivo para la Patagonia Norte. Boletín de Divulgación Técnica N° 49 INTA EEA Alto Valle 90 pp
- INDEC. 2001. Argentina. Población total por sexo, razón de masculinidad y densidad de población, según provincia. Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos. Buenos Aires. <http://www.indec.mecon.ar>
- INTA-GTZ. 1999. Fruticultura Moderna: Tecnología, transferencia, capacitación, organización, 9 años de cooperación técnica.
- Schaljo, E. 1992. Perspectivas regionales y mercados potenciales. Propuestas para los cultivos protegidos. En: Curso internacional de cultivos protegidos. INTA



**ANEXO I**  
**ESTADISTICAS CLIMATOLOGICAS ESTACION METEOROLÓGICA INTA**  
**E.E.A. ALTO VALLE. Río Negro. Patagonia. Argentina.**  
 Lat.39°01' S. Long.67°40' w. Elevación: 242 m.

<i>Variables</i>	<i>Unidades</i>	<i>Serie</i>	<i>Ene.</i>	<i>Feb.</i>	<i>Mar.</i>	<i>Abr.</i>	<i>May.</i>	<i>Jun.</i>	<i>Jul.</i>	<i>Ago.</i>	<i>Sep.</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Dic.</i>	<i>Anual</i>
<b>Temp. max. med.</b>	'c.	1923-87	31.1	29.8	26.7	22.1	16.8	13.0	13.1	16.0	19.1	23.0	26.7	29.6	<b>22.2</b>
<b>Temp. min. med</b>	'c.	1923-87	12.9	11.6	8.9	5.1	2.1	-0.1	-0.8	0.1	2.9	6.1	9.4	13.6	<b>6.0</b>
<b>Temp.Med.</b>	'c.	1923-87	23.6	22.2	18.9	14.0	9.7	6.4	6.6	8.2	11.7	15.8	19.7	22.4	<b>15.0</b>
<b>Temp. max. abs.</b>	'c.	1923-87	42.0	40.0	40.2	40.0	31.2	27.3	27.3	29.0	34.3	38.6	40.0	40.5	<b>42.0</b>
<b>Temp. min. abs.</b>	'c.	1923-87	-0.6	-1.7	-5.5	-7.3	-12.7	-12.6	-13.2	-12.5	-12.5	-5.0	-3.0	-2.4	<b>-13.2</b>
<b>Ampl. Term. med.</b>	'c.	1923-87	18.2	18.2	17.8	17.0	14.7	13.1	13.9	15.9	16.2	16.9	17.3	16.0	<b>16.3</b>
<b>Nº días c/heladas.</b>		1923-87	0.02	0.03	0.32	3.25	9.46	16.46	19.11	14.85	7.11	1.38	0.12	0.03	<b>71.90</b>
<b>PP. med.</b>	mm	1923-87	17.2	12.4	21.9	16.6	18.2	16.1	15.7	11.3	12.7	22.2	16.5	16.9	<b>197.7</b>
<b>Nº días c/pp</b>		1923-87	2.2	2.3	2.6	3.1	5.0	4.6	4.3	2.9	3.2	3.7	2.9	2.4	<b>39.2</b>
<b>Vel.med.vto.2mts.</b>	km/h	1971-87	6.6	6.0	4.8	4.3	4.5	4.8	4.9	5.9	6.5	6.7	7.3	6.6	<b>5.7</b>
<b>Evap.med.</b>	mm/d	1965-87	7.1	6.5	4.5	3.0	1.6	1.3	1.2	2.6	3.3	4.6	6.0	6.9	<b>4.1</b>
<b>H.R.med</b>	%	1965-87	47.0	51.0	58.0	63.0	67.0	69.0	67.0	59.0	51.0	50.0	47.0	45.0	<b>56.0</b>
<b>Hel.ef.m.</b>	horas	1968-87	10.9	10.3	8.5	6.9	4.9	4.1	4.2	5.8	6.9	8.3	10.0	10.6	<b>8.3</b>
<b>T.min.a.s/a1.5</b>		1965-87	1.8	-0.1	-3.8	-6.0	-11.5	-13.7	-11.5	-11.5	-9.5	-6.0	-4.5	-2.0	<b>-13.7</b>
<b>T.s.0.05</b>		1971-87	25.5	23.9	19.8	14.6	9.8	6.2	5.6	7.7	11.6	10.3	20.7	24.0	<b>15.5</b>
<b>T.s.0.10</b>		1971-87	24.8	23.2	19.8	14.7	9.9	6.4	5.6	7.5	11.2	15.7	20.1	23.4	<b>15.2</b>
<b>T.s.0.20</b>		1971-87	24.4	22.8	19.7	15.0	10.5	7.2	6.2	7.6	11.1	15.2	19.4	22.6	<b>15.1</b>
<b>T.s.0.50</b>		1884	23.4	22.5	20.8	16.7	12.7	8.9	8.1	8.8	11.1	15.3	18.3	20.2	<b>15.6</b>

Fuente: Área Agrometeorología INTA EEA Alto Valle

---

---

*Capítulo 2: Caracterización del clima de los invernaderos de la Patagonia Norte*

---

---

“...pare, que el camp ja no és el camp”  
J.M. Serrat

## *2.1. Introducción*

Como se ha explicado en el capítulo anterior, la tecnología de producción bajo cubierta del norte de la Patagonia, buscando conjugar los costos de la adaptación de tecnología con la rentabilidad de los cultivos, centra su producción fundamentalmente la oferta de tomate como primicia de primavera-verano, en el mercado regional. Esto significa un ciclo de cultivo entre agosto y enero como meses extremos. Durante el resto de los meses se suele cultivar especies de menor demanda de temperatura, como por ejemplo apio, acelga, espinaca y lechuga (Iglesias 1996).

Siendo el tomate la principal actividad económica y teniendo que competir con productos procedentes del norte del país, lugar en el cual los costos de producción son menores, la producción de tomate bajo cubierta en estas condiciones climáticas extremas obligan a buscar formas de reducir el uso del combustible empleado para la calefacción de los meses fríos y lograr buena captación de luz que permita optimizar los rendimientos (Cockshull, 1988).

Es práctica común en la región trasplantar desde fines de julio a mediados de agosto y mantener las temperaturas nocturnas en rangos entre 4-7°C cuando las temperaturas externas son inferiores a 0°C buscando así mitigar los costos demandados por la calefacción, esto repercute negativamente en los niveles productivos, fundamentalmente de los racimos inferiores de tomate que permiten la primicia en mercado.

Para una evaluación económica de la tecnología de invernadero es esencial determinar cuales son las condiciones climáticas que puedan limitar o reducir la potencialidad productiva del cultivo.

## *2.2. Objetivo*

La finalidad de este capítulo es caracterizar parámetros microclimáticos de un invernadero típico de la región Patagonia Norte que puedan llegar a limitar la productividad dentro del mismo.

### 2.3. Antecedentes

#### 2.3.1. Relación cultivo-condiciones microclimáticas

La temperatura es un factor determinante de la actividad metabólica y el crecimiento y desarrollo de los vegetales. En invernaderos no automatizados es difícil lograr mantener los valores de temperatura dentro de los rangos óptimos, por lo cual los procesos de crecimiento pueden ralentizarse y comprometer los niveles y calidad de la producción. Por otro lado, los cambios bruscos de temperatura también producen cambios bruscos en los procesos metabólicos lo cual también compromete la productividad (Lorenzo, 2001).

Las temperaturas óptimas nocturnas para el cultivo de tomate en invernadero varían entre 10-14 °C y las diurnas entre 17-25°C. de Koning (1988) determinó que las temperaturas mayores, dentro del rango mencionado, mejoran el crecimiento de los frutos tempranos a expensas del desarrollo vegetativo. Grange y Andrews, (1993) determinaron que el tamaño final del fruto (a madurez) es proporcional al máximo ratio de incremento de peso fresco/tiempo, aproximadamente 40 días después de antesis, relacionándose con el máximo crecimiento en diámetro, entre 15-20 días después de antesis. Según Grange (1995), la tasa de crecimiento de los frutos de tomate varía con las variaciones de la temperatura del mismo. Por su parte, posteriormente, de Koning (2000) describe la tasa de desarrollo de los frutos en función lineal de la temperatura.

Trabajos en cultivos hortícolas bajo cubierta realizados en España (Castilla y col. 1988, 1998), comparando invernaderos de techos de distintas formas obtuvieron resultados que demostraban mayor calidad y producción relacionados con una mayor luminosidad

En experiencias realizadas con plantas jóvenes de tomate, Bruggink y Heuvelink (1987) verificaron una fuerte relación entre la luz recibida por la planta, el desarrollo vegetativo y la asimilación de fotonitratos. Por su parte Schoch y col. (1990) determinaron los efectos de la luz y las temperaturas nocturnas sobre el incremento del diámetro del tallo en tomate. Los resultados del trabajo de estos últimos autores confirmaron que el crecimiento en diámetro del tallo durante el estado vegetativo fue proporcional al aumento de luz que recibe la planta.

Trabajos realizados sobre pimiento (Yao y col. 2000) demostraron que los cambios en los diámetros del fruto están estrechamente relacionados con la radiación, observándose que en frutos ubicados a la sombra los cambios fueron mayores que aquellos desarrollados en lugares más iluminados. Los



autores concluyeron que aquellos factores que afectan la transpiración foliar, tales como la radiación solar, el déficit de vapor de agua, la temperatura del aire y el estrés hídrico, afectan el crecimiento del fruto.

Trabajos tendientes a determinar los efectos de los factores ambientales de la orientación E-O con respecto a la orientación N-S en un cultivo de pepino (Hwa-sung Cheng y col.1977) establecieron que la tasa de crecimiento del cultivo no mostraron diferencias, la tasa de asimilación neta creció en los primeros períodos independientemente de la orientación y decreció luego, pero encontraron diferencias del índice de área foliar (LAI) y altura de plantas con respecto a la ubicación norte o sur de las filas en los invernaderos E-O. La distribución de la temperatura dentro del invernadero es uno de los factores que inciden sobre la uniformidad del cultivo. Existen estudios que han determinado la relación de la temperatura y los procesos metabólicos, de crecimiento y fructificación del tomate (Heuvelink, 1995, 1996; Sauser y col. 1998; Baptista y col, 2001).

Zhao y col. (2001), estudiaron la variación vertical de la temperatura y humedad en invernaderos ventilados naturalmente. Los autores observaron gradientes verticales de temperatura y humedad que se relacionan a la edad del cultivo y apertura de las ventanas (cenitales y laterales), siendo más notorio cuando el cultivo está más desarrollado. Experiencias realizadas por Sato y col. (2003) permiten determinar que la temperatura media diurna superior a 26-28°C influye negativamente sobre la formación del grano de pólen y por lo tanto impide el normal desarrollo de frutos, incrementándose la proporción de frutos partenocárpicos.

Pearce y col. (1993), estudiaron la influencia de ambos factores, radiación y temperaturas, sobre la tasa de crecimiento de frutos jóvenes de tomate. Los autores determinaron que la expansión del fruto estaba fundamentalmente relacionada al incremento de temperatura mientras que la radiación se relacionaba con procesos de fotosíntesis y disponibilidad de fotoasimilados. Por otro lado, la tasa de crecimiento del fruto mostró una disminución con bajos rangos de radiación integral diaria (6 MJ/m<sup>2</sup>/día de radiación fotosintéticamente activa).

Aunque la humedad es difícil de controlar en condiciones de invernadero no automatizados, es importante considerar los efectos de este factor sobre la calidad de los frutos. Bertin y col. (2000), observaron cambios en el rendimiento y calidad de frutos frescos de tomate a lo largo de la temporada de cultivo relacionados al déficit de presión de vapor (DPV). Por ejemplo, mientras que bajo condiciones de bajo DPV se observan menores pérdidas por fisiopatías como Blossom End Rot (BER), aumenta la cantidad de frutos rajados y por otro lado estas condiciones afectan negativamente sobre el contenido de azúcares y materia seca de los frutos.

Experiencias realizadas sobre desarrollo de frutos y productividad de plantas de tomate en el sector norte y sector sur de un invernadero en el norte de la Patagonia (Iglesias y col., 2003) permitieron establecer que no existen diferencias de desarrollo de plantas ni de rendimientos entre el sector norte y sector sur del invernadero, evidenciándose, a lo largo de la temporada de cultivo, diferencias en el tamaño final de los frutos siendo mayores los comprendidos en los racimos intermedios debido a condiciones climáticas más favorables a los procesos metabólicos del vegetal.

### *2.3.2. Radiación*

La transmisión de la radiación solar a través de la cubierta influirá tanto en el balance energético del invernadero, como en la actividad fotosintética del cultivo, pudiendo ser el factor más limitante en las latitudes comprendidas en la Patagonia. La radiación se divide en radiación de onda corta, la cual se emite entre una longitud de onda de 0.3 y 2.5  $\mu\text{m}$  comprendiendo radiación ultravioleta (0.300-0.380  $\mu\text{m}$ ), visible (0.380-0.760  $\mu\text{m}$ ) e infrarroja solar (0.760-2.500  $\mu\text{m}$ ).

La radiación utilizada por las plantas para los procesos fotosintéticos y consecuentemente sobre el crecimiento del cultivo, es la comprendida entre los 0.400 y 0.700  $\mu\text{m}$ . Por otro lado, desde el punto de vista del estudio del balance de energía en el invernadero y las pérdidas de energía nocturna, las cuales establecerán las necesidades de calefacción del invernadero, es necesario considerar la radiación de onda larga, comprendida en el rango 5-40  $\mu\text{m}$ .

Las pérdidas por radiación del invernadero dependen de las propiedades de emisividad y transmisividad del material de cubierta en las longitudes de onda de la radiación térmica entre 2.5 y 40  $\mu\text{m}$  (Muñoz y col. 1998). Emisividad es la propiedad del material para emitir una radiación ya absorbida por el mismo y transmisividad es la propiedad del material que determina su capacidad para dejar pasar la radiación térmica o infrarroja. Estos aspectos serán específicamente analizados en el capítulo 3 de esta tesis.

### *2.3.3. Requerimientos térmicos para los principales cultivos hortícolas*

Los procesos fisiológicos de los vegetales están íntimamente ligados con la temperatura. Si la temperatura ambiente está por encima o por debajo de dichos valores se ven comprometidos aspectos relacionados con la floración, fructificación, desarrollo y crecimiento de células, en definitiva, afectan la producción, pudiendo incluso producir muerte del vegetal.

***Tesis Doctoral. Estudio de condiciones térmicas y lumínicas y determinación de alternativas tecnológicas para el ahorro de energía en invernaderos de la Patagonia Norte - Argentina***

---

En la tabla 2.1. se muestran valores de temperatura óptimas durante el día y la noche. Estos valores son orientativos ya que pueden variar dentro de las especies, variar incluso con las variedades.

***Tabla 2.1. Valores óptimos de temperatura para diferentes cultivos (Tesi, 1969; en Montero y Antón, 1993).***

Espece	T° óptima nocturna (°C)	T° óptima diurna (°C)
Tomate	13-16	22-26
Pepino	18-20	24-18
Melón	18-21	24-30
Calabaza	15-18	24-30
Chaucha (Judía verde)	16-18	21-28
Pimiento	16-18	22-28
Berenjena	15-18	22-26
Lechuga	10-15	15-20

Para determinar las necesidades de aporte calórico al invernadero es imprescindible considerar el incremento térmico, diferencia entre la temperatura interna ( $T_i$ ) y la temperatura externa ( $T_e$ ), usándose como la temperatura considerada óptima para el cultivo. Los diferentes estado de desarrollo de los cultivos presentan requerimientos de temperatura diferenciales (tabla 2.2), los valores aquí expuestos sirven de orientación para los cálculos de calefacción sin representar valores específicos para situaciones específicas de cultivo.

***Tabla 2.2. Valores óptimos de temperatura para diferentes cultivos (Urban, 1997)***

Espece	T° óptima nocturna	T° óptima diurna (°C)	Observaciones
Berenjena	21	22	Hasta 8 semanas después de plantación
	19	21	Hasta final de cultivo
Pepino	21	23	4 semanas antes de plantación Plantas hasta 2-6 semanas
	20	22	Durante las 6 semanas siguientes
	19	21	Hasta final de cultivo
Lechuga	10	10	2 semanas antes de plantación Durante las 6 semanas siguientes
	6	12	Hasta final de cultivo

Tomate	20	20	1 semana antes de plantación Plantas hasta 4 semanas
	18.5	19.5	Durante las 5 semanas siguientes
	17.5	18.5	Hasta final de cultivo
Pimiento	20	23	3 semanas antes de plantación Plantas hasta 8 semanas
	18	22	Hasta final de cultivo

#### 2.4. Materiales y métodos

Durante los meses de primavera-verano de los años 2001, 2002 y 2003, y otoño de 2002 y 2004 fueron realizados registros de datos del microclima de un invernadero representativo de los modelos locales. La experiencia se llevó a cabo en un invernadero multicapilla de 19.5 metros de ancho por 24 metros de largo de 2.50 metros de altura al canalón y 3.80 de altura en la cumbre. La cubierta del mismo es de polietileno LDT de 150  $\mu\text{m}$  de espesor comprendiendo un doble techo de polietileno cristal, (polietileno normal-PE- en la bibliografía ( Muñoz y col, 1998), de 80  $\mu\text{m}$  de espesor colocado a 10 cm. del techo externo y su orientación en el sentido de la cumbre es E-O. El mismo no presenta ventilación cenital sino ventanas laterales a lo largo de toda la estructura (Figura 2.1).



Figura 2.1. Vista lateral del invernadero triple capilla ubicado en INTA EEA Alto Valle.

Durante el período primavero-estival se cultivó tomate para realizar el registro de datos en condiciones normales de manejo del clima y de cultivo. El cultivo de tomate se realizó en el sentido N-S a partir de plantas trasplantadas en el estado de segunda hoja verdadera a una distancia de 0.90 metros entre filas y 0.30 metros entre plantas. El suelo del invernadero se caracteriza como tipo acuícambids fluventico, según el sistema de clasificación de Séptima aproximación (USDA 1976), con un horizonte

superficial con un contenido de Arcilla 27,2, limo 40,1 y arena 32,7%, textura: franco. Presenta 2,05 % de materia orgánica y pH 7,2. (Sanchez 2004). El mismo se mantiene, durante el período de cultivo cubierto con polietileno negro de 200  $\mu$  (mulch). El fertirriego se programa de acuerdo a estado fenológico y requerimientos del cultivo.

Las prácticas de manejo del cultivo que se realizaron fueron las típicas de la zona en lo que respecta a desbrote de brotes laterales, deshoje por debajo del racimo maduro y despunte del ápice apical después del séptimo racimo para detener el crecimiento de la planta.

Se realizaron registros de clima de temperatura, humedad relativa y radiación tanto en el exterior de la estructura, con sensores ubicados según se puede observar en el Anexo 2.1.

#### *2.4.1. Instrumental empleado*

*Radiación:* se efectuaron registros de global y neta, externa e interna empleándose sensores de Radiación Global Delta\_T ES2 y Sensores de Radiación Neta Delta-T NR2

*Temperatura y HR:* se recolectaron datos de Temperatura y HR de aire externa e interna en los tres sectores del invernadero (norte, centro y sur) a 1m y a 2m en el centro de la estructura. Para realizar los registros se emplearon sensores de HR tipo capacitor y de temperatura de aire tipo termistor .

También se registraron temperaturas de suelo interno y externo, durante los años 2001 y 2002 se recolectaron datos de temperaturas a distinta profundidad en el suelo debajo del mulch, temperatura sobre el mulch y temperatura del suelo en el exterior del invernadero. Durante la temporada primavera-verano de 2003 y otoño 2004 se tomaron datos de suelo con mulch y suelo sin mulch, dejando una superficie de 4 m<sup>2</sup> del suelo del invernadero sin cubrir con la cubierta.

También se efectuaron registros de la temperatura de la cubierta exterior y de la cubierta interior. Para el registro de datos de temperatura de suelo y cubierta se usaron termopares de cobre constantán.

Los datos se registraron con un Data Logger Delta-T modelo DL2e- Versión 2.02 programado para almacenar cada 10 minutos datos promedio de cada minuto de lectura siendo los mismos procesados con el programa Excel de Microsoft® XP. La disposición de los sensores se pueden observar en el Anexo 1 al final del presente documento.

## 2.5. Resultados y discusión

### 2.5.1. Radiación

La región se caracteriza por valores de radiación total en días despejados que oscilan entre 700 a 1000  $W \cdot m^{-2}$  durante el período de cultivo primavera estival y entre 400 y 600  $W \cdot m^{-2}$  para mayo y junio. Para los mismos períodos, dentro del invernadero la radiación total registrada fue entre 550 y 780  $W \cdot m^{-2}$  para el período primaveral y entre 300 y 500  $W \cdot m^{-2}$  para mayo y junio. En el Figura 2.2. pueden observarse las fluctuaciones horarias diarias de la radiación total y la radiación neta, el desplazamiento de los picos de máxima radiación respecto a la hora del día se debe a ser al desplazamiento del lugar geográfico en el cual se han realizado las observaciones ( $67^{\circ}40' w$ ) respecto al paralelo de referencia ( $45^{\circ} w$ ), lo cual equivale a un desplazamiento de la hora solar de 1 hora 40 minutos después del mediodía horario.

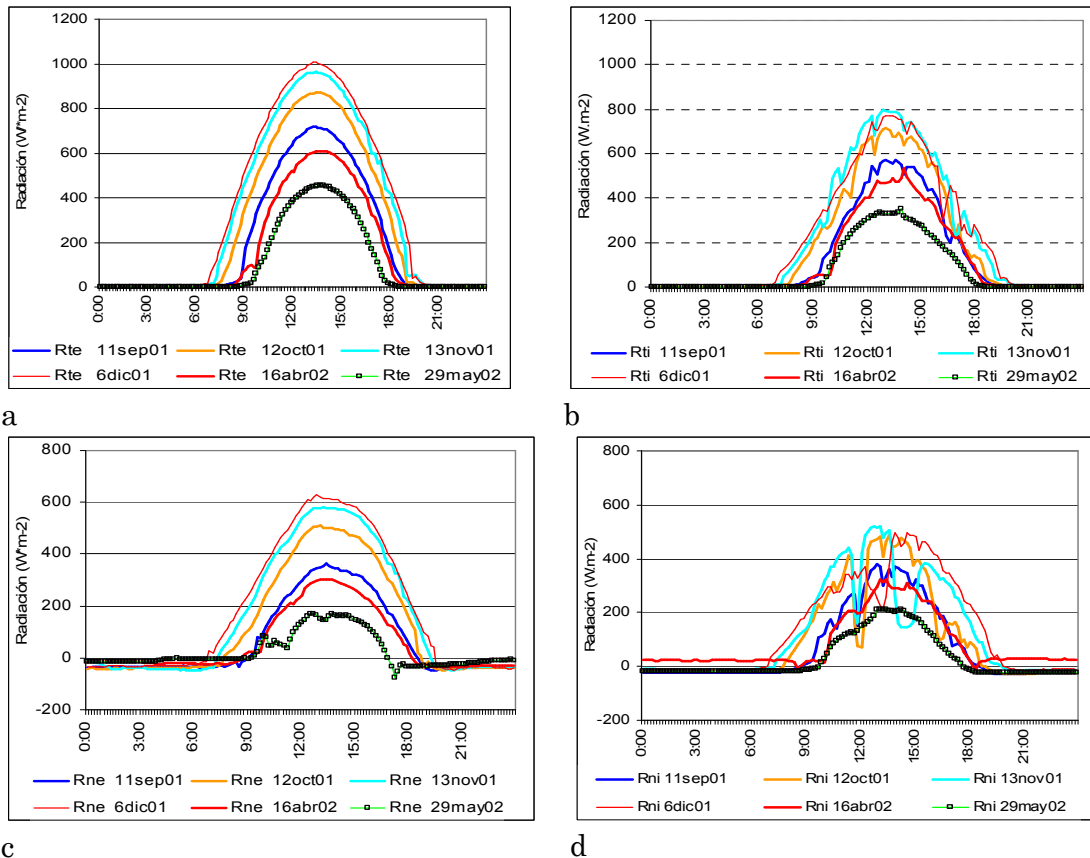


Figura 2.2- Curvas de radiación total ( $R_t$ ) y neta ( $R_n$ ) ( $W \cdot m^{-2}$ ) en el exterior (e) e interior (i) del invernadero para días despejados de septiembre, octubre, noviembre, diciembre del 2001 y abril y mayo del 2002. a: radiación

***Tesis Doctoral. Estudio de condiciones térmicas y lumínicas y determinación de alternativas tecnológicas para el ahorro de energía en invernaderos de la Patagonia Norte - Argentina***

---

*total externa, b: radiación total interna, c: radiación neta externa y d: radiación neta interna.*

Por otra parte, los valores de radiación neta externa diurna oscilaron entre 350 y 620 W\*m<sup>-2</sup> durante los meses de primavera y 160 y 300 W\*m<sup>-2</sup> para abril y mayo. Durante la noche se registraron valores negativos propios de la radiación térmica aportada por el invernadero (en el caso de la lectura externa) y el suelo del invernadero (en el caso de la lectura interna).

Teniendo en cuenta que las fechas mencionadas corresponden a días despejados pueden considerarse representativas para estimar la acumulación de luz dentro del invernadero, se calculó la radiación acumulada durante el día. Estimando que el 50% de dicha radiación corresponde al espectro de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) (Szeicz 1974, citado por Cockshull, 1988) se puede observar el incremento de dichos valores a medida que avanza la primavera, como así también los bajos valores de radiación PAR durante el otoño ( tabla 2.3.).

*Tabla 2.3 : valores de radiación total interna (Rti) y radiación fotosintéticamente activa (PAR), dentro del invernadero, en días despejados de primavera y otoño.*

Fecha	Rti (Mj*m <sup>-2</sup> *día <sup>-1</sup> )	PAR (Mj*m <sup>-2</sup> *día <sup>-1</sup> )
11 septiembre 2001	11.88	5.94
12 octubre 2001	16.27	8.13
13 noviembre 2001	19.71	9.85
6 diciembre 2001	20.01	10.05
16 abril 2002	10.33	5.16
29 mayo 2002	6.79	3.39

Según Bruggink y Heuvelink (1987) el incremento de radiación a lo largo de la temporada de cultivo se relaciona con una mayor tasa de crecimiento vegetativo de las plantas de tomate, sobre todo en su etapa juvenil. Este efecto también fue observado en cultivos de tomate realizados en invernadero en el norte de la Patagonia (Iglesias y col. 2003), observándose una mayor tasa de crecimiento inicial en las plantas del sector norte. Esto podría estar relacionado a la mayor incidencia de la luz en los primeros meses ya que debido a la latitud el ángulo de inclinación del sol es bajo y las plantas ubicadas en el sector norte reciben inicialmente más luz. Estos efectos no se vieron traducidos en una mayor productividad.

La integral de luz diaria se relaciona, según Pearce y col. (1993), con el crecimiento de los frutos. Según los autores dicha tasa decrece significativamente cuando la integral diaria de radiación PAR es menor de 6 Mj\*m<sup>-2</sup>\*día<sup>-1</sup>. Esto explica resultados obtenidos por Iglesias y col. (2003) al

evaluar el crecimiento de frutos de tomate durante la temporada primavera-verano en el Alto Valle de Río Negro (Patagonia), verificándose mayores tamaños y consecuentemente mayor a partir del 2º racimo.

De los resultados presentados en la tabla 2.3. se puede deducir que, durante el comienzo del cultivo de primavera y los meses de otoño, los rangos de radiación fotosintéticamente activa dentro del invernadero se presentan como una limitante para la antesis y normal desarrollo de los frutos de tomate (Cocksull, 1988; Pearce y col., 1993), por lo que habría que prever luz suplementaria.

La transmitancia máxima de la radiación total registrada para esas fechas, osciló entre el 76 al 81%, como puede observarse en la Tabla 2.4. Los valores de transmitancia ( $\tau_r$ ) registrados son comparables con los obtenidos por Bot (1983) para un invernadero tipo Venlo multicapilla de vidrio, orientación E-O en la latitud 52ºN aunque son superiores a las registradas por otros autores en invernaderos de polietileno de techo simple a latitudes menores (Muñoz y cols. 1998, Castilla, 1998)

*Tabla 2.4: Registros de radiación total (Rt) y radiación neta (Rn) máximas y la transmitancia (%), para días de cielo despejado. (max: máxima,  $\tau_r$ : transmitancia, e: externa, i: interna) (W.m<sup>2</sup>)*

Fecha	Rt <sub>e</sub> max	Rt <sub>i</sub> max	$\tau_r$ Rt	Rn <sub>e</sub> max	Rn <sub>i</sub> max
11setiembre2001	717.60	574.40	80.04	361.70	332.2
12octubre 2001	871.20	716.80	82.28	508.60	488.10
13noviembre 2001	964.00	796.80	82.66	580.60	520.70
06diciembre 2001	1005.60	770.40	76.61	627.40	498.00
16abril 2002	608.00	472.80	77.76	301.1	299.60
29mayo 2002	456.00	349.80	76.71	186.76	169.5

### 2.5.2. Temperatura del aire

No se observan gradientes de temperaturas entre los sectores norte, centro y sur del invernadero a 1 m de altura (Tabla 2.5.) pero, por otro lado, en el sentido vertical se registró un notorio aumento de la temperatura a 2m debido a que el invernadero experimental, a igual que las estructuras empleadas en la región, no disponen de ventilación cenital, siendo ventiladas solo en forma lateral.



**Tesis Doctoral. Estudio de condiciones térmicas y lumínicas y determinación de alternativas tecnológicas para el ahorro de energía en invernaderos de la Patagonia Norte - Argentina**

Tabla 2.5. Temperaturas promedio ( $T^{\circ}$  prom), máximas ( $T^{\circ}$  max) y Mínima ( $T^{\circ}$  min) de aire ( $^{\circ}$ C) en el centro a 2m (C2m) y 1m (C1m), Norte (N) y Sur (S), en el interior del invernadero. (primavera 2001) y Temperatura promedio exterior.

Temperatura promedio ( $^{\circ}$ C)					
	$T^{\circ}$ promC2m	$T^{\circ}$ promC1m	$T^{\circ}$ promN	$T^{\circ}$ promS	$T^{\circ}$ prom-e
septiembre	15.74	15.27	15.39	14.98	11.82
octubre	18.58	17.66	17.35	17.11	15.38
noviembre	19.65	18.84	18.79	18.37	17.55
diciembre	22.73	21.72	21.56	21.28	20.66
Temperatura máxima ( $^{\circ}$ C)					
	$T^{\circ}$ maxC2m	$T^{\circ}$ maxC1m	$T^{\circ}$ maxN	$T^{\circ}$ maxS	$T^{\circ}$ max-e
septiembre	29.23	27.56	28.95	27.52	18.79
octubre	29.04	26.18	25.32	25.56	22.8
noviembre	30.4	27.67	27.25	27.43	25.8
diciembre	35.63	31.59	31.04	31.06	29.99
Temperatura mínima ( $^{\circ}$ C)					
	$T^{\circ}$ minC2m	$T^{\circ}$ minC1m	$T^{\circ}$ minN	$T^{\circ}$ minS	$T^{\circ}$ min-e
Septiembre	7.59	7.66	7.6	7.33	4.42
octubre	11.03	11.05	10.98	10.57	8.49
Noviembre	10.82	10.85	11.07	10.13	8.8
diciembre	13.01	13.12	13.24	12.49	11.01

En la tabla 2.6. se observan los promedios de temperaturas medias, máximas y mínimas mensuales durante el período de cultivo primavero-estival de los años 2001, 2002 y 2003. La temperatura mínima de encendido del equipo de calefacción fue de  $7^{\circ}$ C para los años 2001 y 2002 mientras que en el año 2003 ese umbral se graduó entre  $9-10^{\circ}$ C, esto se manifestó en las diferencias de temperaturas mínimas internas para las distintas temporadas (datos remarcados en negrita) mientras que los registros de temperatura mínima externa no mostraron grandes diferencias para ese período considerado.

Tabla 2.6 : Promedios de temperaturas media, máxima y mínima interna y externa ( $^{\circ}$ C).

Fecha	Temperatura interna (1 m)			Temperatura externa		
	Media	máxima	mínima	media	máxima	mínima
Septiembre 2001	15.27	27.56	<b>7.66</b>	11.82	18.79	4.42
Septiembre 2002	15.77	26.71	<b>9.43</b>	11.36	18.81	3.69
Septiembre 2003	16.90	28.72	<b>11.34</b>	12.34	19.51	4.86
Octubre 2001	17.66	26.18	11.05	15.38	22.80	8.49
Octubre 2002	16.54	26.57	9.26	14.55	22.83	6.04

## Capítulo 2- Caracterización del clima de los invernaderos de la Patagonia Norte

Octubre 2003	18.79	28.73	12.41	16.38	25.27	7.14
Noviembre 2001	18.84	27.67	10.85	17.55	25.8	8.8
Noviembre 2003	19.74	28.87	11.67	19.51	27.34	10.84
Diciembre 2001	21.72	31.59	13.12	20.66	29.99	11.01
Diciembre 2003	20.46	30.17	12.75	19.90	27.68	11.44

Si se considera que el rango óptimo de crecimiento para las hortalizas cultivadas bajo cubierta está comprendido entre 10°C y 30°C (Montero y Antón, 1993; Urban, 1997) es de esperar que durante el mes de diciembre las temperaturas máximas comprometerían el normal desarrollo de los procesos fisiológicos, aumentando la respiración lo cual puede traducirse en una reducción de la fotoasimilación. Por otro lado, el promedio de temperaturas mínimas durante septiembre responden el planteo del sistema de calefacción del cultivo, encendido automático del sistema a 7°C.

Según Heuvelink (1995), con temperaturas mayores de 18°C se produce un incremento de la tasa de aparición de racimos en la planta de tomate, acortándose de esta manera el tiempo de aparición entre un racimo y el inmediato superior. Observando los datos presentados en la tabla 2.6, estas condiciones se manifiestan a partir del mes de octubre, coincidiendo con observaciones realizadas en evaluación del crecimiento de plantas de tomate en condiciones de invernadero en el norte de la Patagonia por Iglesias y col. (2003).

Tanto el crecimiento de la planta como la tasa de crecimiento de los frutos se ven reguladas por la temperatura. En experiencias realizadas en invernaderos no automatizados, Baptista y col. (2001) observaron un aumento de la tasa de crecimiento de los frutos en relación directa al aumento de temperatura. Según los autores, la formación y crecimiento de los frutos es la principal respuesta de la planta a las variaciones de las condiciones climáticas debido como consecuencia de la demanda de fotoasimilados por parte del fruto y la capacidad de respuesta por parte del vegetal a procesos regulados por el clima.

Considerando los valores de temperatura media nocturna y diurna de la tabla 2.7, durante los meses de noviembre y diciembre se presentan las condiciones óptimas para las mayores tasas de crecimiento del fruto (Araki y col., 2000). Esto reconfirmaría los resultados obtenidos por de Koning (1988), quien determinó que para ese estado de desarrollo del cultivo, el factor determinante sobre el crecimiento de la planta y desarrollo y maduración de los frutos no es la luz sino la temperatura.

### *2.5.3. Temperatura del aire día-noche*

El promedio mensual para temperaturas medias, máximas y mínimas en los diferentes sectores del interior del invernadero han mostrado diferencias de temperatura a distintas alturas durante el día pero durante la noche ese

gradiente desaparece debido fundamentalmente, en períodos fríos, al empleo de la calefacción, y a los períodos más cálidos, al aporte de calor desde el suelo al aire del invernadero. Por otra parte parece no evidenciarse gradientes respecto a las posiciones sur, centro o norte a 1 metro (Tabla 2.7.). Durante el mes de septiembre los valores de temperatura serían inferiores a los óptimos diurnos y nocturnos para el cultivo de tomate.

Los registros permiten afirmar que no existen gradientes de temperaturas en el plano horizontal a 1m de altura dentro del invernadero que llevaran a suponer correcciones en el diseño para mejorar la calidad y productividad del cultivo de tomate conducido hasta el séptimo racimo. Por el contrario se observa un gradiente de temperatura en el plano vertical comprometería la productividad de los racimos superiores.

Las temperaturas que sobrepasan el umbral óptimo inciden en forma negativa sobre la tasa de asimilación neta debido al aumento de la respiración. Según Lorenzo (2001) a partir de 35-40 °C se reduce la síntesis proteica debido a la desnaturalización de proteínas e incremento de la actividad enzimática lo cual explica el proceso de disminución de la producción en los racimos superiores observados en las evaluaciones de Iglesias y col. (2003).

Las pérdidas de productividad en el dosel del cultivo se pueden disminuir, o bien haciendo descender las plantas de tomate recostándolas sobre el suelo, práctica que se ha dejado de implementar debido al aumento del costo de mano de obra, o implementando mejoras en las estructuras como son la implementación de ventanas cenitales para lo cual sería necesario plantear algún tipo de movilidad para permitir el despliegado del doble techo, en forma alternativa, construir invernaderos con mayor elevación a la altura de canaletas.

Otro aspecto a señalar, teniendo en cuenta los datos presentados en la tabla 2.7, es la variación de temperatura del aire. Según Cockshull (1988), considerando como temperatura media diaria óptima 24 °C, si los cambios exceden 2°C, se ve afectada la producción. Debido a que en los invernaderos de la región de referencia del presente trabajo no son automatizados, estas variaciones son un factor más que inciden sobre la potencialidad de la producción de tomate bajo cubierta.

Tabla 2.7. Temperaturas medias ( $T^{\circ} me$ ), máximas ( $T^{\circ} max$ ) y mínimas ( $T^{\circ} min$ ) diurnas (día) y nocturnas (no) en un invernadero para los meses de primavera 2001 en la Patagonia Norte (expresadas en  $^{\circ}C$ )

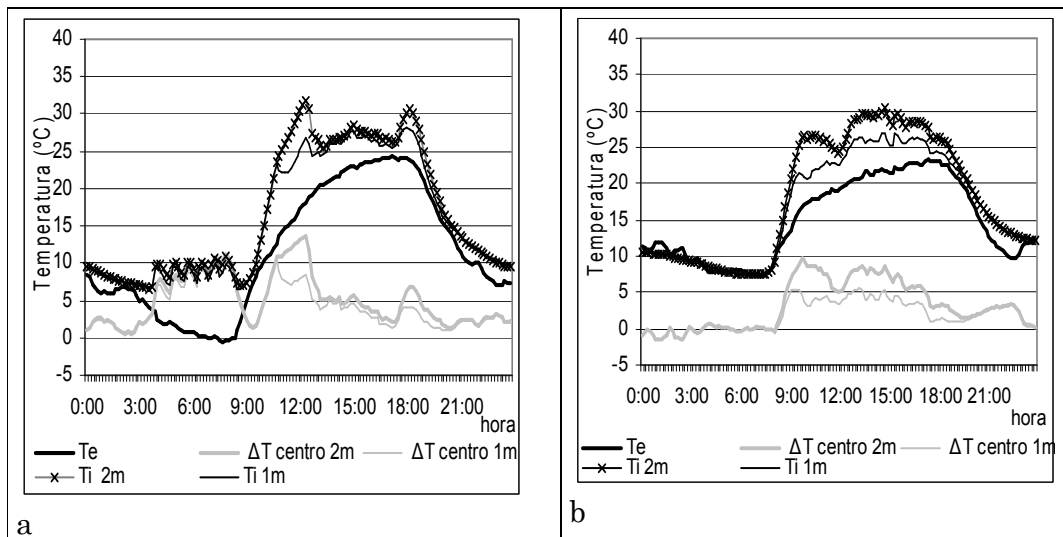
centro 2m						
	$T^{\circ} me-dia$	$T^{\circ} me-no$	$T^{\circ} min-dia$	$T^{\circ} min-no$	$T^{\circ} max-dia$	$T^{\circ} max-no$
Septiembre	20,49	11,30	8,62	7,60	29,23	20,20
Octubre	22,57	14,13	11,70	11,07	29,04	20,53
Noviembre	23,50	14,61	11,31	10,84	30,40	21,49
Diciembre	26,91	16,96	13,23	13,07	35,63	24,76
centro 1m						
	$T^{\circ} me-dia$	$T^{\circ} me-no$	$T^{\circ} min-dia$	$T^{\circ} min-no$	$T^{\circ} max-dia$	$T^{\circ} max-no$
Septiembre	19,60	11,22	8,59	7,68	27,56	18,77
Octubre	20,89	14,07	11,64	11,10	26,18	19,91
Noviembre	22,07	14,58	11,25	10,88	27,67	21,00
Diciembre	25,15	16,96	13,35	13,19	31,59	23,82
Norte 1m						
	$T^{\circ} me-dia$	$T^{\circ} me-no$	$T^{\circ} min-dia$	$T^{\circ} min-no$	$T^{\circ} max-dia$	$T^{\circ} max-no$
Septiembre	19,68	11,37	8,53	7,63	28,95	20,26
Octubre	20,25	14,13	11,48	11,08	25,32	19,99
Noviembre	21,73	14,91	11,43	11,10	27,25	21,19
Diciembre	24,71	17,21	13,40	13,31	31,04	23,87
Sur 1m						
	$T^{\circ} me-dia$	$T^{\circ} me-no$	$T^{\circ} min-dia$	$T^{\circ} min-no$	$T^{\circ} max-dia$	$T^{\circ} max-no$
Septiembre	19,15	11,08	8,51	7,34	27,52	19,66
Octubre	20,25	13,63	11,14	10,60	25,56	19,65
Noviembre	21,65	14,04	10,56	10,15	27,43	20,93
Diciembre	24,72	16,51	12,72	12,54	31,06	23,54
Exterior 1m						
	$T^{\circ} me-dia$	$T^{\circ} me-no$	$T^{\circ} min-dia$	$T^{\circ} min-no$	$T^{\circ} max-dia$	$T^{\circ} max-no$
Septiembre	14,60	9,24	5,80	4,51	18,78	15,59
Octubre	18,32	12,06	9,40	8,52	22,79	18,27
Noviembre	20,43	13,74	9,62	8,89	25,72	21,02
Diciembre	23,78	16,34	11,54	11,18	29,99	24,03

En invernaderos no automatizados es difícil determinar cuáles son los factores medioambientales que afectan en mayor medida el desarrollo de un cultivo. Teniendo en cuenta los numerosos trabajos existentes se puede afirmar que luz y temperatura juegan los principales roles sobre los procesos biológicos de los vegetales (de Koning, 1988; Araki, 2000) por otra parte dentro de la estructura de invernadero del presente trabajo las variaciones no producirían respuestas diferenciales entre el sector norte y el sur pero las condiciones de clima extremas registradas al comienzo y al final de la experiencia, podrían comprometer el desarrollo y el rendimiento del cultivo.

#### *2.5.4. Diferencia térmica del aire entre el interior y el exterior del invernadero*

Considerando las temperaturas óptimas para los distintos estados de desarrollo de los principales cultivos hortícolas realizados en invernadero, los cuales han sido expuestos en la tabla 2.2, la necesidad de aporte de calor al invernadero estará relacionada al salto térmico entre el ambiente interior y el ambiente exterior. Por otra parte, cuando los valores de temperatura interna excedan a los valores óptimos, el ambiente deberá ventilarse adecuadamente.

A continuación se analiza la diferencia térmica ( $\Delta T$ ) entre la temperatura del exterior y dos alturas diferentes (1 y 2 metros) en el interior del invernadero durante el período de cultivo de tomate primavera-verano del año 2001. Durante el mes más frío, septiembre, según se puede observar en el Figura 2.3a, durante la noche el sistema de calefacción posibilitó mantener la temperatura entre 7 y 10°C a las dos alturas consideradas. A medida que la temperatura externa disminuye, debido al aporte de calor, el salto térmico entre el exterior y el interior aumenta, siendo la temperatura externa cercana a 0°C el salto térmico es similar a la temperatura interna debido al aporte de calefacción.



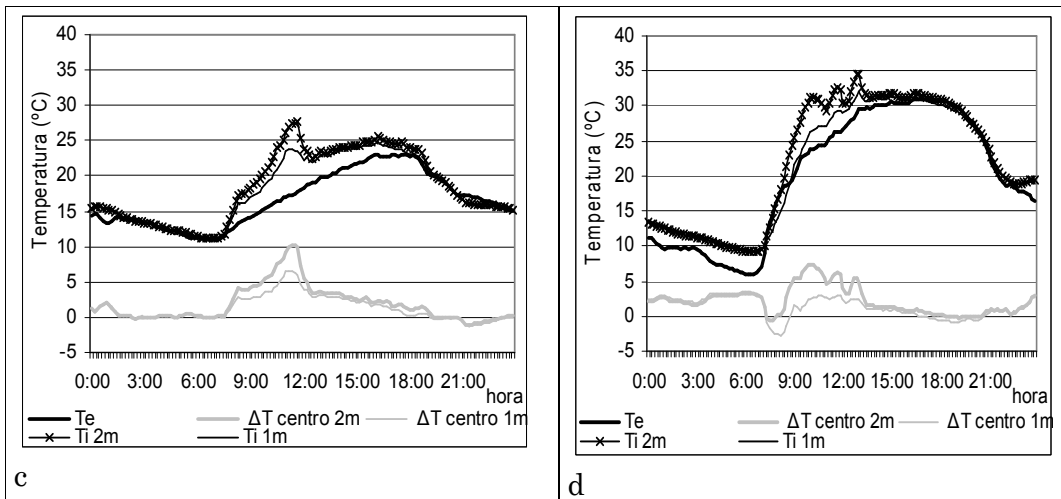


Figura 2.3. Evolución diurna de la diferencia térmica del aire ( $\Delta T$ ) y de la temperatura interna ( $T_i$ ) y la temperatura externa de distintos puntos del invernadero para días despejados de: a) 11 de septiembre 2001, b) 12 octubre 2001, c) 13 de noviembre 2001 y d) 6 de diciembre de 2001

Durante horas del día se puede ver que la temperatura externa aumenta por encima de  $20^{\circ}\text{C}$ , aumentando la temperatura interna hasta sobrepasar los  $30^{\circ}\text{C}$  momento en el cual se ventila manualmente el invernadero. En ese momento se observa una caída brusca de la temperatura interna hasta aproximadamente  $25^{\circ}\text{C}$ , manteniéndose en una temperatura promedio de alrededor de  $26^{\circ}\text{C}$  hasta el momento de cierre en el cual se produce nuevamente un aumento de la temperatura interna. Al ventilar, la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior disminuye, observándose un descenso en la curva que representa dicho salto térmico.

En el mes de octubre las noches no fueron tan frías por lo tanto la diferencia térmica del aire no fue tan evidente manteniéndose la misma diferencia entre sitios durante el día (Figura 2.3b). El pico de temperatura externa coincide con el aumento de intensidad de radiación solar, paralelamente, a medida que aumenta la intensidad de radiación solar a lo largo de la temporada y la temperatura externa es mayor, la temperatura interna también aumenta (datos promedios presentados en la tabla 2.6), disminuyendo la diferencia entre  $T_e$  y  $T_i$ , sobre todo en horas del mediodía y la tarde cuando tiende a ser 0. Este comportamiento coincide con procesos similares observados por Zhao y col. (2001) quienes también observan gradientes en el sentido vertical tal cual se han mostrado tanto en la figura 2.3 como en la tabla 2.5.

### 2.5.6. Temperatura de las cubiertas

Se consideraron dos casos: un día de otoño avanzado (mayo), con temperaturas externas inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$  durante toda la noche y parte del día y un día de primavera (octubre) con temperaturas externas cercanas a  $10^{\circ}\text{C}$  (Figura 2.4a). Durante el mes de octubre para una temperatura externa de  $8.29^{\circ}\text{C}$ , el techo externo registró  $5.53^{\circ}\text{C}$  y el interno  $7.30^{\circ}\text{C}$  a las 7.40 horas mientras que en mayo, con temperatura externa de  $-4.07$  a las 9.00 horas, el techo exterior registró  $-6.95$  y el interior  $-1.25$ .

Por otro lado, mientras las paredes norte y sur no muestran diferencias de temperaturas entre ellas durante la noche primavera y apenas un gradiente menor a  $1^{\circ}\text{C}$  en mayo, registrándose  $-2.62^{\circ}\text{C}$  en la pared sur y  $-0.95^{\circ}\text{C}$  en la pared norte.

El techo externo recibe calor por convección por la noche, puesto que el aire externo presenta mayor temperatura que la cubierta externa, esto indica que las pérdidas de calor del invernadero se producen por radiación térmica a través de la misma.

Las condiciones observadas en el día de otoño (Figura 2.4b) fueron diferentes: para temperaturas externas de  $-4.30^{\circ}\text{C}$ , la cara interior del techo exterior (cubierta externa) registró valores de  $-3.7^{\circ}\text{C}$  mientras que la cara interior del techo interior (cubierta interna) registró  $-1.21^{\circ}\text{C}$ . Por otra parte mientras las caras norte y sur no mostraron diferencias entre sí registrando datos de alrededor de  $-2.5^{\circ}\text{C}$  en el centro del invernadero el registro fue de  $-1.10^{\circ}\text{C}$ .

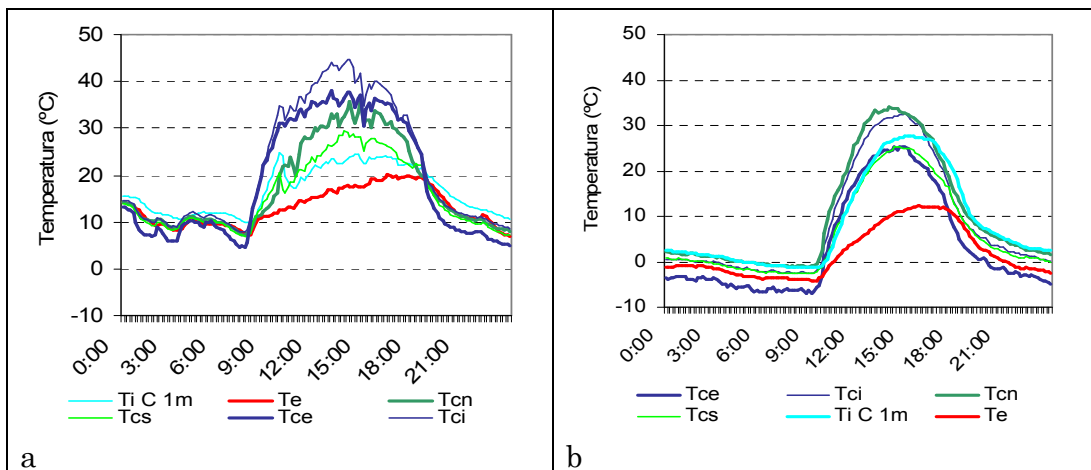


Figura 2. 4. Registros de temperatura diario a: de un día de primavera (10 octubre 2001) y b: un día de otoño (29 mayo 2002) en condiciones de cielo despejado-  $T_i$ - temperatura interna,  $T_e$ -temperatura externa,  $T_{cn}$ -temperatura cara norte;  $T_{cs}$ -temperatura cara sur,  $T_{ce}$ -temperatura cubierta externa,  $T_{ci}$ -temperatura cubierta interna,  $T_{ci}$  1m-temperatura interna centro a 1m de altura.

### 2.5.7. *Temperatura suelo*

Se consideraron los registros de temperatura de suelo externo e interno a 0.15m y suelo por encima y por debajo de la cubierta de polietileno del suelo (mulch) de dos días de primavera de la temporada 2001 (Figuras 2.5b y 2.5b) y suelo externo e interno a 0.05 y 0.01m y suelo bajo el mulch y cara superior del mulch en dos días de otoño (Figuras 2.5c y 2.5d).

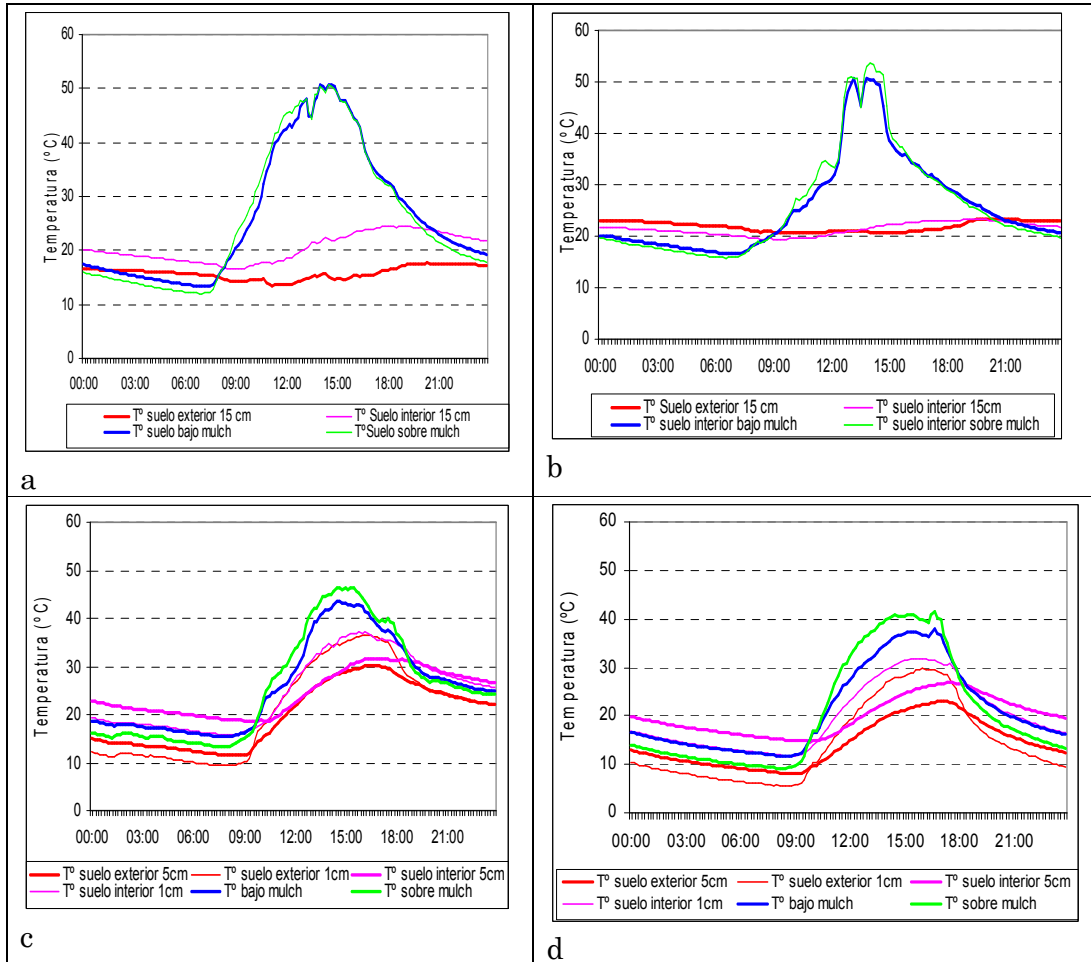
Mientras que en primavera la temperatura del suelo debajo y sobre el mulch registró datos en torno a los 50°C en otoño estos datos fueron menores, entre 40 y 45°C. Durante ese período el sistema de riego automatizado del cultivo fue el causante de los descensos bruscos puntuales de la temperatura de suelo volviendo los registros a la curva normal en un tiempo de 50-60 minutos. Por otro lado, para todos los días considerados durante la noche la temperatura es mayor bajo el mulch invirtiéndose esta relación durante el día, lo cual indica que existe cesión de calor del suelo al aire durante la noche.

Durante la primavera, el 12 de octubre de 2001 las temperaturas de suelo externo fueron menores a las internas durante todas las horas del día pero el 13 de noviembre de 2001 se observó una inversión: las temperaturas externas fueron mayores a las internas durante la noche y al revés durante el día.

Durante el 5 de abril del 2002 a profundidades de suelo de 0.05m y 0.01m se observaron diferencias de temperatura de 8°C del suelo interior por encima del exterior durante la noche mientras que para el 6 de mayo estas diferencias son del orden de 6°C.

El polietileno negro, según Ham y col (1993), se caracteriza por alta absorbancia de la radiación de onda corta ( $\alpha$ ), con valores de 0.96 y baja reflectancia ( $\rho$ ), cercana a 0. Estas propiedades ópticas, según los autores, influyen sobre la emisividad ( $\epsilon$ ), de radiación de onda larga, con valores similares a la  $\epsilon$ , para el caso del polietileno negro, de 0.87. Coincidiendo con el comportamiento presentado en la tabla 2.8, los autores también observaron que la temperatura registrada bajo el polietileno negro ( $T_{scm}$ ) es mayor que la temperatura del suelo desnudo ( $T_{ssm}$ ).





*Figura 2.5. Temperatura de suelo interna y externa para meses de primavera a: 12 octubre y b: 13 noviembre del 2001, y meses de otoño, c: 5 abril y d: 6 de mayo del 2002*

Los registros de temperatura de suelo, durante el ciclo de cultivo de primavera-verano del año 2003 (agosto a diciembre), muestran el mayor calentamiento cuando se colocó una cubierta de suelo de polietileno negro (Scm) respecto al suelo desnudo (Ssm).

Los valores de máxima temperatura, expuestos en la tabla 2.8. muestran que a medida que avanza la temporada de cultivo, aumenta la temperatura externa, la temperatura interna se mantiene regulando la apertura de ventanas y el suelo acumula progresivamente menos calor debido a la intercepción de luz por parte de las plantas y mayor sombreado de las mismas sobre el suelo.

Siendo la acumulación de temperatura menor, la ventaja comparativa del uso de mulch como colector de calor se anula cuando la radiación directa

deja de ser incidente sobre el suelo debido al efecto del cultivo mencionado, como se puede observar en la columna derecha de la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Registros de temperatura máxima (°C).

	Te	Ti	Tscm	Tssm	Tscm-Tssm
7 sep 2003	14.20	18.75	69.2	66.08	3.12
19 sep 2003	18.10	34.17	51.76	47.68	4.04
16 oct 2003	23.40	24.20	44.48	44.40	0.08
23 nov 2003	25.40	25.74	43.64	43.59	0.05

Te: temperatura externa. Ti: Temperatura interna. Tscm: temperatura suelo con mulch. Tssm: temperatura suelo sin mulch.

El aporte de calor desde el suelo al aire interno, durante la noche, quedaría expresado de la siguiente manera:

$$Q = h_{s-a} \cdot (T_s - T_a) \cdot A_s$$

donde

$h_{s-a}$ : coeficiente convectivo suelo-ambiente ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )

$T_s$ : Temperatura suelo (°K)

$T_a$ : Temperatura ambiente (°K)

$A_s$ : Superficie de suelo ( $m^2$ )

Al registrarse mayores temperaturas en la cubierta de suelo que en el aire se considera que el flujo es laminar por lo que el coeficiente considerado es:

$$h = 1.7(T_{ai} - T_{ci})^{0.33} \quad W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1} \quad (\text{Deltour 1984, Chalabi 1989, en Montero y col. 1998}).$$

Como se puede ver, para el invernadero considerado y bajo las condiciones climáticas locales, el aporte de calor desde el suelo en primavera fue mayor al doble del calor aportado en el otoño (tabla 2.9).

Tabla 2.9: Temperatura de suelo ( $T_s$ ) y temperatura de aire ( $T_a$ ) y aporte de calor desde el suelo ( $Q$ ), para distintas fechas.

	$T_s$ (°C)	$T_a$ (°C)	$h_{s-a}$ ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )	$Q$ (w)
12 octubre 2001	12.03	7.54	0.93	4484
13 nov 2001	15.83	11.02	0.95	4914
5 abril 2001	13.23	10.83	0.80	1949
6 mayo 2001	9.15	6.52	0.82	2202

El almacenamiento de calor durante el día como así también el aporte de calor del suelo al aire del invernadero, comparando la alternativa del suelo con mulch frente al suelo desnudo, será analizado específicamente en el capítulo 6 de esta tesis.

El empleo de mulch, coincidiendo con datos aportados por otros autores (Ham y co. 1993), produce un notorio incremento de la temperatura a nivel de suelo durante el día (superior a 20°C) y 5-7°C durante la noche con respecto a la temperatura del aire interno, lo cual estimularía el desarrollo

radicular, mayor producción de biomasa y rendimientos altos en el cultivo de tomate (Tarara, 2000).

Las ventajas del empleo de cubiertas plásticas sobre el aporte de calor al aire del invernadero son analizadas en el capítulo 5 de esta tesis.

### **2.5.8. Humedad Relativa**

Debido a las condiciones climáticas propias de la región (baja humedad relativa y temperaturas medias), por lo general el exceso de humedad dentro de los invernaderos, no es un problema durante los meses de primavera, favoreciendo esto la calidad de la producción. Durante el otoño las condiciones que se observan son distintas, la humedad relativa dentro del invernadero es más difícil de controlar debido a las limitaciones que presenta las posibilidades de ventilar dado que la temperatura del exterior es baja.

En la tabla 2.10 se presentan promedios de temperatura y humedad registrados en los meses de noviembre y diciembre de 2003 con un cultivo de tomate en pleno desarrollo y registros de meses de otoño con el invernadero sin cultivo. En primavera no se observan grandes variaciones en las temperaturas promedio externas e internas aunque durante el mes de noviembre los valores de humedad relativa interna son superiores a los externos, mientras que en diciembre el efecto se revierte. Esto podría estar relacionado a un manejo común de los invernaderos de la región patagónica los cuales, al no presentar condiciones de automatización del manejo climático la ventilación se hace manualmente por apertura de las cubiertas laterales siendo común dejarlas abiertas en la temporada de noches más cálidas (meses de diciembre a febrero).

*Tabla 2.10: Registros de Humedad Relativa (HR) y Temperatura (T) promedio para meses de primavera de 2003 y otoño 2004.*

		Nov 2003	Dic 2003	May 2004	Jun 2004
Ti	Med	19.74	20.46	11.09	8.46
	Max	28.87	30.17	25.28	24.07
	Min	11.67	12.25	4.27	0.68
Te	Med	18.57	19.22	7.27	5.45
	Max	26.97	27.18	13.23	12.00
	Min	10.33	11.05	2.61	0.08
HRi	Med	64.70	20.21	38.95	62.67
	Max	79.84	27.45	42.79	65.65
	Min	48.39	13.37	32.53	59.61
HRe	Med	42.02	36.71	80.17	70.94
	Max	74.23	66.84	94.80	92.80
	Min	18.93	17.26	52.39	41.87

Los rangos de humedad relativa observados no significan una gran influencia sobre el normal desarrollo del cultivo de tomate ya que coinciden con registros obtenidos por otros autores (Cockshull, 1988), esto se debe principalmente a que el invernadero considerado para el estudio no es un invernadero automatizado que permita un excelente aislamiento con respecto al exterior. Por el contrario, un mayor aislamiento podría conducir a un incremento de la humedad relativa interna, aumentando los desórdenes a nivel de cultivo.

Tomando como ejemplo el día 23 de noviembre de 2003, el cual no presentó condiciones de nubosidad, se puede observar una notoria fluctuación de la humedad relativa externa fluctúa en relación a la temperatura ambiente (Figura 2.6). En la misma figura se puede ver que cuando el invernadero se encuentra cerrado la humedad relativa alcanza valores entre 80-90%, mientras que en el momento de efectuarse la ventilación por la apertura de las ventanas, la humedad desciende bruscamente. Hacia horas del atardecer se puede observar el efecto contrario.

Estas situaciones generadas por no disponer de control adecuado de la humedad relativa del ambiente del invernadero se producen tanto en los ciclos de cultivo primavera-estival como otoño-invernal. Siendo tomate el principal cultivo del período cálido rangos inadecuados de humedad, radiación y temperatura afectan la calidad de los frutos.

Además de pérdidas del rendimiento en general (Bertin y col, 2000), existen desórdenes relacionados con las variaciones bruscas de la humedad, entre las principales fisiopatías de los frutos de tomate se pueden señalar el rajado de frutos (Peet y Willits, 1991; Pascual, 1998; Bertin, 2000) y blossom end rot (Bertin y col., 2000).

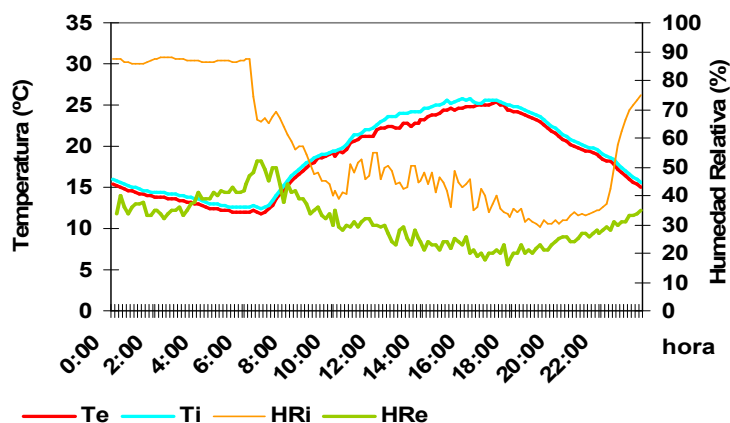
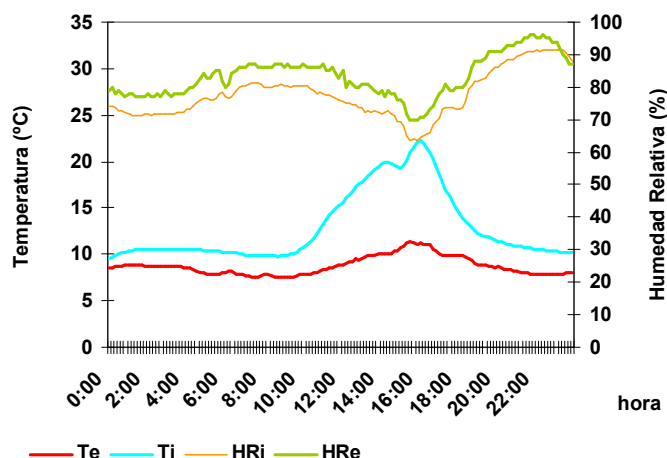


Figura 2.6: Humedad relativa interna y Temperatura interna y externa. 23 noviembre 2003

La figura 2.7 representa la variación de temperatura y humedad relativa en el invernadero durante un día de otoño, sin cultivo y sin aporte de humedad

por riego. A diferencia de la situación registrada el 23 de noviembre de 2003, aquí no se evidenciaron cambios bruscos de humedad relativa. Los valores de la humedad relativa interna oscilaron entre 63 y 90%, habiéndose ventilado solo durante un tiempo muy limitado cuando la temperatura interna estuvo cercana a los 18°C y cerrándose a las 17 horas, momento en el cual, finalizada la ventilación, se puede observar el ascenso de la humedad relativa dentro del invernadero.



*Figura 2.7: Humedad Relativa y temperatura durante un día de otoño. 16 de mayo de 2004*

Considerando el período de primavera-verano como el principal ciclo de cultivo en invernadero y teniendo en cuenta que no es común el cultivo de tomate durante la temporada de otoño-invierno, se puede afirmar que las variaciones de humedad es uno de los factores que pueden incidir en forma negativa en los procesos fisiológicos del cultivo y la calidad de los frutos. En trabajos recientes realizados sobre evaluación de cultivares de tomate cultivadas en invernaderos en el norte de la Patagonia (Iglesias y col., 2000 a y b; Iglesias y col., 2003; Iglesias y Muñoz, 2004).se informan de la incidencia de distintas fisiopatías y pérdidas de rendimiento, los cuales, entre otros factores se deben a variaciones de la humedad relativa dentro del invernadero (Peet, 1991; Bertin y col., 2000; Baptista, 2001).

## *2.6. Conclusiones*

No se verifica un gradiente de temperatura en el plano horizontal, a 1m de altura dentro del invernadero, que pongan en riesgo la homogeneidad en la calidad y productividad del cultivo en ese plano que pudieran deberse a diferencias de temperatura en el sentido N-S.

Se observa un gradiente de temperatura en el plano vertical el cual comprometería la productividad de los racimos superiores del cultivo de tomate. Esto indica la necesidad de prever ventilación cenital o construir invernaderos más altos y mayor superficie de ventanas laterales.

El empleo de mulch produce un notorio incremento de la temperatura a nivel de suelo durante el día y la noche beneficiaría al cultivo con respecto al suelo desnudo.

Los registros de radiación permiten afirmar que la misma no es una limitante para el cultivo de tomate en el ciclo primavera-estival pero que para el cultivo otoñal los valores registrados comprometen el desarrollo normal del cultivo.

Los rangos de humedad relativa observados se consideran normales para el tipo de invernadero en estudio, no poniendo el riesgo el normal desarrollo del cultivo de tomate.

### *2.7. Bibliografía*

- Araki, T.; Gitano, M.; H. Eguchi, H. 2000. Dynamics of fruit growth and photoassimilate translocation in tomato plant under controlled environment. *Acta horticulturae*. 534. ISHS. 85-92
- Bailey, B.J. 1984. Limiting the relative humidity in insulated greenhouse at night. *Acta Horticulturae*. 148. pp 411-419
- Baptista, F. J.; Abreu, P.E.; Meneses, J.F.; Bailey, B.J. 2001. Comparison of the climatic conditions and tomato crop productivity in Mediterranean greenhouses under two different natural ventilation management systems. *Agribuilding*. Campinas. Br. pp-112-124
- Bertin, N; Guichard, S.; Leonardi, C.; Longuenesse, J.J.; Langlois, D.; Navez, B. 2000. Seasonal Evolution of the Quality of Fresh Glasshouse Tomatoes under Mediterranean Conditions, as Affected by Air Vapour Pressure Deficit and Plant Fruit Load. *Annals of Botany*. 85 (6): 741-750
- Bot, G.P.A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. PhD. dissertation. Agric. Univ. Wageningen
- Bruggink, G.T.; Heuvelink, E. 1987. Influence of Light on the Growth of Young Tomato, Cucumber and Sweet Pepper Plants in the Greenhouse: Effects on Relative Growth Rate, Net Assimilation Rate and Leaf Area Ratio. *Scientia Horticulturae*. 31, 161-174
- Castilla, N., Lorenzo, P., Montero, J.I., Fereres, E., 1988. Alternative greenhouses for mild winter areas of Spain. *Acta Horticulturae* 245, pp: 63-70.
- Castilla, N. 1998. Condiciones ambientales en invernaderos no climatizados. *Tecnología de Invernaderos II*. Curso Superior de Especialización. F.I.A.P.A. Pérez Parra y Cuadrado Gómez Ed.

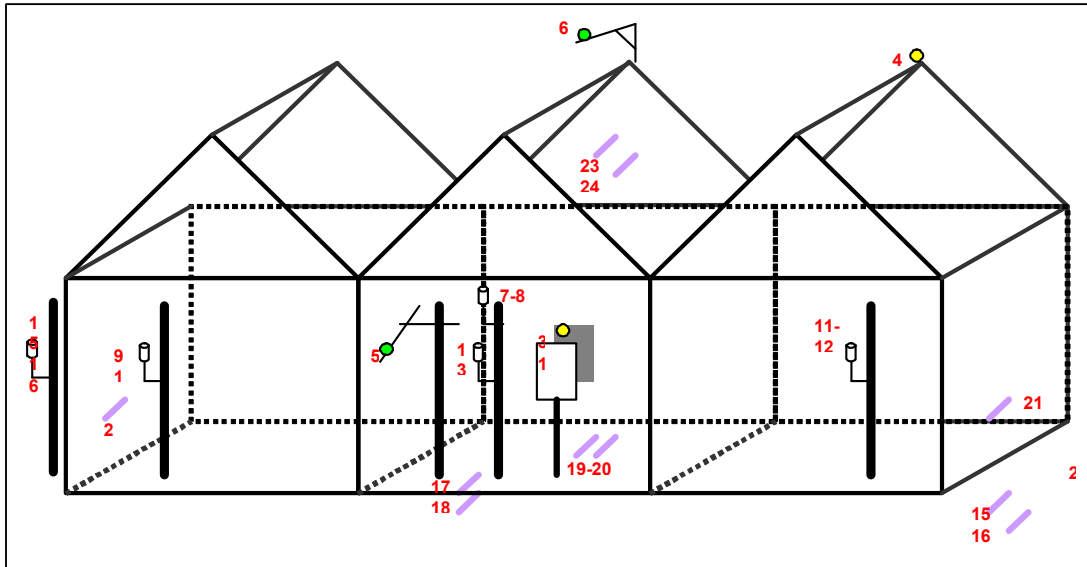
- Cockshull, K.E., 1988. The integration of plant physiology with physical changes in the greenhouse climate. *Acta Horticulturae* 229, pp: 113-121.
- de Koning, A.N.M. de. 1989. The effect of temperature on fruit growth and fruit load of tomato. *Acta Horticulturae*. 248, 329-336.
- de Koning, A.N.M. 1988. The effect of different day/night temperature regimes on growth, development and yield of glasshouse tomatoes. *Journal of Horticultural Science*. 63 (3) 465-471
- de Koning, A.N.M. 2000. The effect of temperature fruit load and salinity on development rate of tomato fruit. *Proc. XXV IHC. Part 9. Acta horticulturae* 519. ISHS. 85-93
- Grange, R.I.; Andrews, J. 1993. Growth rates of glasshouse tomato fruit in relation to final size. *Journ. Hort. Scie.* 68 (5):747-754
- Grange, R.I.; J. Andrews, J. 1995. Respiration and growth of tomato fruit. *Plant cell and environment*. 18:8, 925-930.
- Ham, J.M.; Kluitenberg, G.J.; Lamont, W.J. 1993. Optical properties of plastic mulches affect the field temperature regime. *Journal Amer. Soc. Hort. Sci.* 118 (2):188-193.
- Heuvelink E. 1995. Growth, development and yield of tomato crop: periodic destructive measurements in a greenhouse. *Scientia Horticulturae*. 61: 77-99
- Heuvelink E. 1996. Dry matter partitioning in tomato: validation of a dynamic simulation model *Annals of Botany*. 77:71-80
- Hwa-sung Cheng; Gap, P.; Chae Cheng Soon-Ju. 1977. Environmental factors in the plastic house and their effects on the physiology and ecology of vegetables crops. *Theses of Chonnam Univ. Vol.23*.
- Iglesias, N.; Frattini, M.. 1996. Los invernáculos del Alto Valle: relevamiento de las estructuras y análisis económico de las principales alternativas. *Actas IV Congreso Argentino y II Internacional de Ingeniería Rural- Neuquén. Argentina. Tomo II- (817-822)*
- Iglesias, N.; Veronessi, A.; Rossini, M. Di Maíz, S. 2000(a). Factores que contribuyen a la producción de frutos no comerciales en cultivos de tomate bajo cubierta en la norpatagonia: a) análisis de las principales anomalías y su incidencia. *Horticultura. Argentina. Rev. Horticultura Argentina*. 19 (46):198
- Iglesias, N.; Veronessi, A.; Rossini, M. Di Maíz, S. 2000(b). Factores que contribuyen a la producción de frutos no comerciales en cultivos de tomate bajo cubierta en la norpatagonia: b) Respuesta de los cultivares a las principales anomalías. 2000 actas.. *Argentina. Rev. Horticultura Argentina*. 19 (46): 199
- Iglesias N. Raffo D. y A. Muñoz. 2003. Crecimiento vegetativo y fructificación diferencial de los racimos de tomate (*Lycopersicon esculentum* ) en un cultivo primicia en invernadero. *Revista Horticultura Argentina Vol 20/22- N° 49/52:40*
- Iglesias, N. Muñoz, A. 2004. Evaluación de la productividad y principales causas de descarte del cultivo de tomate bajo invernadero en el ciclo

- primavera-estival. XXVII Congreso Argentino de Horticultura. ASAHO. Merlo. Rep. Argentina.
- Jones, J.W., Kening, A. ; Vallejos, C.E. 1999. Reduced state-variable tomato growth model. Transaction of the ASAE. Vol. 42(1):255-265
- Lorenzo, P. 2001. El manejo del clima en invernadero para la producción de hortalizas II Seminario Internacional de Cultivo Protegido- Sao Paulo
- Montero, J. I.; Antón, A. 1993. Tecnología del invernadero. Curso de Tecnología de la Horticultura Protegida. INTA-UBA. Carpeta 220 pp
- Montero, J.I.; Antón, A. ; Muñoz. P. 1998. Fundamentos. Tecnología de Invernaderos II. Curso Superior de Especialización. Perez Parra, J. Ed. 254-266
- Muñoz, P.; Antón, A.; Montero, J.I. 1998. Estructuras de invernaderos, Tipología y materiales. En tecnología de Invernaderos II. Curso Sup. De Especialización. Perez Parra, Cuadrado Gomez Ed. Cap III: 65-99
- Pascual, B.; Bardisi, A.; Lopez\_Galarza, S.; Alagarda, J.; Maroto, J.V. 1998. Influencia del riego y del potencial matricial en el rendimiento y el rajado de tomate. (*Lycopersicon lycopersicum* (L.) Fawell). Invest. Agr.: Prod. Veg. 13 (1-2): 5-19
- Pearce, B.D.; Grange R.J.; Hardwick, K. 1993. The growth of young tomato fruit. I. Effects of temperature and irradiance on fruit grown in controlled environments. Journal of Horticultural Science 68(1)1-11
- Peet, M. M.; Willits, D. 1991. Tomato fruit cracking: cultural, environmental, developmental and genetic pieces of the puzzles. HortScience. 26 (6) : 779
- Sanchez, E. 2004. INTA. EEA Alto Valle. Nutrición Vegetal y Suelos. Comunicación personal.
- Sausser, B.J.; Giacomelli, G.A.; Janes, H.W. 1998. Modeling the effects of air temperature perturbations for control of tomato plant development. Acta Horticulturae. 456: 87-92
- Schoch, P.G.; L'Hotel, J.C.; Brunel, B. 1990. Croissance du diametre de la tige de tomate: Effets du rayonnement et de la temperature nocturne. Agricultural and Forest Meteorology. 50:3, 229-238
- Tarara, J.M. 2000. Microclimate modification with plastic mulch. HortScience. Vol 35 (2). 169-180
- Urban L 1997. Introduction à la production sous serre. Tome 1: La gestion du climat. Lavoisier Tec&Doc. Paris.
- Yao, C.; Moreshet, S.; Aloni, B.; Karni, L. 2000. Effects of climatic factors and water stress on the diurnal fluctuation in diameter of bell pepper fruit. Journal of Horticultural Science & Biotechnology. 75 (1)6-11
- Zhao Y.; Teitel M.; Barak, M. 2001. Vertical temperature and humidity gradients in a Naturally ventilated greenhouse. J. Agr. Engng. Res. 78(4):431-436



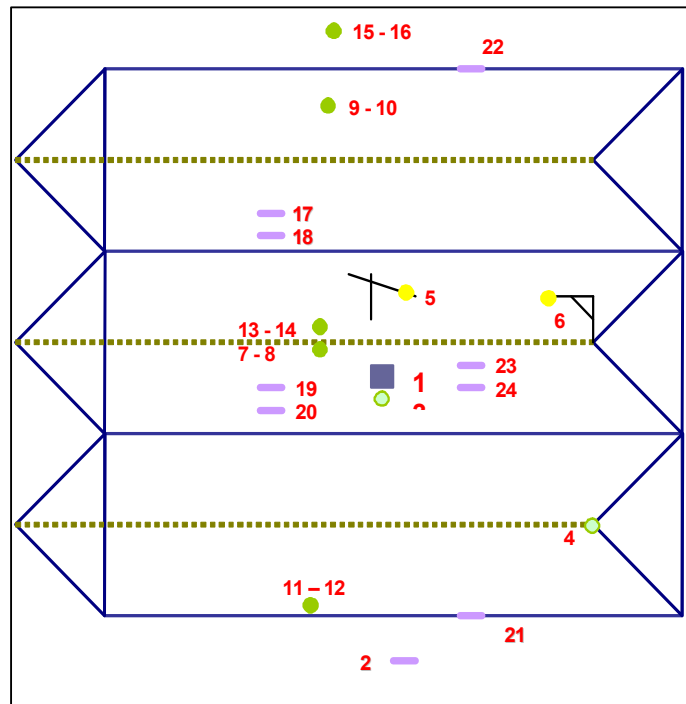
**Anexo 1**-Esquema del invernadero y ubicación de los sensores (el diseño no responde a escalas de la realidad)

Vista en perspectiva y el planta de la ubicación de los sensores en el invernadero



Referencias:

1 - Termistor 2 -  $T^{\circ}$  suelo externa 0.15m 3 - Radiación total interna 4 - Radiación total externa 5 - Radiación neta interna 6 - Radiación neta externa 7 -  $T^{\circ}$  aire centro 2m 8 - HR centro 2m 9 -  $T^{\circ}$  aire sur 10 - HR sur 11 -  $T^{\circ}$  aire norte 12 - HR aire norte 13 -  $T^{\circ}$  aire centro 1m 14 - HR suelo centro 1m 15 -  $T^{\circ}$  aire externa 16 - HR externa 17 -  $T^{\circ}$  suelo interna 10cm 18 -  $T^{\circ}$  suelo interna 5cm 19 - Temperatura bajo mulch 20 - Temperatura sobre mulch 21 -  $T^{\circ}$  pared norte 22 -  $T^{\circ}$  pared sur 23 -  $T^{\circ}$  cara interna techo externo 24 -  $T^{\circ}$  cara interna techo interno



---

---

*Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.*

---

---

*“El lenguaje es un alfabeto de símbolos cuyo ejercicio presupone un pasado que los interlocutores comparten. ¿Cómo transmitir a los otros el infinito Aleph, que mi temerosa memoria apenas abarca?”*  
*Jorge Luis Borges*

### *3.1. Introducción*

La transmisión de la radiación solar a través de la cubierta influye tanto en el balance energético del invernadero como en la actividad fotosintética del cultivo. Aunque los materiales comúnmente utilizados en la actualidad como cubierta de invernaderos produzcan una reducción en la intensidad de la radiación y una modificación en la distribución espectral, deben presentar características que, por un lado favorezcan la entrada de la radiación incidente y por otro limiten, principalmente durante la noche, la pérdida de energía térmica acumulada. Por este motivo es imprescindible determinar, la transparencia a la radiación de onda larga y a la de onda corta de los materiales utilizados en los invernaderos en determinadas condiciones climáticas locales.

El conocimiento de las características de la transmisión de la radiación por el material de la cubierta del invernadero es importante en la evaluación de los potenciales beneficios de cada material dado que pequeñas diferencias en la transmisión solar pueden significar importantes efectos en el desarrollo del cultivo. Trabajos realizados a altas latitudes (Inglaterra, 52°N) el 1% del incremento de la radiación PAR significa un 1% en los rendimientos de tomate Cockshull (1988). También se realizaron evaluaciones similares en el sur de España, en Almería, a 36°N (Castilla y col. 1988, 1990, Castilla y López\_Galvez, 1994) las cuales corroboraron el aumento de la producción en función del aumento de la radiación.

Los rendimientos también dependen de la concentración de CO<sub>2</sub> y de la temperatura del aire. En verano los altos niveles de radiación pueden afectar negativamente los rendimientos en áreas geográficas de alta radiación lo cual puede obligar a la necesidad de realizar sombreado de los cultivos. Por el contrario, en períodos de baja radiación, la luz artificial puede ser un recurso técnico aceptable para aumentar los rendimientos.

Para determinar la transmisión del material de cubierta Nijskens y col. (1985) midieron la transmisión de acuerdo a la suma de radiación incidente sobre el material a diferentes espectros de longitudes de onda. Los autores consideraron la transmisión en términos de número de fotones (PPF) transmitidos ya que la fotosíntesis depende del número de fotones interceptados y no de la energía de cada fotón en sí.

### ***Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.***

---

La radiación fotosintéticamente activa (PAR), que implica la radiación comprendida en el rango 400-700nm, es un recurso necesario a ser considerado en aplicaciones relacionadas con la fisiología vegetal, producción de biomasa e iluminación natural de los invernaderos. Pearson y col. (1995) examinó la propiedad de transmisión de radiación de varios films plásticos de cubiertas de invernaderos verificando que la mayor transmisión PAR (94.2%) determinada en base a la eficiencia fotosintética fue registrada en un film de polietileno conteniendo aditivos fluorescentes. Por otro lado, se registró una gran variación en el grado en el cual dichos films dispersan la luz. Por ejemplo el policarbonato dispersa el 7.2% de la radiación incidente mientras que un polietileno difuso dispersa el 86.6%. En todos los films el % de luz dispersada decrece con la longitud de onda.

El tiempo de exposición de la cubierta a las condiciones del medio ambiente también incide negativamente disminuyendo la luz transmitida a través de la cubierta (Papadakis y col. 2000). Por otro lado, considerando la composición de la radiación solar, Nijskens y col. (1990), evaluando cubiertas de polietileno durante un período de 1 año permitieron asegurar que la transmitancia disminuye levemente (2-4%) en los diferentes rangos de longitud de onda del espectro solar (280-2500nm).

Además del tipo de material, la procedencia de los mismos (Wang y col. 1999, Golberg y col. 1996), pueden dar respuestas diferentes en el porcentaje de luz transmitida. Experiencias realizadas con materiales de cubierta de polietileno anticondensación de 1 y 3 años y polietileno anticondensación térmico no encontraron disminución de transmisión de luz debido al tiempo de uso pero si detectaron menores valores en el material con propiedades térmicas (Zhang y col.,1996).

El estudio de la transmitancia de la radiación solar de los invernaderos es provechoso para poder establecer mejoras que permitan una mayor penetración de la radiación que posibiliten la máxima productividad y las mayores ganancias de energía cuando los invernaderos son utilizados como colectores solares, tal es el caso de los ubicados en latitudes altas como los de la Patagonia Norte. Los distintos materiales empleados en las cubiertas presentan características propias en lo que se refiere a la transmisión de la radiación solar y retención de la radiación infrarroja larga (Feuilloley e Issanchou, 1996; Papadakis y col. 2000; Geoola y col. 2000).

La radiación transmitida no solamente depende de las propiedades del material de cubierta sino también de las características de los invernaderos, fundamentalmente el ángulo del techo y doble pared (Critten 1984; Zhang y col. 1996), y orientación (Critten, 1987, 1988, Papadakis y col. 1998, Bouzo y Pillatti, 1999).

Considerando materiales de cubierta secos y transparentes, distintos autores (Pearson y col. 1995; Pieters y col. 1997; Pollet y Pieters, 1999, 2000a, 2000b), han podido constatar que el comportamiento respecto a la transmitancia de la radiación solar en función del ángulo de incidencia del sol respecto no sufre grandes variaciones: los valores de transmitancia son mayores y prácticamente constante para ángulos de incidencia pequeños pero decrecen rápidamente para ángulos de incidencia altos. Por otro lado, dependiendo del material de cubierta y del ángulo de incidencia, la presencia de condensación produce una disminución de la transmitancia entre 5-10% (Pieters y col. 1997).

El ángulo entre los rayos provenientes del sol y la superficie receptora de un invernadero depende principalmente de la forma y orientación del invernadero (Critten 1984). Los coeficientes de transmisión correspondientes a la radiación solar y a la fracción de longitud de onda fotosintéticamente activa (PAR) son de similar magnitud para la mayoría de los materiales utilizados como cubierta de invernaderos (Golberg y col. 1996), aunque Pearson y col. (1995) obtuvo valores de transmitancia mayores a los reportados por Nijskens y col. (1985) lo que, según el autor pudo deberse a que los registros de Pearson fueron llevados a cabo cuando la luz incidente se encontraba prácticamente perpendicular a la cubierta. Las comparaciones de transmitancia de material en las cuales se toma en cuenta el ángulo de incidencia son más realistas que las que comparan simplemente los materiales.

A igual que en la zona Mediterránea, en Argentina, el material básico para la mayoría de las cubiertas de invernaderos y túneles, es el polietileno, fundamentalmente con agregados de aditivos que le permiten mayor durabilidad (LDT), siendo el espesor por lo común más empleado 150  $\mu\text{m}$  (Sierra y col., 1994). El agregado de aditivos añadidos a la resina básica de polietileno, permite aumentar la duración del filme, modificar su transparencia a la radiación visible a la infrarroja corta, a la radiación solar y cambiar sus calidades de absorción y reflexión del infrarrojo largo lo cual determina calidades diferentes en la transmisión de luz o intercambio de calor entre el invernadero y el entorno.

Las pérdidas de calor de invernadero debidas a las pérdidas por radiación dependen de las propiedades de emisividad y transmitancia del material de cubierta en las longitudes de onda de la radiación térmica, entre 2.5 y 40  $\mu\text{m}$ . Emisividad es la propiedad del material para emitir una radiación previamente absorbida y transmitancia es la propiedad del material que determina su capacidad para dejar pasar la radiación térmica o infrarroja.

La transmisión de la radiación térmica es un importante mecanismo responsable de las pérdidas de calor en las cubiertas plásticas de los invernaderos ya que las cubiertas de polietileno, a diferencia del vidrio,

### *Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.*

---

presentan alta transmitancia de la radiación térmica (Nijkens y col. 1985, Papadakis y col. 2000). Por lo tanto, el intercambio de radiación térmica se incluye en todos los estudios de medio ambiente del invernadero. Distintos modelos, tanto simples como complejos, han sido usados para investigar el problema del intercambio de calor en los invernaderos. Las propiedades radiométricas del material de cubierta juegan un rol importante en la transmisión de radiación térmica.

Los films de polietilenos usados comúnmente para cubiertas de invernadero presentan alta transmitancia de radiación térmica especialmente cuando no hay condensación. Las cubiertas utilizadas para los invernaderos deben responder a requerimientos de alguna manera contrapuestos: mientras por un lado es conveniente que presenten altos valores de transmitancia a la radiación solar, particularmente la radiación fotosintéticamente activa (PAR), por otro lado deben presentar bajos valores de transmitancia de la radiación infrarroja térmica.

La radiación térmica es radiación electromagnética emitida por un cuerpo en relación a su temperatura (Monteith y Unsworth, 1990). Según la ley de Stefan-Boltzman, la cantidad de energía radiante:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad \text{W.m}^{-2} \quad (3.1)$$

E: cantidad de energía emitida

$\varepsilon$ : emitancia del cuerpo adimensional

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8}$ ) W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>.

T: temperatura del cuerpo

$\varepsilon$ : emitancia del cuerpo, cristal: 0.90, según Pieters y col. (1995)

La mayoría de plásticos no son opacos a la radiación térmica, y por tanto en el cálculo de la pérdidas totales habría que añadir un término adicional, que sería el porcentaje de radiación emitida por el cultivo o suelo que traspasa la cubierta. Este término puede calcularse por:

$$Q_{\text{rad}} = E_p \sigma T_p^4 \tau_{\text{tmc}} \quad (3.2)$$

siendo  $\tau_{\text{tmc}}$ : transmitancia de la cubierta a la radiación térmica.

La composición química de los materiales de cubierta para invernaderos es muy variada, y por tanto las propiedades de dichos materiales son variadas también. En la Argentina, la información técnica disponible suele ser la que aportan las empresas suministradoras. Por este motivo se decidió abordar como un objetivo de esta tesis la evaluación de distintos materiales empleados como cubierta de los invernaderos típicos de la región en lo referente a sus propiedades de transmisión de radiación infrarroja corta y retención del calor.

### *3.2 Objetivo*

Determinar de la transmitancia a la radiación solar y a la radiación infrarroja térmica de distintos materiales de cubierta empleados como cubierta de los invernaderos en el norte de la Patagonia.

### *3.3. Materiales y métodos*

#### *3.3.1. Instalaciones y equipamiento de medición.*

##### *Instalaciones y equipamiento para medición de la radiación Infrarroja corta*

Fue evaluada la transmitancia de la radiación solar y la radiación fotosintéticamente activa (PAR) para distintas cubiertas simulando techos planos de diferente ángulo de inclinación empleando un bastidor de simulación. Los resultados de la simulación fueron comparados con los registros de datos de radiación obtenidos en un invernadero triple capilla en distintos momentos durante los años 2001 y 2002.

Las mediciones de transmitancia de la cubierta *in situ* fue llevada a cabo en el invernadero triple capilla instalado en el predio de INTA EEA Alto Valle descrito en el capítulo 1, empleándose dos sensores de radiación global Delta\_T modelo ES2, con una respuesta al espectro de luz en un ancho de banda de 400-1050nm. Los mismos fueron colocados en el techo de la nave central del invernadero, uno en el exterior y otro en el interior. La cubierta del invernadero es de polietileno larga duración térmica (LDT) de 150  $\mu\text{m}$  presentando el techo doble cubierta de polietileno cristal (polietileno normal) de 50  $\mu\text{m}$  ubicado a 10 centímetros por debajo de la cubierta principal.

Para medir la transmitancia simulando distintos ángulos del techo se construyó un bastidor de con un plano articulado graduable en forma de cuadrado de 1 metro de lado el cual se colocó en el mismo sentido del invernadero (eje de la cumbrera E-O) con la cara expuesta al norte (Figura 3.1). El plano graduable permite instalar dos cubiertas distanciadas a 10 centímetros a fin de simular un techo de cubierta doble. Se colocaron dos sensores de radiación global Delta\_T modelo ES2 (Rt), uno sobre la cubierta superior y otro debajo de la cubierta inferior, registrándose los valores de radiación solar durante 1 minuto datos cada 10 segundos con datos promediados de 1 segundo.



*Figura 3.1. Bastidor de simulación del ángulo de techo. C1 soporte de simulación de cubierta superior, con cubierta colocada, C2- soporte para colocar doble cubierta. Rt-1-Sensor de radiación solar superior. Rt-2. Sensor de radiación solar inferior.  $\beta$ . Ángulo de inclinación del techo.*

Se realizaron distintas evaluaciones de la transmitancia:

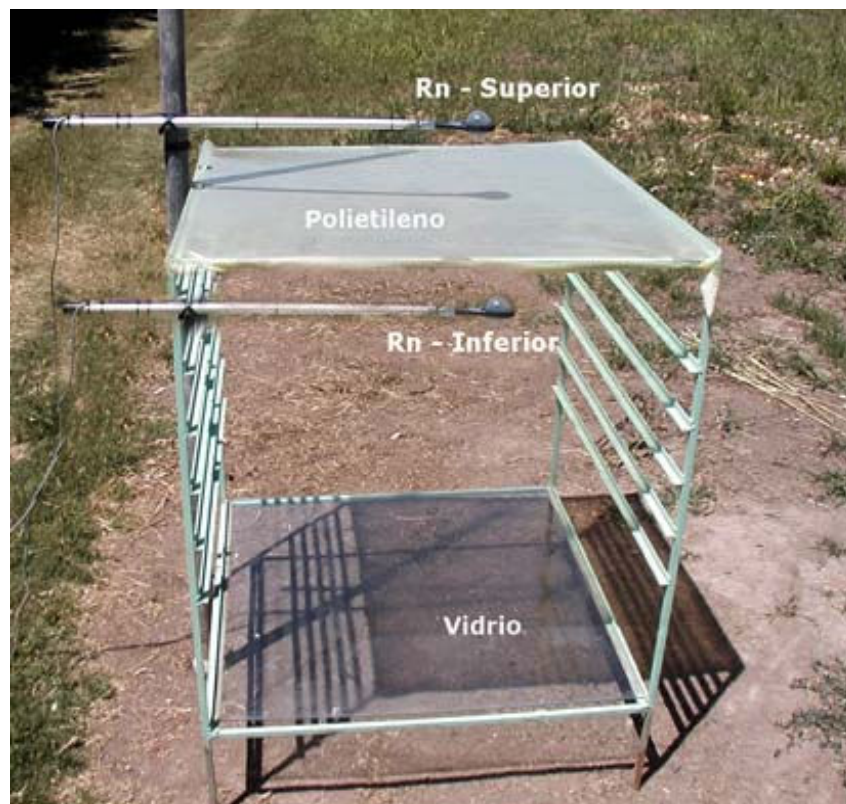
- 1- según la edad de la cubierta: polietileno larga duración térmico (LDT) nueva comparada con una cubierta con un año de exposición a campo.
- 2- según el tipo de cubierta: Transmitancia de distintas cubiertas dobles vs. cubiertas simples.
3. según el material de cubierta: Polietilenos coextruidos de 150  $\mu\text{m}$  y y polietilenos simples (denominados “cristal”), de 50  $\mu\text{m}$ . Estos polietilenos presentan alta transmitancia de la radiación solar pero carecen de aditivos que le permitan retener en forma eficiente la radiación infrarroja larga (Sierra y col., 1993).
- 4- transmitancia de radiación PAR.

La radiación fotosintéticamente activa se registró empleando una barra de medición de radiación BAR-RAD de la firma Cava-RAD, de Argentina la cual registra valores de radiación fotosintéticamente activa (PAR) comprendida entre la longitud de onda de 0.4-0.7  $\mu\text{m}$ .



*Infrarrojo largo*

Para medir las pérdidas de calor (infrarrojo largo), se construyó un bastidor metálico de área cuadrada de 1 metro de lado y una altura de 1.70 metros el cual permite la colocación de una o varias cubiertas equidistanciadas a 0.10 metros. En la base del bastidor, a una distancia de 1 metro de la cubierta, se colocó un material de emitancia ( $\epsilon$ ) conocida, en este caso un vidrio traslúcido de superficie homogénea. Paralelo a la estructura se montó una barra que permite sostener los sensores de radiación neta Delta-T NR2 (Rn) con respuesta a longitudes de onda entre 0.25 a 60  $\mu\text{m}$ .



*Figura 3.2. Bastidor empleado para la simulación de pérdidas de calor por radiación térmica a través de distintas cubiertas. Rn: sensores de radiación neta.*

La temperatura del vidrio fue medida usando una termocupla o termopar, de cobre constantán (tipo "T") considerándose la emitancia ( $\epsilon$ ) del mismo 0.94 (Tabla 3.1.). Los datos fueron colectados mediante un Data Logger Delta-T modelo DL2e- Versión 2.02. (Figura 3.2.).

**Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.**

Tabla 3.1. Valores de emitancia ( $\epsilon$ ) para distintos materiales.

Material	emitancia ( $\epsilon$ )	Bibliografía
Vidrio transparente	0.94	ASHRAE Handbook 1989
Vidrio standard	0.90	Pirard et al 1992. En Pieters y Deltour, 1997
Hielo (0 °C)	0.95	ASHRAE Handbook 1989
Pinturas		
Blanca laqueada	0.80	ASHRAE Handbook 1989
Negra laqueada	0.91	ASHRAE Handbook 1989
Aluminio laqueada	0.39	ASHRAE Handbook 1989
Aluminio	0.09	ASHRAE Handbook 1989
Cubiertas de polietileno:		
LPDE+EVA		Feuilleley y col. 1996
coextruído triple capa (200 $\mu$ m)	0.59	
Polietileno térmico (LDT)	0.79	Pirard et al. 1992. En Pieters y Deltour 1997
Polietileno cristal	0.23	Pirard et al 1992. En Pieters y Deltour, 1997

### 3.3.2. Metodología empleada

#### Infrarrojo corto

Se registraron datos de radiación solar cada 10 minutos promedio de lecturas cada minuto. A partir de dichos valores, se calculó la transmitancia, como la razón entre la radiación interna y la radiación externa:

$$\tau_r = \frac{RT_i}{RT_e} \quad (3.3.)$$

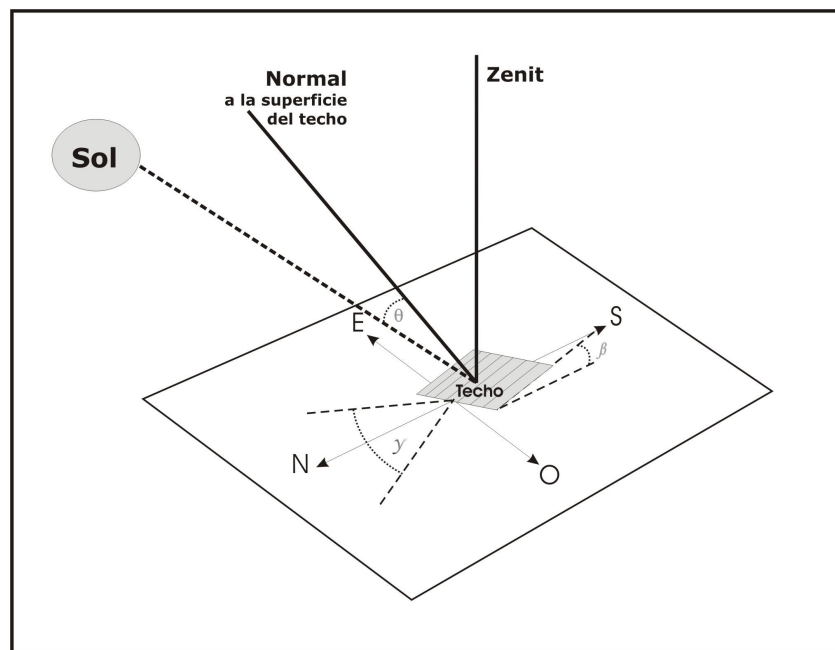
Donde:  $RT_i$ : Radiación Global o Total interna ( $W \cdot m^{-2}$ )  
 $RT_e$ : Radiación Global o Total externa ( $W \cdot m^{-2}$ )

Para las lecturas *in situ* se contemplaron los datos de radiación solar superiores a 20  $W \cdot m^{-2}$  de días despejados durante otoño, primavera y verano de los años 2001 y 2002.

La relación geométrica entre un plano con una orientación dada respecto a la tierra, en un tiempo determinado y la incidencia de la radiación solar, es decir la posición del sol con relación al plano, puede ser descrita en términos de algunos ángulos (Benford and Bock (1939) en Duffie and Beckman (1980)). Estos ángulos y las relaciones entre ellos son los siguientes:

- $\phi$  Latitud del lugar, es decir, la posición angular hacia el norte o sur respecto al ecuador. N positivo, S negativo ( $-90^\circ < \phi < 90^\circ$ )
- $\delta$  Declinación, posición angular del sol, al mediodía, con respecto al plano del ecuador. Norte positivo.  $-23.45^\circ < \delta < 23.45^\circ$
- $\beta$  Pendiente, ángulo entre la superficie del plano en cuestión y la horizontal ( $0 < \beta < 180^\circ$ ). Cuando  $\beta = 90^\circ$ , se trata de una superficie vertical.
- $\gamma$  Ángulo de la superficie del azimuth, es decir la desviación de la proyección horizontal de un plano con respecto al meridiano local (N-S)- Este negativo, oeste positivo ( $-180^\circ < \gamma < 180^\circ$ ) (Cuando  $\gamma = 0^\circ$  se trata de una superficie en el hemisferio norte orientada hacia el sur).  $\gamma$  es positivo en superficies orientadas hacia el oeste y negativo en superficies orientadas hacia el este.
- $\gamma_s$  Ángulo acimutal del sol, esto es, la desviación de la proyección de la radiación directa del meridiano local
- $\omega$  Ángulo horario, es decir, el desplazamiento angular del sol hacia el este o el oeste del meridiano local, debido a la rotación de la tierra alrededor de su eje.  $15^\circ$  por hora, mañana negativo, tarde positivo.
- $\theta$  Ángulo de incidencia, ángulo entre el rayo de la radiación en una superficie y la normal de esa superficie

Zenith, pendiente, y ángulo del azimuth de la superficie se muestran en la figura 3.



*Figura 3.3. Ángulos de pendiente de techo ( $\beta$ ), azimutales ( $\gamma$ ) y ángulo de incidencia del sol con respecto a la normal de la cubierta ( $\theta$ )*

***Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.***

---

La declinación  $\delta$  se puede calcular a partir de la siguiente ecuación (Cooper, 1969):

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (3.4.)$$

Donde  $n$  es el número de días del año, con  $1 \leq n \leq 365$

La ecuación que relaciona el ángulo de incidencia del sol,  $\theta$ , y otros ángulos, para el hemisferio norte, es:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \\ & \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (3.5.)$$

Las experiencias se realizaron a  $38^\circ$  de latitud sur, siendo el meridiano de referencia para el sistema horario el de  $45^\circ$ . Simulando las condiciones generales de los invernaderos locales se supuso la orientación del eje de cumbreras en el sentido E-O, por lo tanto  $\gamma=0$ , calculándose la transmitancia de distintos tipos de cubierta de techo en función del ángulo  $\theta$ , para un techo plano orientado hacia el norte y ubicado en el hemisferio sur.

Por lo tanto la ecuación 3.5 debió ser modificada, en la cual se redefinieron los siguientes términos:

$$\beta = 180 - \beta_i \quad (3.6)$$

donde:  $\beta_i$  es el ángulo de inclinación del techo con respecto a la horizontal.

$$\delta = \delta_i + (-1) \quad (3.7)$$

siendo:  $\delta_i$  el valor de ángulo de declinación diario respecto al ecuador calculado por la ecuación 3.4

Por lo tanto, para las condiciones locales, la ecuación 3.5 puede resumirse:

$$\cos \theta = \cos (\phi + \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin (\phi + \beta) \cdot \sin \delta \cdot \sin \omega \quad (3.8)$$

Las mediciones de transmitancia de radiación total a través de distintas cubiertas y en diferentes valores del ángulo  $\theta$  se realizaron en días despejados de meses de primavera de los años 2003 y 2004.

Los materiales comúnmente utilizados en la Patagonia y sus características son expuestos en la Tabla 3.2. Los mismos fueron evaluados simulando

cubiertas simples o dobles. En el caso de techo de doble cubierta se colocó una lámina de polietileno cristal de 50  $\mu\text{m}$  a 10 centímetros por debajo de la cubierta principal.

*Tabla 3.2. : Materiales de cubierta evaluados.*

Materiales de cubierta	características
Agrotileno LDTX 150 $\mu\text{m}$ (PE LDTX)	Polietileno larga duración térmico tricapa, según fábrica transmisión lumínica de 88% y retención del calor del 88%
Agrotileno LDT 150 $\mu\text{m}$ (PE LDT)	Polietileno larga duración térmico tricapa, según datos del fabricante, transmisión lumínica 81% y 88% de retención del calor.

Los distintos tipos de cubierta evaluados se visualizan en la tabla 3.3.

*Tabla 3.3. : Tipo de cubiertas evaluadas*

Cubiertas Simples	Cubiertas dobles
PE LDTX 150	PE LDTX 150 + polietileno cristal 50 $\mu\text{m}$ (PE 50)
PE LDT 150	PE LDT 150 + polietileno cristal 50 $\mu\text{m}$ (PE 50)

El ángulo  $\theta$  para cada lectura de transmitancia fue calculado y se analizó la transmitancia para las distintas cubiertas evaluadas, en función del mismo y de la pendiente del techo simulada.

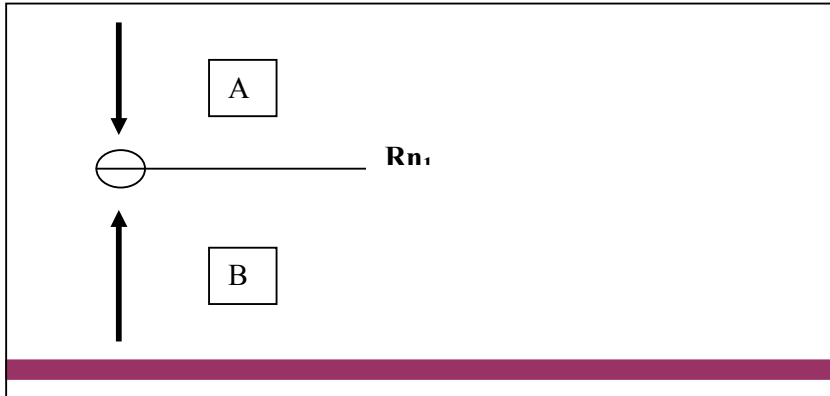
### *Radiación PAR*

Durante el mediodía solar del 8 de agosto de 2003 se realizaron las mediciones de transmitancia de radiación PAR simulando techos con una pendiente de 20° y 30°. Utilizándose la barra de medición se registraron valores de radiación PAR por encima y por debajo de la cubierta calculando luego la transmitancia para cada ángulo de pendiente de techo.

**Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.**

*Infrarrojo largo*

Se realizaron tres tipos de lecturas:



$$Rn_1 = A - B$$

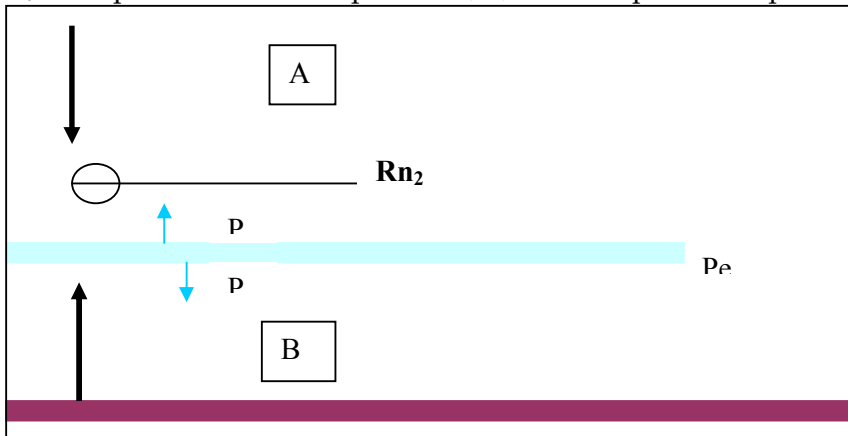
(3.6)

$$B = \sigma \epsilon (T_s + 273.3)^4$$

$\sigma$  cte. de Stefan-Boltzman ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ )

$\epsilon$ : emitancia del cuerpo (adimensional). Cristal 0.94

$T_s$ : Temperatura de la superficie ( $^{\circ}\text{C}$ ) medida por termopar

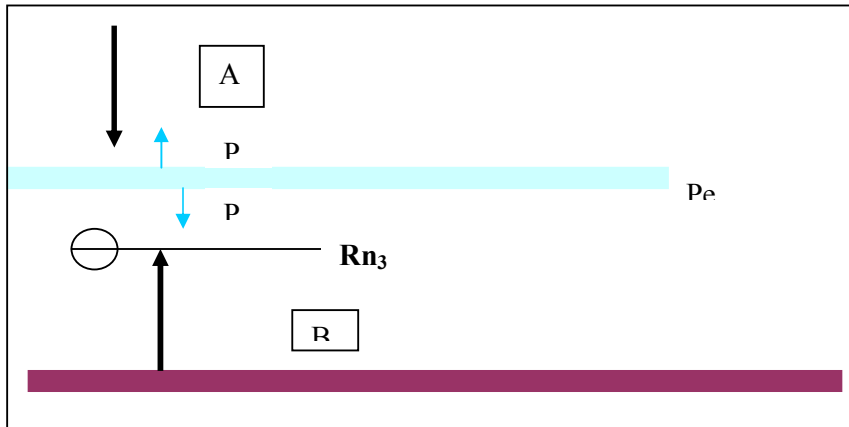


$$Rn_2 = A - P - (B \cdot \tau_{tmc})$$

$$P = -Rn_2 + A - (B \cdot \tau_{tmc})$$

(3.7.)

Donde  $\tau_{tmc}$ : transmitancia del polietileno ( $P_e$ )



$$Rn_3 = (A \cdot \tau_{tmc}) + P \cdot B \quad (3.8)$$

De las ecuaciones 3.6, 3.7. y 3.8. se deduce:

$$Rn_3 = A \cdot \tau_{tmc} + A \cdot (B \cdot \tau_{tmc}) - Rn_2 \cdot B \quad (3.9)$$

Por lo cual:

$$\tau_{tmc} \cdot (A - B) = Rn_3 + Rn_2 \cdot B - A \cdot B$$

de donde, si  $A - B = Rn_1$  (ecuación 3.6.)

$$\tau_{tmc} = (Rn_3 + Rn_2 \cdot B - A \cdot B) / (A - B) \quad (3.10)$$

que es lo mismo que decir:

$$\tau_{tmc} = (Rn_3 + Rn_2 \cdot Rn_1) / Rn_1 \quad (3.11)$$

La experiencia fue llevada a cabo al aire libre durante los días 22 de agosto, 23 de septiembre de 2003 y 3 de marzo de 2004 en condiciones estables de cielo despejado, entre las 21:00 y 23:30 horas, con una temperatura del aire entre -1.72 y 1.96 el 22 de agosto de 2003, 12.35 a 15.40 el 23 de septiembre de 2003 y entre 20.57 y 23.47 °C el 3 de marzo de 2004.

De acuerdo al tipo de cubiertas empleadas en los invernaderos del norte de la Patagonia se evaluaron cubiertas simples y dobles:

- PE 50
- PE LDT150
- PE LDTX150.

Los tipos de cubierta simulados fueron los siguientes:

- Cubierta simple PE LDT 150
- Cubierta simple PE LDTX 150
- Doble cubierta PE LDT 150+ PE 50
- Doble cubierta PE LDTX 150+ PE 50

### *3.4. Resultados y discusión*

#### *3.4.1. Transmisión de radiación solar*

##### *Transmitancia según la edad del material*

E material de cubierta (PE LDT 150) después de un año de exposición a campo mostró una leve disminución (entre el 3-4%), frente a la transmitancia presentada por una lámina de material de cubierta sin uso. Esta diferencia se mantiene prácticamente constante para los distintos valores de ángulo, como se puede apreciar en la tabla 3.4.

*Tabla 3.4. Valores de transmitancia a la radiación solar ( $\tau_s$ ) para polietileno de distinta edad en distintos ángulos de techo*

ángulo $\theta$	Material de cubierta	
	PE LDT150 de 1 año de exposición	PE LDT150 nuevo
10	0.83	0.87
20	0.83	0.86
30	0.82	0.86
40	0.81	0.84
50	0.78	0.81
60	0.77	0.80

La bibliografía señala resultados contrapuestos en este sentido, mientras Papadakis y col., (2000), expresan que la edad del material de la cubierta influye disminuyendo la transmitancia a lo largo del tiempo y resultados de Montero y col. (2001) validan esta afirmación al comprobar disminución de la luz transmitida a través de cubiertas de polietileno tricapa y polietileno térmico con 2 años de exposición, Zhang y col. (1996) evaluando polietileno anticondensación de 1 y 3 años y térmico, observaron que no existen pérdidas de transmisión de luz debido al tiempo de uso pero si detectó menores valores en el material con propiedades térmicas. Por otro lado, experiencias realizadas por Orden y col. (2000) quienes evaluaron con distintos materiales de polietileno comúnmente utilizados como cubiertas de invernadero en Argentina, expuestas por 30 meses a la intemperie tampoco demostraron deterioro de sus propiedades ópticas.

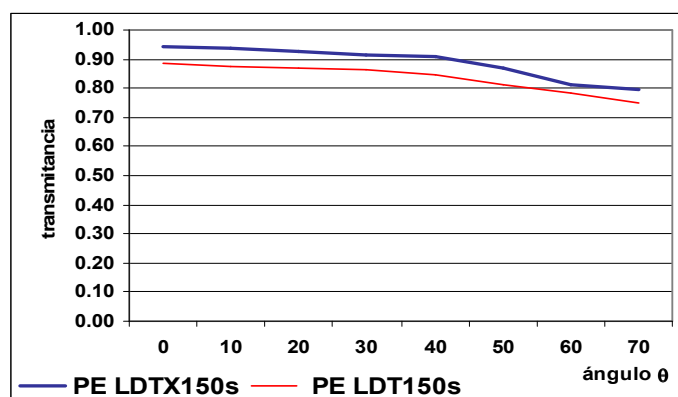
##### *Transmisión de la luz con distintos materiales de cubierta y distintos tipos de cubierta.*

Se midió la transmitancia de distintos materiales de cubierta utilizando el bastidor de simulación de ángulo de techo en distintos días a lo largo de la temporada de la primavera de 2004. Las fechas de la experiencia fueron el 6



de setiembre, el 29 de setiembre, el 14 de octubre y el 17 de noviembre, en condiciones de día despejado y en horas que permitieron definir rangos de ángulos de inserción del sol con respecto a la normal del techo comprendidos entre 0 y 70°.

Se compararon cubiertas simples (s) y cubiertas dobles (d). El polietileno larga duración térmico con el aditivo de larga duración (PE LDTX) presentó valores de transmitancia mayores al polietileno térmico, como se puede observar en la figura 3.4. Coincidiendo con trabajos de distintos autores (Pollet y Pieters, 2000<sup>a</sup>, 2000<sup>b</sup>; Pieters y cols., 1997; Zhang y col. 1996 y Wang y col. 1999), se observa que la luz transmitida disminuye a medida que aumenta el ángulo de incidencia del rayo solar con respecto a la normal del techo (ángulo  $\theta$ ), esta reducción de la transmitancia es leve para valores de  $\theta$  comprendidos entre 0 y 50° aproximadamente, haciéndose luego más pronunciada la pendiente de pérdida de transmitancia.



*Figura 3.4: Transmitancia de radiación solar de cubiertas simples de polietileno larga duración térmico coextruído (PE LDTX 150) y polietileno larga duración (PE LDT 150)*

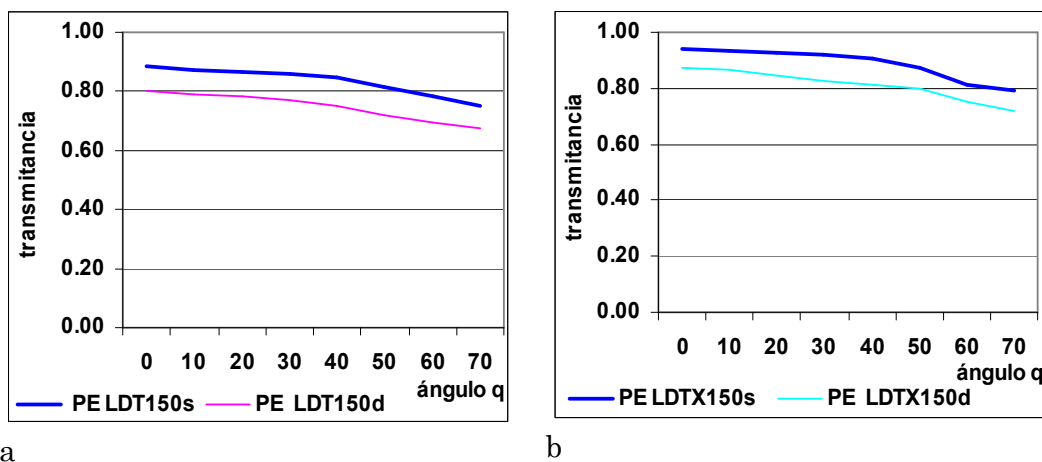
Al comparar la transmitancia de cubiertas simples frente a cubiertas dobles, se observa que las últimas manifiestan reducción de la transmisión de radiación con respecto a las cubiertas simples, con valores promedios del 9% para PE LDT 150 y 8% para PE LDTX 150. Estos registros de disminución de la radiación por empleo de una doble cubierta, no se contradice con mediciones de la radiación transmitida obtenidos por Bouzo y Pillatti (1999) en distintos tipos de invernaderos quienes registraron valores promedio de disminución de transmitancia del 8.5%.

También Montero y Antón (1993), mencionan disminución de radiación debido al empleo de doble cubierta de aproximadamente 10%, lo cual es levemente mayor que los resultados aquí presentados.. Por el contrario, Critten (1984), en experiencias realizadas en invernadero de vidrio, el empleo de la doble pared significó solamente una disminución del 5% de la

### Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.

luz transmitida mientras que en condiciones de laboratorio estos valores son mayores, alrededor del 9%.

Si se tiene en cuenta que el empleo de la doble cubierta permite disminuir la condensación que se produce en invernaderos de techo simple, y evaluando los resultados de Pearson y col. (1995), Pieters y col. (1997), Pollet y Pieters (1997, 1999) y Geoola y col. (2000), quienes registran una disminución de la transmitancia debido a la condensación entre 10% y 13.4%, se podría decir que las pérdidas por el empleo de la doble cubierta son equivalentes a las pérdidas por condensación en el rango de ángulo  $\theta$  en el cual se han realizado las observaciones.



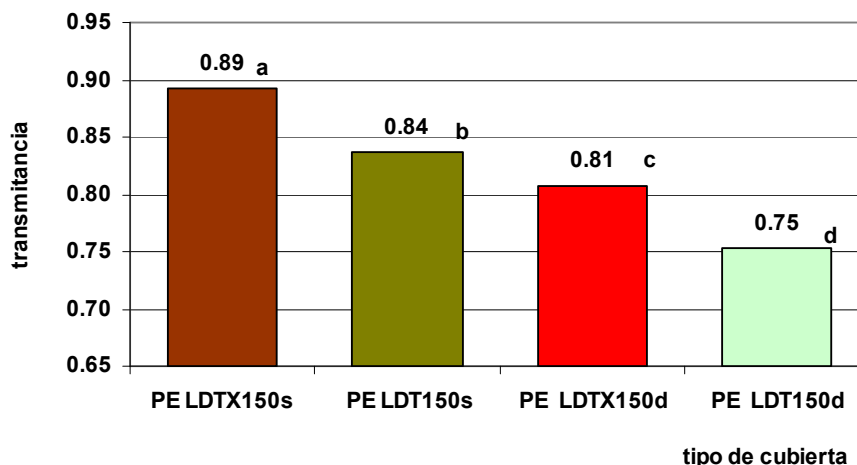
a b  
*Figura 3.5: Transmitancia de radiación solar en cubiertas simples (s) y dobles (d). a) olietileno larga duración térmico (PE LDT 150). b) polietileno larga duración térmico coextruido (PE LDTX 150).*

Independientemente del material evaluado, se puede observar que la transmitancia permanece prácticamente constante hasta ángulos  $\theta$  de 40-50°. Este comportamiento es similar a resultados reportados por distintos autores (Pieters y col. 1997; Montero y col. 1998; Wang y col. 1999)

Considerando el promedio de radiación transmitida por los distintos materiales en todos los ángulos, se puede observar que existen diferencias significativas en la luz transmitida entre los distintos materiales y entre las dobles cubiertas entre sí.

Teniendo en cuenta la generalización del empleo de doble cubierta en los invernaderos patagónicos, a partir de los datos presentados en la figura 3.6, se puede afirmar que la cubierta de PE LDTX 150 transmite mejor la radiación solar que la cubierta de PE LDT 150. Por otro lado si observamos la reducción de la pérdida de transmitancia comparando cubiertas simples entre si y cubiertas dobles entre sí, vemos que entre las primeras el material PE LDT 150 transmite 5% menos radiación solar que PE LTDX en condiciones de simple cubierta y 6% cuando se le agrega a ambos polietileno

una cubierta de polietileno cristal, esto se debe a que este último material presenta características de alta transmitancia a la luz.



*Figura 3.6: Comparación de la transmitancia para los materiales de cubierta más comunes en los invernaderos del norte de la patagonia. Columnas con igual letra no presentan diferencias significativas (LSD 0.05)*

#### *Registros de transmitancia in situ*

Los valores de transmitancia registrados durante el mediodía solar en el invernadero, con una doble cubierta de polietileno larga duración térmica de 150  $\mu\text{m}$  de espesor (PE LDT 150) como cara externa y polietileno cristal de 50  $\mu\text{m}$  (PE 50) ubicado a 10 centímetros como techo interno, son presentados en la tabla 3.5, a continuación:

*Tabla 3.5. Valores de transmitancia en distintos días durante los años 2001 y 2002 al mediodía solar*

	Ángulo $\theta$	transmitancia
11 set 2001	21° 04'	0.78
09 oct 2001	11° 09'	0.76
13 nov 2001	01° 09'	0.81
06 dic 2001	05° 17'	0.79
16 abr 2002	28° 20'	0.77
07 may 2002	35° 10'	0.77
29 may 2002	37° 01'	0.74
31 ago 2002	46° 30'	0.73

La diferencia en la transmitancia entre los meses del período cálido (noviembre y diciembre) y los meses del período frío (mayo y agosto), con coeficientes de transmitancia 0.81, 0.79 y 0.74, 0.73 respectivamente, se explica principalmente por la diferencia de los ángulos de incidencia del

### Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.

rayo solar con respecto a la normal del plano del techo, aunque también la presencia de condensación por lo general es mayor durante los meses más fríos (Zhang 1996). En el mes de noviembre, al mediodía solar, el ángulo  $\theta$  es inferior al ángulo  $\theta$  del mes de agosto lo cual ha explicado los registros de valores de transmitancia de 0.81 y 0.73 respectivamente. Durante el mes de diciembre, fines de primavera, el rayo solar incidente supera la normal al plano del techo de invernadero inclinado a  $20^\circ$  lo cual incide en una disminución de la transmitancia con respecto al mes de noviembre.

La pendiente del techo del invernadero y el empleo de la doble cubierta impiden la formación de condensación en horas de mayor temperatura, además, durante el mediodía solar los ángulos  $\theta$  resultantes durante la temporada de cultivo, no superan valores de  $40^\circ$ , esto permite inferir que, en general, la pérdida de transmitancia por condensación es despreciable, principalmente en los meses cálidos. Si se compara con los valores de transmitancia obtenidos en el simulador (Figura 3.5a) se podrían suponer que los valores de transmitancia menor registrada en el invernadero son debidos a intercepción de luz por parte de componentes de la estructura.

En la *figura 3.7* se puede observar un leve aumento de transmitancia, a medida que se avanza en la temporada de cultivo desde comienzos a finales de primavera, esto puede deberse tanto a la disminución del ángulo de incidencia del rayo solar respecto a la normal del techo como a presencia de condensación en los primeros días del ciclo de observaciones. (septiembre 2001).

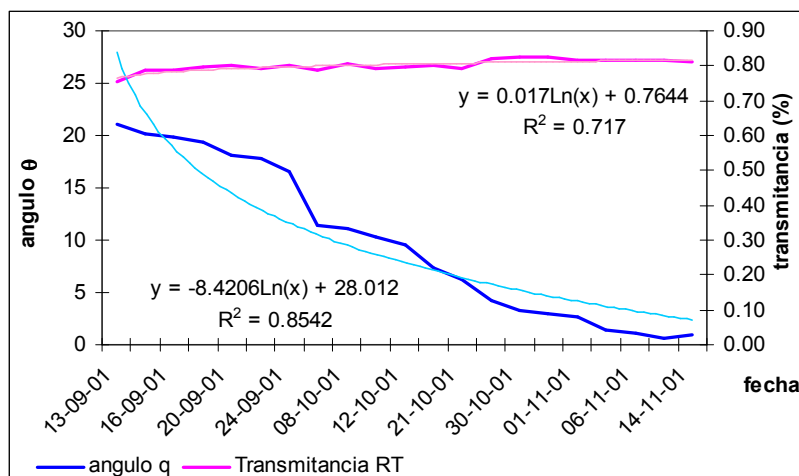
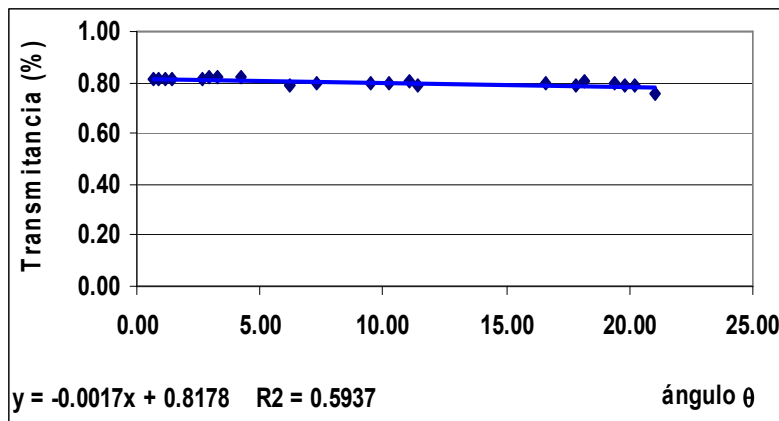


Figura 3.7: relación entre la transmitancia y el ángulo  $\theta$  durante el mediodía solar (primavera-verano 2001)

En la figura 3.7 se ha representado la variación del ángulo  $\theta$  como así también la transmitancia de radiación global del invernadero experimental, a lo largo del ciclo de cultivo primavera-estival 2001. Se puede observar,

coincidiendo con lo informado por distintos investigadores (Pieters y col 1997; Pieters y Deltour, 1997; Montero y col. 1998; Wang y col. 1999), que la transmitancia no manifiesta diferencia considerable para el rango de ángulo  $\theta$  resultante en la experiencia. En la figura 3.8, en la cual se representa la transmitancia en función de los ángulos  $\theta$  resultantes a lo largo de dicho período de observaciones se observa que los valores de la misma se mantienen prácticamente constantes ya que el rango de ángulos oscila entre  $0^\circ$  y  $21^\circ$ .



*Figura 3.8. Valores de transmitancia durante el mediodía solar en función del ángulo de inserción del sol con respecto a la normal del techo.*

#### *Transmitancia de la radiación fotosintéticamente activa (PAR)*

No se observó diferencia notoria en los valores de transmitancia para simulaciones de pendiente de techo comprendida entre  $20^\circ$  y  $30^\circ$  realizadas con el bastidor de simulación. Los ángulos  $\theta$  resultantes oscilaron entre  $14^\circ 52'$  y  $24^\circ 22'$  (tabla 3.6), siendo equivalentes los ángulos resultantes para pendientes de techo similares. Los resultados permiten confirmar el efecto negativo de la doble cubierta sobre la transmisión de radiación PAR, viéndose reducida entre el 5 al 9% en techos de doble cubierta.

*Tabla 3.6 : Valores de transmitancia de radiación PAR para cubiertas simples y dobles en techos con pendientes de  $20^\circ$  y  $30^\circ$ .*

Cubierta	Pendiente del techo	ángulo $\theta$	transmitancia
PE LDT150	20	$23^\circ 43'$	0.81
	30	$14^\circ 37'$	0.80
PE LDT150 + PE 50	20	$24^\circ 22'$	0.72
	30	$14^\circ 52'$	0.75

Si se comparan los datos con los obtenidos en las mediciones de transmisión de radiación solar realizadas en el invernadero (Tabla 3.5), teniendo en

### ***Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.***

---

cuenta que la inclinación del techo del mismo es de 20° y considerando un ángulo  $\theta$  equivalente (entre 21°04' y 28°20' de la tabla 3.5), podemos ver que el promedio radiación PAR transmitida por la doble cubierta es inferior a la radiación total registrada en el invernadero. Por otro lado, extrapolando datos de la figura 3.5 a, para el ángulo  $\theta$  de 20°, la doble cubierta PE LDT150 + PE 50 presentó una transmitancia de radiación global de 0.79 mientras que la transmitancia de radiación PAR (tabla 3.6) fue de 0.72. A partir de estos resultados podríamos decir que es esperable una mayor reducción de la transmitancia de la radiación PAR con respecto a la propiedad que presente este tipo de cubierta de transmitir la radiación total.

Los valores de transmitancia de radiación PAR obtenidos en este trabajo son menores a los reportados por Wang *y col.* (1999), quienes señalan valores de transmitancia de PAR de 0.86 para láminas de polietileno, pero al no señalan los autores el grosor del material con el cual han trabajado no permite comparar los resultados.

#### **3.4.2. Infrarrojo largo**

Los distintos materiales de cubierta mostraron diferentes valores de transmitancia a la radiación térmica ( $\tau_{tmc}$ ), de la tabla 3.7 se puede inferir la capacidad de retención de calor de los distintos materiales utilizados como cubierta en los invernaderos patagónicos. Se observa que el polietileno cristal presenta pobre capacidad de retención de calor ya que este material transmite el 74% de la radiación infrarroja larga. Por otro lado, entre los materiales con aditivos denominados “térmicos” (PE LDTX y PE LDT), también se registraron diferencias significativas en cuanto a su capacidad para retener este tipo de radiación, siendo el PE LDTX 150 el material con mejores propiedades térmicas.

El empleo de una doble cubierta de polietileno térmico más polietileno cristal permite una importante reducción de la transmisión de radiación infrarroja larga observándose que el empleo de una doble capa inferior de PE 50 implica una disminución en la pérdida de calor del 11% para el caso del PE LDT 150 y del 7% para la cubierta de PE LDTX 150, como se puede observar en la tabla 3.7.

*Tabla 3.7. Transmitancia al infrarrojo largo para distintas cubiertas y materiales de cubierta*

Tipo de cubierta	$\tau_{tmc}$	+/-
Cubierta simple PE LDT 150	0.30 b	0.02
Cubierta simple PE LDTX 150	0.22 c	0.01
Doble cubierta PE LDT 150 + cristal 50	0.19 d	0.02
Doble cubierta PE LDTX 150 + cristal 50	0.15 e	0.01
Polietileno cristal 50	0.74 a	0.01

*Letras seguidas por igual número no difieren significativamente (LSD 0.05)*

Feuilloley e Issanchou (1996), citan, para cubiertas de polietileno de baja densidad (LDPE) de 200  $\mu\text{m}$ , triple capa coextruido, valores de transmitancia al infrarrojo largo de 0.38, sensiblemente mayores a los obtenidos en la presente experiencia. Por otra parte, Nijkens y col. (1985) citan un valor de transmitancia de 0.77 para cubiertas de polietileno.

En mediciones de transmitancia de cubierta de polietileno térmico, Papadakis y col. (2000) cita valores de  $\tau_{\text{tmc}}$  de 0.28 para el para el rango de longitudes de onda entre 2.5-50  $\mu\text{m}$  y 0.21 para el rango entre 7-14  $\mu\text{m}$  mientras que para el polietileno cristal la transmitancia fue de 0.61 y 0.55 para los respectivos rangos de radiación, considerando el rango de medición de los sensores empleados en las mediciones de la presente experiencia podemos observar un comportamiento similar en las cubiertas PE LDT 150 y cristal con respecto a la  $\tau_{\text{tmc}}$  calculada.

La menor transmisión de calor debida al techo doble se debe a la capacidad de aislamiento del aire retenido entre la cubierta externa y la cubierta interna.

Para modelos de simulación de clima en el interior de un invernadero suelen tomarse valores de  $\tau_{\text{tmc}}$  determinados para distintos materiales. Por ejemplo, Pieters y col. (1997) consideran dicho valor 0.70 para el polietileno normal o cristal y 0.18 para el polietileno térmico. Podemos decir que no existe una gran variación en los valores que corresponden al polietileno normal pero que en la medida que los distintos materiales plásticos tengan en su constitución aditivos que le permiten distintas propiedades, entre ella permitir retener más el calor, la respuesta con respecto a la transmitancia es variable siendo difícil la comparación debido a no contar con suficiente información por parte de los fabricantes.

Los resultados de estos trabajos de evaluación de distintos tipos de cubiertas empleadas en los invernaderos del norte de la Patagonia, permiten asegurar que los materiales empleados presentan tan buena transmitancia de radiación solar como los utilizados en los invernaderos europeos. Probablemente habría que implementar mejoras en la estructura del invernadero experimental ya que la misma podría estar interfiriendo en la transmisión de la luz dentro del mismo.

El empleo de la doble cubierta significa consecuente reducción de la luz y de la radiación PAR, lo cual influye tanto en los rendimientos como en la calidad de la producción (Castilla y col., 1999). Pero, considerando las condiciones climáticas regionales y dado que durante los meses más fríos es necesario el aporte de calor para lograr las temperaturas óptimas, tema discutido en el capítulo 2, a pesar de la disminución de la luz, el empleo de la doble cubierta del techo del invernadero debe ser considerado como forma

### ***Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.***

---

pasiva de ahorro pasivo de energía debido a que permite disminuir la pérdida de calor.

#### ***3.5. Conclusiones***

Existe una disminución de la transmitancia de la radiación solar del orden del 8-9% debida a la colocación de la doble cubierta de techo.

La doble cubierta, en techos de una pendiente de 20°, implica una disminución de la transmitancia a la radiación PAR del 8- 9%.

Las cubiertas con aditivos para mayor duración (PE LDTX 150) muestran mayores valores de luz transmitida dentro del invernadero con respecto a las cubiertas sin este aditivo.

El PE LDTX 150 permite disminuir la pérdida de calor por transmisión de radiación térmica con respecto al PE LDT 150.

El empleo de una doble cubierta de polietileno normal o cristal, de 50 µm de grosor, permite reducir las pérdidas de calor entre el 7 y 11%.

#### ***3.6. Bibliografía***

- ASHRAE ,1989. Handbook. Fundamentals American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, INC
- Bouzo, C.A.; Pilatti, R.A.. 1999. Evaluación de algunos factores que afectan la transmisión de radiación solar en invernaderos. Revista FAVE 13 (2): 13-19
- Castilla, N.; Lorenzo, P.; Montero, J.I.; Fereres, E.; Bretones, F.; López-Gálvez, J.; Pérez-Parra, J. 1988 Alternative greenhouses for mild winter climate areas of Spain- Preliminary report Acta Horticulturae 245:63-70
- Castilla, N.; Lorenzo, P.; Perez-Parra, J.; Montero, J.I.; Fereres, E.; Bretones, F.; López-Galvez, J. 1990 New greenhouse structures for the south of Spain Acta Horticulturae. 281:153-158
- Castilla, N.; Lopez-Galvez, J. 1994 Vegetable crop responses in improved low-cost plastic greenhouses. Journal of Horticultural Science 69 (5) 915-921
- Castilla, N.; Hernández, J.; Quesada, F.M.; Morales, M.I.; Guillén, A.; Escobar, I.; Montero, J.I. 1999. Alternative asymmetrical greenhouses for the mediterranean area of Spain. Acta Horticulturae. 491:83-86
- Cockshull, K.E. 1988 The integration of plant physiology with physical changes in the greenhouse climate Acta Horticulturae 229:113-123
- Critten, D.L. 1984. The effect of geometric configuration on the light transmission of greenhouses. J. Agr. Engng. Res. 29 (3): 199-206



***Tesis Doctoral. Estudio de condiciones térmicas y lumínicas y determinación de alternativas tecnológicas para el ahorro de energía en invernaderos de la Patagonia Norte - Argentina***

---

- Critten, D.L. 1987. Light transmission losses due to structural members in multispans under direct light conditions. *J. Agr. Engng. Res.* 38 (3): 209-215
- Critten, D.L. 1988. The transmission of direct light by structureless symmetric-roofed multispans greenhouses with non-absorbing cladding. *J. Agr. Engng. Res.* 40 (3): 225-232
- Duffie, J.A.; Beckman, W.A.. 1980. *Solar engineering of thermal processes.* A Wiley-Interscience publication. USA.
- Feuilloley P.; Issanchou, G.. 1996. Greenhouse covering materials measurement and modelling of thermal properties using the hot box method, and condensation effects. *J. Agr. Engng. Res.* 65: 129-142
- Geola F.; Kashti Y.; Peiper, U.M. . 2000. Solar radiation transmissivity of greenhouse cladding materials. *Acta Horticulturae.* 534:109-116
- Golberg; M.; Mascarini, L.; Orden, S.; Sierra, E.M.. 1996. Transmisión espectral en la banda de la radiación fotosintéticamente activa de las cubiertas plásticas para invernadero. *Horticultura Argentina* 15 (38): 51-54
- Monteith J.L.; Unsworth, M.H.. 1990. *Principles of environmental physics.* 2nd. Edn. Edward Arnold Ed. London U.K.
- Montero, J.I.; Antón, A. 1993. *Tecnología del invernadero. Curso de tecnología de la horticultura protegida.* Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- Montero; J.I.; Antón A.; Muñoz,P. 1998. Modificaciones en las estructuras e instalaciones de invernaderos orientadas a la reducción del impacto ambiental. *Encuentro ambiental almeriense: en busca de soluciones.* Almería, España.  
[www.gem.es/MATERIALES/DOCUMENT/DOCUMENT/g02/d02101/d02101.htm](http://www.gem.es/MATERIALES/DOCUMENT/DOCUMENT/g02/d02101/d02101.htm)
- Montero, J.I.; Antón, A.; Hernández, J.; Castilla, N. 2001. Direct and diffuse light transmission of insect-proof screens and plastic films for cladding greenhouses. *Acta Horticulturae.* 559:203-209
- Nijkens, J. ; Deltour, J.; Coutisse, S.; Nisen, A. 1985. Radiation transfer through covering materials, solar and thermal screens of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology.* 35 : 229-242
- Nijskens, J.; Deltour, J.; Albrecht, E.; Gratraud, J.; Feuilloley,P. 1990. Comparative studies on the ageing of polyethylene film in the laboratory and in the practical use. *Plasticulture.* 87:11-20
- Orden, S.; Goldberg, M.; Quartino, R.; Mascarini, L.; Landini, A.; Malleville, H.; Botín, L. 2000. Estudio comparativo entre ensayos de exposición natural y envejecimiento acelerado de films de polietilenos para invernaderos. *Agr. Técnica.* 60(3):95-304
- Papadakis, G.; Manolakos D.; Kyritsis, S. 1998. Solar Radiation Transmissivity of a Single-Span Greenhouse through Measurements on Scale Models. *J. Agric. Engng. Res.* 71: 331-338
- Papadakis, G.; Briassoulis, D.; Scarascia Mugnozza, G.; Vox, G.; Feuilloley, P.; Stoffers, J.A. 2000 Radiometric and thermal properties of, and Testing

***Capítulo 3: Evaluación de las propiedades lumínicas y térmicas de los materiales de cubierta empleados en los invernaderos del norte de la Patagonia.***

---

- methods for, greenhouse covering material (review paper) *J. Agr. Engng. Res.* 77 (1) 7-38
- Pearson, S.; Wheldon, A.E.; Hadley, P. 1995. Radiation transmission and fluorescence of nine greenhouse cladding material *J. Agr. Engng. Res.* 62: 61-70
- Pieters, J. G.; Deltour, J.M.; Debruyckere, M.J. 1995. Onset of condensation on the inner and outer surface of greenhouse covers during night. *J. Agr. Engng Res.* 61: 165-171
- Pieters, J. G.; Deltour, J.M.; Debruyckere, M.J. 1997. Light transmission through condensation on glass and polyethylene. *Agricultural and forest meteorology.* 85: 51-62
- Pieters, J. G.; Deltour, J.M. 1997. Performances of greenhouses with the presence of condensation on cladding materials *J. Agr. Engng. Res.* 68: 125-137.
- Pollet, I.V.; Pieters, J.G. 1999. Laboratory measurements of PAR transmittance of wet and dry greenhouse cladding materials. *Agricultural and forest meteorology.* 93: 149-152
- Pollet, I.V.; Pieters, J.G. 1999. Measuring facility for (shortwave) radiation transmission of condensation covered greenhouse cladding. *Acta Horticulturae.* 486: 55-60
- Pollet, I.V.; Pieters, J.G. 2000<sup>a</sup>. PAR transmittance of dry and wet glass. *Acta Horticulturae* 534:285-292.
- Pollet, I.V.; Pieters, J.G. 2000<sup>b</sup>. Condensation and radiation transmittance of greenhouse cladding materials, Part 3: Results for glass plates and plastic films *J. Agr. Engng. Res.* 77 (4): 419-428.
- Sierra, E.M.; Orden S.; Golberg M. y Mascarini, L. 1994. Evaluación de plásticos para invernaderos. *Rev. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.* 14 (1): 83-89
- Wang, S.; Pieters, J.G.; Deltour, J. 1999. Studies of radiometric, thermal and climatic properties of a new greenhouse covering material. *Acta Horticulturae.* 486:49-54
- Zhang; Y.; Gauthier, L.; de Halleux, D.; Dansereau, B.; Gosselin, A. 1996. Effect of covering materials on energy consumption and greenhouse microclimate *Agricultural and Forest Meteorology.* 82: 227-244

*Capítulo 4. Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.*

---

*Capítulo 4: Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.*

---

*“En Buenos Aires los zapatos son modernos/ pero no lucen como en la plaza de un pueblo/ dejá que tu luz chiquitita/ hable en secreto a la canción/ para que te ilumine un poco más el sol”*  
*León Gieco*

#### ***4.1. Introducción***

La transmisión de la radiación al interior del invernadero ha tenido fundamental atención en trabajos de investigación de manejo de las condiciones medioambientales dentro de las estructuras de protección de cultivos (Critten 1984, Zhang y col. 1996, Geoola y col. 2000, Feuilloley e Issanchou, 1996). La franja de radiación solar comprendida entre los 400-700 nm, denominada radiación fotosintéticamente activa (PAR de la denominación inglesa) es la responsable del proceso de fotosíntesis de la planta.

Zabeltitz (1998) definió a la radiación global transmitida dentro del invernadero como “transmisividad global del invernadero”. La productividad de los cultivos exigentes en luz puede verse limitada si los niveles de radiación no alcanzan valores óptimos. Estos valores dependen de distintos factores, entre ellos, las condiciones climáticas (principalmente la nubosidad que determina la proporción de radiación directa y difusa), la posición del sol en el cielo (dependiendo de la fecha, hora y latitud), la geometría de la cubierta del invernadero, la orientación del invernadero (este-oeste, nort-sur), del material de las cubiertas y de los elementos que componen la estructura y equipos que producen sombreado, limitando la radiación del invernadero (Bot, 1983; Heuvelink y col., 1995; Guertal y Elkins, 1996; Zabeltitz, 1998).

Según Castilla y col. (2001), la transmisividad global del invernadero, debe integrarse como valor medio en todo el invernadero debido a la variabilidad de la radiación incidente en los diversos sectores del invernadero en días despejados, debido al predominio de la radiación directa (Bot, 1983). En días completamente nublados la situación es diferente, dado que no existen sobras definidas la radiación se distribuye en forma más homogénea dentro del invernadero (Baille, 1998).

Muchos estudios han cuantificado las propiedades de la transmisión de la radiación en los invernaderos. Nijskens y col. (1985) examinaron la transmisión espectral de los films entre 400 a 40000 nm y describieron las técnicas matemáticas que pueden ser usadas para cuantificar la luz en tres distintas longitudes de onda: la radiación fotosintéticamente activa (PAR) de 400-700 nm, el espectro solar de 400-2500 nm y el espectro de onda larga de

#### *Capítulo 4. Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.*

---

2500 a 40000 nm. Altos valores de transmisión de radiación PAR son importantes para los mencionados procesos de fotosíntesis, hasta umbrales de saturación a partir de los cuales, incrementos de la radiación no se traducen en incrementos de materia seca en el vegetal. Por otro lado, buena transmisión de radiación solar total en altas latitudes son también importantes dado que la misma es la energía que calienta el invernadero e influye en la temperatura del aire y el consumo de combustible de calefacción.

Otros trabajos de mediciones de la distribución del flujo de fotones en el rango 400-1100 nm bajo un invernadero de techo capilla y túnel con distintos tipos de cubierta (Kittas y col., 1999), determinaron algunas diferencias entre invernaderos con respecto a la distribución de la luz dentro los mismos. Los resultados obtenidos indican que el vidrio incrementa la radiación PAR con respecto a la radiación infrarroja cercana (NIR) mientras que los materiales plásticos (fibra de vidrio y polietileno) muestran una disminución de este ratio.

Se entiende como “nivel de saturación de radiación” el nivel a partir del cual los incrementos de radiación no conllevan a aumentos paralelos de fotosíntesis. En modelos de invernaderos de condiciones muy controladas, se logran incrementos del 1% de la tasa de fotosíntesis neta para incrementos de radiación del 1%, dentro del rango 0-200 W\*m<sup>-2</sup> y sobre 0.7% de incremento de producción para aumentos de radiación del 1% en el rango de 200-300 W\*m<sup>-2</sup> (Hand y col., 1992).

La radiación que llega al dosel vegetal está condicionada no sólo por las propiedades de transmisión del material de cubierta: las condiciones de radiación externa y el efecto de sombreado de la estructura del invernadero son los factores fundamentales que determinan el nivel de incidencia de la radiación. La transmitancia también está íntimamente relacionada con el ángulo de incidencia de la radiación con la estructura. Trabajos de Critten (1987) realizados en estructuras multicapilla permitieron asegurar que las pérdidas diarias debido a los miembros estructurales alineados N-S son virtualmente independientes de la elevación del sol y el azimut y se puede escribir una simple relación, mientras que, para los miembros de la estructura dispuestos E-O las pérdidas dependen altamente de la forma y de la estación.

La radiación solar transmitida desde el exterior al interior del invernadero está relacionada tanto a la orientación como la pendiente de la cubierta los cuales definen el ángulo de incidencia de la radiación sobre la cubierta. La pendiente de la cubierta incide en la transmitancia, siendo menor en invernaderos multimodulares con respecto a los unimodulares, debido al sombreado entre los módulos, sobre todo cuando las pendientes son mayores (Castilla y col., 2001).

Existen numerosos trabajos, realizados en invernaderos de vidrio, que analizan la influencia de la orientación de la estructura, concluyendo que, para una misma orientación, por lo general los invernaderos monocapilla proporcionan mayor radiación que los multicapilla (Giacomelli y Ting, 1999). Por otro lado, los invernadero multicapilla orientados norte-sur, presentan mejor captación y uniformidad de la radiación durante el verano mientras que si están orientados E-O, las mejores condiciones las presenta en los meses de invierno (Papadakis y col., 1999).

Dimitrijevič y col (1999), evaluaron la transmisión de luz diaria y mensual comparando distintos tipos de invernaderos de cubierta de polietileno frente a un invernadero multicapilla de vidrio determinando que el vidrio permite mejor transmisión de luz pero a su vez, entre los invernaderos de cubierta plástica la estructura de arco simple presentó mejor transmitancia que el múltiple arco. También Kittas y col. (1999) comparó la influencia del material de cubierta en distintos tipos de invernadero, determinando, desde un punto de vista práctico, que el vidrio es el único material que permite una mayor transmisión de radiación PAR con respecto al total de la radiación transmitida dentro del invernadero.

Pieters (1994), estudió la radiación PAR y concluyó que existe una mayor transmitancia de esta franja para los invernaderos con orientación E-O, pero, por otro lado, varios autores (Giacomelli y Ting, 1999; Jaffrin y Urban, 1990; Kurata, 1990), determinaron que la orientación norte-sur presenta siempre mayor uniformidad de la radiación sobre el dosel vegetal debido a que el movimiento del sombreado producido por los canalones se desplaza constantemente a través del cultivo de oeste a este. Coincidiendo con esos resultados, mediciones realizadas por Guertal y Elkins (1996), en un invernadero con orientación N-S, establecieron que las plantas ubicadas en forma perpendicular a la cumbrera, no fueron afectadas por la distribución espacial de la radiación PAR. Por su lado, Papadakis y col. (1999), en evaluaciones realizadas en Atenas (37° 58' N), empleando un modelo en escala de cubierta de acrílico, simuló diferentes orientaciones del azimut del invernadero y diferentes posiciones del sol, encontrando que la orientación E-O es preferible a la orientación N-S durante los meses de invierno mientras que en el verano no se detectaron diferencias entre ambas orientaciones en lo que se refiere a energía acumulada.

Trabajos realizados en Argentina, en la ciudad de Santa Fé (31° 25' S), evaluando la transmitancia de invernaderos existentes en la zona, determinaron que las estructuras orientadas E-O mostraron valores 6.7% más altos que los ubicados N-S y que el doble techo utilizado como técnica de ahorro de pérdida de calor, significa una reducción del 8.5% de la luz transmitida (Bouzo y Pilatti, 1999). Los mismos autores registraron mayor uniformidad en la luz transmitida en el sentido transversal de los invernaderos de las estructuras metálicas de techo curvo frente a estructuras de madera de techo capilla, adjudicando la pérdida a mayor

#### *Capítulo 4. Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.*

---

efecto de sombreado por mayor cantidad de elementos estructurales en los invernaderos de madera.

La pendiente de la cubierta también ha sido tema de investigación y las conclusiones resultan contradictorias. Por un lado Kosai (citado por Kurata, 1990), dedujo que las pendientes elevadas producen una reducción de la transmitancia y Pieters (1994), encontró que los invernaderos de pendiente menor permiten una transmitancia de PAR mayor independientemente de la orientación de la cumbrera (una diferencia del 6% para pendientes de cubierta de 20° y 30° respectivamente, en invernaderos paralelos).

En forma contraria a esos resultados, Critten (1983, citado por Kurata, 1990), al incluir las reflexiones en la cara interna de la cubierta (factor no tomado en cuenta por Kosai), demostró que el aumento de la pendiente del techo permite mayor transmitancia. Stoffers (1998) propone, para cubiertas sin considerar estructura, un modelo que determina, un incremento de la transmitancia del 4% al aumentar de 10° a 40° la pendiente de cubierta.

En trabajos realizados en invernaderos plásticos, Bailey y Richardson (1990) verificaron que la transmisión del material de cubierta aumenta con el ángulo del techo hasta un ángulo de 30°, valor a partir del cual los beneficios se contrarrestan con las pérdidas debido a que las estructuras que sostienen la cubierta (cabreadas, cerchas), se encuentran a menor distancia. Por otra parte, según Montero (2001, citado por Castilla, 2001) los materiales tricapa muestran mejor transmitancia de la radiación solar directa que el polietileno térmico, con valores de 89% de luz transmitida por cubierta tricapa con un ángulo  $\theta$  de 20°, y 86% con ángulo de 40°.

La simetría de los techos ha sido también estudiada con la finalidad de aumentar la transmitancia, en 1994, Castilla y Lopez Galvez, encontraron beneficios al analizar un invernadero asimétrico de pendiente 18°Sur-8° Norte frente a uno plano convencional. Trabajos realizados más recientemente (Quesada y col. 1998 y Castilla y col. 1999; 2001, Soriano y col., 2004) han encontrado incrementos en la producción aumentando las pendientes del techo, al emplear un invernadero de 45° de pendiente sur y 27° de pendiente norte frente a uno de 11° al sur y 24° al norte, ambos en orientación E-O, latitud 37°N. Cuando trabajaron con invernaderos orientados norte-sur no encontraron importantes efectos debido al aumento de la pendiente.

Por otra parte, Soriano y col. (2004), determinaron, para la orientación E-O, que el invernadero simétrico 27°-27° no solamente presentó mayor transmisión durante el solsticio de invierno, sino que estos de porcentaje de luz transmitida no difirió notablemente de los valores obtenidos durante el verano.

Existe una dependencia estacional en el ratio de PAR con el espectro de la radiación solar. Los valores más altos ocurren durante el verano mientras que en invierno estos valores son menores y más variables (Alados y col.1996, Dismitrijevich y col. 1999)

Otro factor adicional que determina las propiedades de transmitancia del material de cubierta de un invernadero es la presencia de condensación en la superficie de la cubierta expuesta al cultivo. La condensación frecuentemente ocurre en los invernaderos debido a la alta tasa de evapotranspiración y a los bajos niveles de aislamiento de las construcciones.

Pollet y Pieters, (1999) midieron el efecto de la condensación en la transmitancia de la radiación PAR en una cubierta vertical de un invernadero bajo condiciones controladas de clima para varios ángulos de incidencia y observaron que la diferencia de transmitancia absoluta entre polietileno seco y húmedo decrece gradualmente del 23% al 0% incrementando los ángulos de incidencia de 0° a 75°. La transmitancia de la radiación difusa para un film de polietileno húmedo fue 15% menor que uno seco. Trabajos posteriores de los mismos autores (Pollet y Pieters, 2002), en los cuales evaluaron la transmitancia para cubiertas húmedas y secas comparando distintos tipos de cubierta con y sin aditivos anti-condensación les permitieron afirmar que los materiales con aditivos anticondensación no ven afectada la transmitancia en condiciones de alta humedad, a su vez que corroboraron que la condensación disminuye la transmitancia.

Pearson y col (1995) evaluaron las propiedades de transmisión de radiación PAR de distintos materiales de cubierta, también corroboran pérdidas en la luz transmitida en valores promedio del 13% debido a la condensación sobre el material de cubierta.

El empleo de techos planos o techos curvos también ha sido tema de investigación, Critten (1988) evaluó la transmisión de luz de invernaderos de techos curvos frente a techos planos, concluyendo que, para un mismo ángulo de pendiente de la cuerda del curvo frente al ángulo del techo en capilla, no se evidencian diferencias en la luz transmitida salvo la debida a miembros constructivos de la estructura.

#### ***4.2. Objetivo***

Comparar la transmitancia de la radiación fotosintéticamente activa, durante la temporada de cultivo de primavera-verano, para distintos tipos de invernaderos con techos curvos y planos, utilizados comúnmente en norte de la Patagonia.



### *4.3. Materiales y métodos*

#### *4.3.1. Instrumental y metodología de registros de datos.*

Para medir la radiación PAR se empleó una barra de medición (capítulo 2) que utiliza el método PPF (Photosynthetic Photon Flux), la cual integra el flujo de fotones recibidos en el metro lineal. Los registros se expresan en quantum de energía, es decir el número de fotones de la longitud comprendida en el rango 400-700 nanómetros, incidentes en un área determinada en una unidad de tiempo, en relación al número de Avogadro ( $6.0022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ). Por lo tanto, los datos registrados se expresan como:  $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Para una mejor interpretación y comparación con otros registros, se suele expresar la radiación como  $\text{W} \cdot \text{s}^{-1}$  o megajoules (MJ), siendo la equivalencia:  $1\text{W} = 1.89375 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

Se tomaron registros de radiación fotosintéticamente activa (PAR) en el exterior y en el interior de los invernaderos con distinta forma de techo, y cubierta simple y doble. Todos ellos presentaron cubiertas de polietileno de larga duración térmico coextruido triple capa (LDTX), cuyas características se exponen en la tabla 4.1. El invernadero de doble capa presentó un segundo techo inferior de polietileno cristal de 50  $\mu$ .

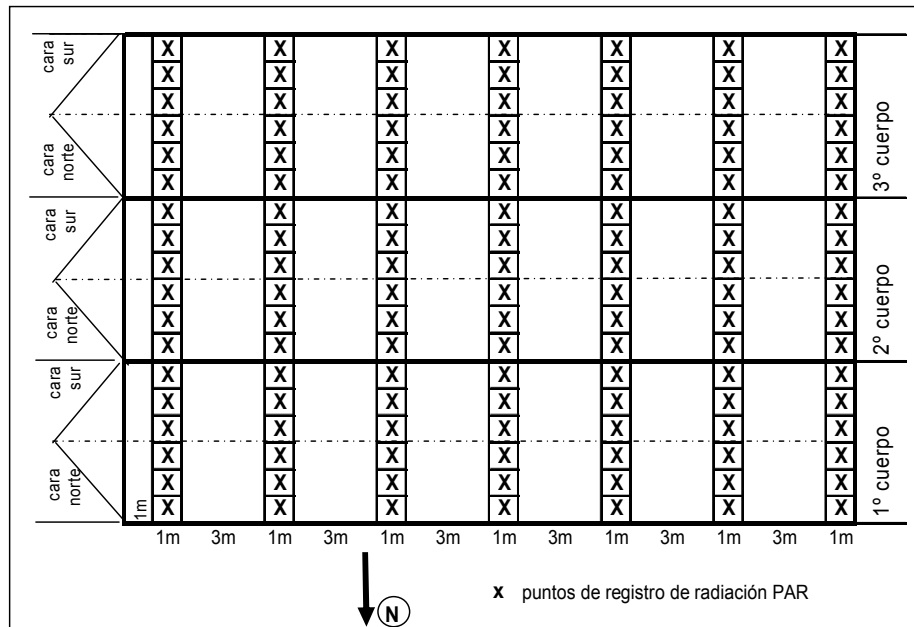
*Tabla 4.1. Datos de fábrica de los materiales de las cubiertas*

	PE LDTX
Grosor ( $\mu\text{m}$ )	150
Transmisión radiación infrarroja corta (%)	88
Transmisión radiación infrarroja larga (%)	12
Difusión de luz (%)	22

Se emplearon dos barras lectoras de radiación PAR. Los registros de datos de radiación PAR se realizaron a 1.5 metros de altura del piso, tanto en el exterior como en el interior. En el interior se hicieron lecturas sobre 7 hileras distanciadas a 3 metros entre ellas, a lo ancho de las estructuras (en el sentido E-O), sobre los 3 cuerpos de las estructuras de techo capilla (Figura 4.1) y los 4 cuerpos de la estructura de techo semiparabólico (figura 4.2). Sobre cada línea se realizaron lecturas distanciadas 1 metro en dirección N-S cubriendo el ancho de cada cuerpo de la estructura de cada invernadero, correspondiendo algunos puntos de lectura a la proyección de la luz transmitida por la cara norte y otros puntos a la proyección de la cara sur de cada cuerpo del invernadero. En el exterior los datos fueron tomados en coordinación con cada lectura del interior, realizando un desplazamiento

sobre el norte de la estructura, en el mismo sentido del desplazamiento del interior y situándose frente a cada línea de lectura interior.

La recolección de datos se realizó el 15, 16 y 24 de octubre de 2004, durante el mediodía solar. Los datos almacenados fueron luego procesados por el programa Excel de Microsoft® versión 2003, los mismos fueron analizados estadísticamente por el programa SAS comparándose las medias mediante el test LSD (0.05).



*Figura 4.1. Diagrama de registros de datos de radiación PAR en invernadero multicapilla*

## Capítulo 4. Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.

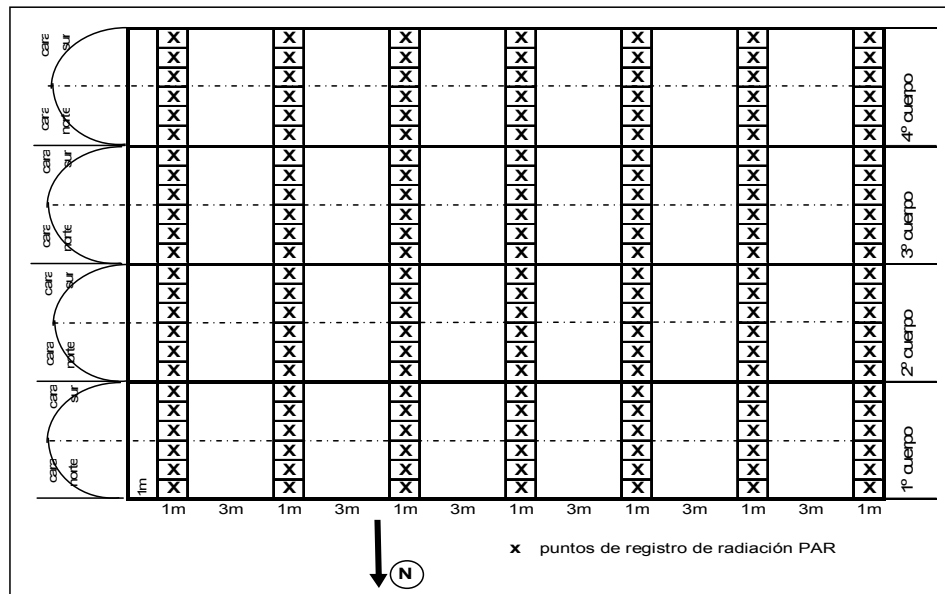


Figura 4.2. Esquema de registro de datos de radiación PAR en invernadero de techo semiparabólico.

### 4.3.2. Descripción de los invernaderos

Las mediciones fueron realizadas en tres invernaderos metálicos, dos de ellos conformados por tres cuerpos de techo en capilla y el restante un invernadero de techo semiparabólico de estructura de caños tubing. Dichos tipos de estructuras han sido descritas en la introducción de la presente tesis. Por otra parte se pudieron realizar comparaciones de transmitancia de luz en techos dobles y simples.

Todos los invernaderos en los cuales se realizaron las mediciones están orientados en el sentido de la cumbrera E-O.

#### Invernadero triple capilla con techo simple (TCS)

Se trabajó en un invernadero de estructura metálica de hierro que presentó una altura al canalón de 2.10 metros y altura a cumbrera de 3.30 metros. Constituido por 3 cuerpos, cada uno de ellos tiene un ancho de 6 metros con una distancia de 5 metros entre columnas. El ángulo de inserción del techo es de  $21.8^\circ$  siendo la cubierta, en el momento de las lecturas de polietileno LDTX de  $150\mu\text{m}$ . En la figura 4.3 se observa una vista frontal de los 3 cuerpos, pudiéndose notar el techo de cubierta simple y los elementos estructurales del techo.



*Figura 4.3. Invernadero metálico triple capilla de techo simple. Alto Valle de Río Negro- Patagonia-Argentina.*

*Invernadero techo semiparabólico múltiple de techo simple (SPM)*

Estructura metálica de caño tubing compuesta por 4 cuerpos de techo de forma semiparabólica, presentando las siguientes dimensiones: altura al canalón: 2.10 metros, altura a cumbre 3.30 metros. Ancho de cada cuerpo: 6 metros, distancia entre columnas: 4 metros. Ángulo de inserción del techo: 21.8 °. Tipo de cubierta: Polietileno LDTX de 150 $\mu$ m. En las figuras 4.4 y 4.5 se pueden apreciar las imágenes del conjunto y la vista frontal respectivamente, pudiéndose observar en ésta última el techo simple con los componentes de la estructura del techo.

*Capítulo 4. Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.*

---



*Figura 4.4: Vista en perspectiva de invernaderos metálicos de 4 cuerpos, de techo semi parabólico.*



*Figura 4.5: Vista frontal de un cuerpo de un invernadero de techo semi parabólico de cubierta simple.*

*Invernadero triple capilla con techo doble (TCD)*

Las características constructivas del invernadero, ubicado en INTA, Estación Experimental Alto Valle, han sido descritas en el capítulo 3, debido al largo total de la estructura, conservando el mismo distanciamiento entre los puntos de lectura expuestos en la figura 4.1, los puntos de lectura en el sentido E-O se redujeron a 5 hileras. Durante la temporada 2003, la cubierta evaluada fue de polietileno LDTX de 150  $\mu\text{m}$  de espesor comprendiendo un doble techo de polietileno cristal de 50  $\mu\text{m}$  de espesor colocado a 10 cm. del techo externo y su orientación en el sentido de la cumbre es E-O. Ángulo de inserción del techo: 21.8 °. En la figura 4.6 es posible observar una vista frontal del invernadero en la cual se percibe, en el cuerpo central, la estructura del techo en la cual se coloca la doble cubierta.



*Figura 4.6- Invernadero triple capilla INTA EEA Alto Valle- (Río Negro. Argentina)*

#### *4.4. Resultados y discusión*

##### *4.4.1. Invernaderos con techo simple*

Lecturas al mediodía solar en días de primavera, con un ángulo  $\theta$  entre 16,2° y 19,8° en el momento de las lecturas, no muestran diferencias significativas en la transmitancia de radiación PAR entre los invernaderos SPM y TCS, siendo el promedio de la misma de 75,9 % para el invernadero de techo curvo y 75,5 % para el multicapilla. Estos valores de transmitancia, son superiores a los informados por Bouzo y Pilatti (1999) quienes registraron valores de transmitancia de radiación solar inferiores al 70% en evaluaciones realizadas durante el mes de agosto (invierno en latitud sur), con ángulos  $\theta$  mayores a los resultantes en el presente trabajo.

**Capítulo 4. Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.**

También se ha podido observar que los registros de radiación PAR fueron menores en la proyección de la cara sur con respecto a la proyección de la cara norte de los cuerpos del invernadero, aunque estadísticamente estas diferencias no fueron significativas (Figura 4.7). Es probable que los elementos estructurales ejerzan algún tipo de interferencia en la transmisión de la luz dentro del invernadero, aunque en primavera avanzada, momento de realización de la experiencia, es de suponer que este efecto sea menor que los esperables al comienzo del ciclo de cultivo ya que según Critten (1987), para el caso de los invernaderos con orientación E-O las mayores pérdidas de ocurren durante el invierno.

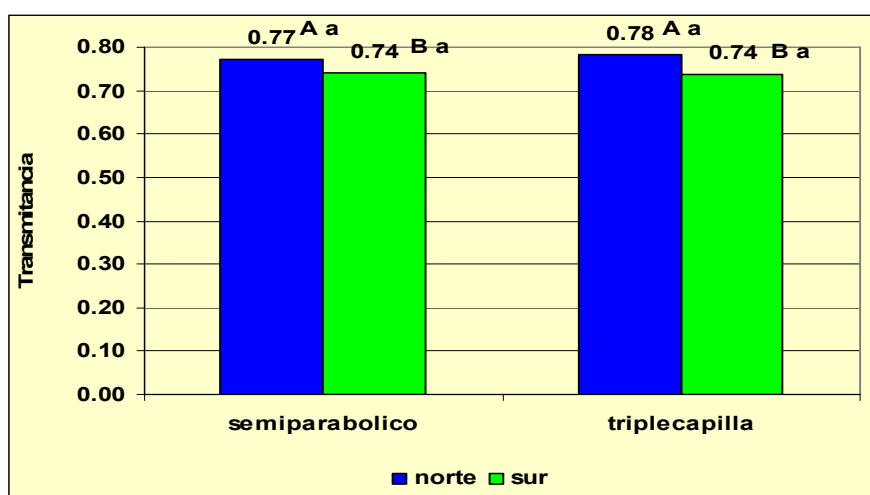


Figura 4.7.: Transmitancia en la proyección de la cara norte y sur de los invernaderos de techo simple en plena primavera (23 octubre 2003). Columnas con igual letra no difieren significativamente (LSD 0.05), mayúsculas para comparar invernaderos y minúsculas para comparar proyección de las caras del invernadero.

En la tabla 4.2 se puede apreciar que, comparando las distintas naves que conforman dichos invernaderos, numerándolas 1,2,3, etc. en el sentido nortesur, tampoco no se detectaron diferencias en la luz transmitida dentro del invernadero.

Tabla 4.2.: transmitancia de radiación PAR para las naves de dos tipos de invernaderos del norte de la Patagonia (16 octubre 2003).

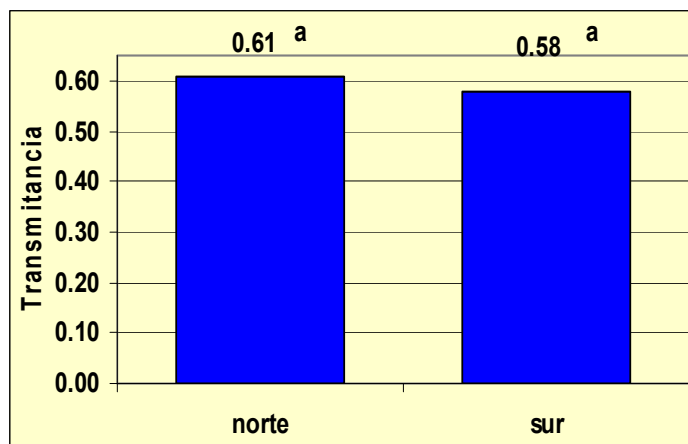
Tipo de estructura	Naves				trasmitancia
	1	2	3	4	
SPM	0.72 aA	0.73 aA	0.72 aA	0.73 a	0.725 A
TCS	0.73 aA	0.73 aA	0.73 aA		0.73 A

Valores con igual letra no difieren estadísticamente (LSD 0.05), letras en mayúscula comparan tipo de estructura, en minúscula comparan naves del invernadero.

Considerando los valores del ángulo de incidencia del rayo solar, estos valores de transmitancia de radiación PAR son inferiores a los valores de transmitancia de radiación solar directa registrados por Montero (2001) en mediciones realizadas con muestras de materiales comúnmente usadas en el sur de España. Además de estar considerándose la transmitancia de un espectro más reducido de la radiación solar es probable que incidan otros factores, como propiedades de los materiales de cubierta, elementos estructurales o características propias del diseño de los invernaderos (Critten, 1987; 1989).

#### *4.4.2. Invernadero multi capilla con techo doble.*

Lecturas realizadas en el cuerpo central del invernadero multicapilla de doble techo no mostraron diferencias significativas en la transmitancia de luz entre las proyecciones de las caras norte y sur a 1.5 metros de altura del piso al mediodía solar (figura 4.8). La radiación PAR transmitida en la proyección de la cara sur fue, en promedio, 3% menor respecto a la cara norte, esta reducción es similar a la registrada en los invernaderos de cubierta simple, por lo cual se puede inferir que el empleo de doble cubierta no afecta la distribución de radiación PAR dentro del invernadero.



*Figura 4.8.: Transmitancia de la radiación PAR en la proyección de las caras de un invernadero triple capilla de doble techo en primavera. Columnas con igual letra no difieren significativamente (LSD 0.05).*

Por otro lado, comparándose la radiación transmitida por los tres cuerpos del invernadero, en una transecta norte-sur, no se registraron diferencias significativas (figura 4.9), resultados que también coinciden con lo observado en los invernaderos de simple techo.



#### Capítulo 4. Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.

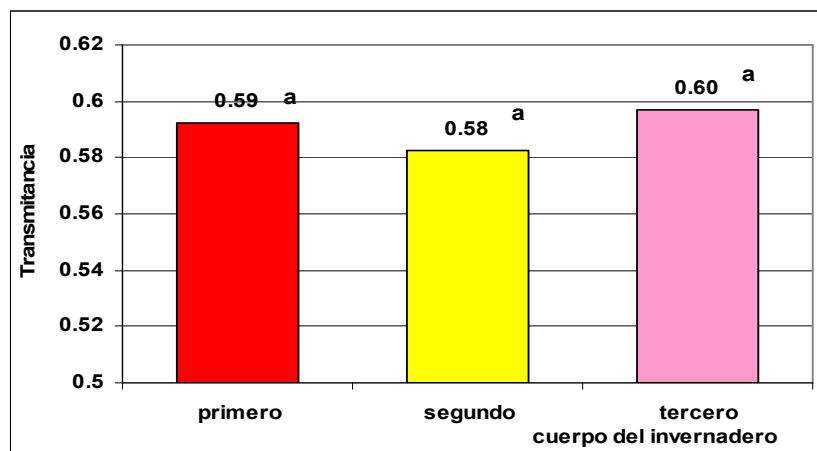


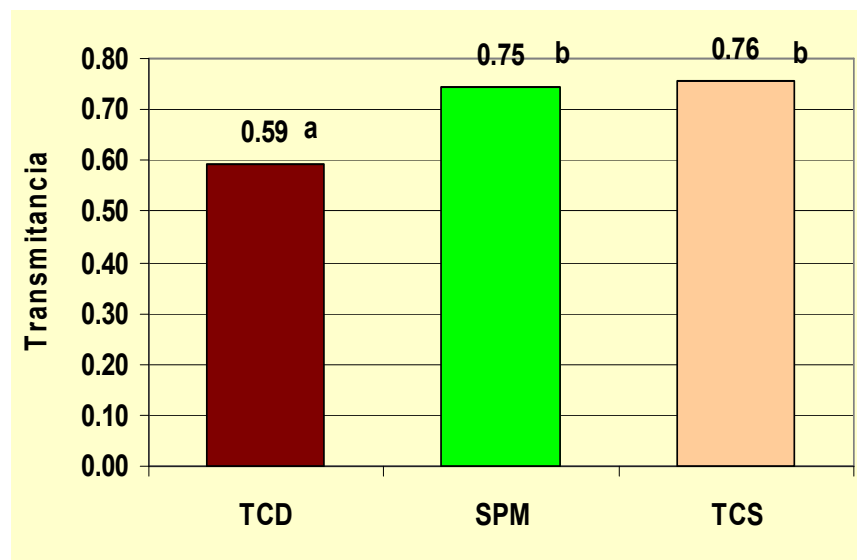
Figura 4.9: Transmitancia de los distintos módulos del invernadero triple capilla.

La no homogeneidad de la radiación transmitida en las proyecciones de las caras norte y sur, aunque no sean estadísticamente significativa, puede ser consecuencia del sombreado producido por elementos estructurales como vigas de las cumbreras y canalones (Bot, 1983).

#### 4.4.3. Transmitancia entre distintos invernaderos

En general, los valores de transmitancia de radiación PAR obtenidos, no difieren con el rango de valores de radiación global observados por Heuvelink y col. (1995), en experiencias realizadas en un invernadero de vidrio tipo Venlo. Las lecturas, realizadas durante el mediodía solar, mostraron diferencias significativas (LSD 0.05) de la transmisión de radiación PAR entre el invernadero con doble techo (TCD) con respecto a los de cubierta simple (TCS y SPM), manifestándose una reducción de la luz transmitida, como consecuencia fundamental de la doble cubierta, del 16-17% (Figura 4.10). El empleo del doble techo, por su lado, durante los meses de mayor condensación de humedad, permite disminuir la presencia de la misma, lo cual significaría un aporte positivo en cuanto a evitar pérdidas de transmisión de luz por condensación de humedad (Pollet y Pieters, 2002).

Los resultados aquí expuestos muestran que el empleo de doble cubierta en el techo conlleva a una disminución de la transmitancia de radiación PAR superior a la disminución de la radiación global expuesta y discutida en el capítulo 3. Esto puede interpretarse como un efecto negativo de la doble cubierta sobre la transmitancia de la radiación PAR aunque también puede deberse a la presencia de mayores elementos estructurales en el invernadero TCD con respecto al invernadero TCS. Otra explicación probable es la existencia de depósito de polvo entre las dos cubiertas en el caso del doble techo, lo cual es probable debido a las condiciones climáticas locales.



*Figura 4.10. Transmitancia de radiación PAR en distintos invernaderos en primavera. Columnas con igual letra no difieren significativamente (LSD 0.05)*

Los valores de radiación PAR externa oscilaron entre 1724.20  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$  y 1803.04  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$  en el momento de las lecturas, significando 1022.27  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$  en el invernadero triple capilla con cubierta doble y entre 1308.96 y 1344.46  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$  en los invernaderos con cubierta simple, datos que confirman en incremento de la reducción de la radiación fotosintéticamente activa debido a la doble cubierta frente a los invernadero de cubierta simple (Tabla 4.3). Estos valores de radiación PAR dentro de los invernaderos comparados son similares a los reportados por Kittas y col. (1999), en una estructura de doble arco con cubierta de polietileno.

Tabla 4.3.: Registros de radiación externa e interna el 24 de octubre de 2003 en el momento de la experiencia en los distintos invernaderos

		$\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$
Multicapilla doble techo (TCD)	exterior	1724.20
	interior	1022.27
Semiparabolico techo simple (SPM)	exterior	1803.04
	interior	1344.46
Multicapilla techo simple (TCS)	exterior	1733.43
	interior	1308.96

En condiciones de alta radiación externa y sin nubosidad, no se detectaron diferencias significativas en la transmitancia de la radiación PAR entre un invernadero metálico de techo multicapilla y uno metálico múltiple de techo semiparabólico, para similares ángulo de inserción del techo, coincidiendo con los resultados obtenidos por Critten (1988), para techos planos de ángulos equivalente a la pendiente de la curva del techo en arco, como

#### *Capítulo 4. Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.*

---

ocurre en el caso de los invernadero TCS y SPM comparados en este trabajo. Para dichos invernaderos, con cubierta simple, la transmisión promedio de radiación PAR global de los invernaderos fue del 75%.

La radiación PAR registrada en el interior de los distintos invernaderos significa entre  $691.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  y  $709.9 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  para invernaderos de techo simple y  $539.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  para el invernadero de doble cubierta. Podríamos decir entonces que, para el modelo de invernadero evaluado, la radiación PAR dentro de los mismos no alcanza los niveles de saturación de fotosíntesis del cultivo de tomate (Hand y col. 1992).

Si consideramos que los estratos inferiores de la planta de tomate reciben menos luz que los superiores, se podría inducir que condiciones que mejoraran la transmisión de radiación fotosintéticamente activa, como por ejemplo un aumento en la pendiente del techo, conllevarían a un aumento en la productividad del cultivo.

Por otro lado, se ha podido comprobar que en ninguno de los invernaderos existe variación estadísticamente significativa de la transmitancia entre los distintos puntos en el sentido E-O, esto lleva a sugerir que la distribución espacial de la luz dentro de los mismos es uniforme lo cual no presenta diferentes condiciones de luz para los procesos de fotosíntesis de los cultivos. En el caso de cultivos altos, como el tomate en pleno desarrollo, será la estructura de las plantas la que puedan determinar una distribución no homogénea de la luz (Hand y col. 1993; Heuvelink y col., 1995) llegando a tener que establecer prácticas de manejo que permitan mantener la distribución homogénea de la misma.

Bouzo y Pilatti (1999) registraron mayor transmitancia en invernaderos de techo semiparabólico frente a los de techos en capilla, sin embargo el tipo de estructura por ellos evaluada podrían haber determinado las diferencias que no se manifiestan en lo resultados aquí expuestos.

Mientras los autores compararon invernaderos de techo curvo de estructura metálica frente a invernaderos multicapilla de estructura de madera, aquí se ha trabajado con estructuras que no difieren demasiado en el ancho y disposición de los elementos verticales ni en los sostenes del techo, variando solo en forma notoria el tipo de techo. Por otra parte los autores mencionan una mejor uniformidad en la distribución espacial de la luz en los invernaderos de techo curvo, diferencias no detectadas en las evaluaciones aquí presentadas.

Teniendo en cuenta que estos resultados son productos de mediciones realizadas en invernaderos comerciales lo cual puede presentar limitaciones metodológicas al comparar entre ellos los resultados obtenidos, éstos no dejan de ser una contribución real a la tecnología de invernaderos en el sur

argentino desde el momento que no existían datos previos sobre la transmisividad global de los invernaderos de la región.

Considerando trabajos realizados por Castilla y col. (2001), y Soriano y col. (2004), se puede afirmar que, si se toma en cuenta la simetría de los techos, los diseños de invernaderos del norte de la Patagonia son adecuados a las condiciones de clima de la región. Por otra parte, la transmitancia de la radiación podría incrementarse aumentando el ángulo de inclinación del techo, sobre todo en períodos de baja inclinación del sol (Castilla y col, 2001) considerando algunas alternativas de adaptación de las estructuras para permitir aumentar la transmitancia. Una de ellas sería elevar la altura central de las estructuras que posibilite ángulos de inserción del techo cercanos a 30° (Castilla, 2001). Otra alternativa posible (o la combinación de ambas) es el empleo de el doble techo interno móvil de tal manera que pudiesen desplegarse durante la noche y replegarse durante el día, para lo cual habría que readaptarse las estructuras que en la actualidad mantienen fija la doble cubierta interna.

#### *4.5. Conclusiones*

Para estructuras metálicas de similares características de construcción con orientación de cumbreira en el sentido E-O, no existen diferencias entre la radiación PAR global transmitida por un invernadero de techo curvo frente a uno de techo en capilla.

Los invernaderos de techo de doble cubierta, orientados en el sentido E-O, durante horas de mediodía solar de ángulo  $\theta$  entre 16° y 19°, presentan disminución del 16-17% de la radiación PAR transmitida frente a invernaderos de techos de simple cubierta.

Durante días de primavera-verano, no se registran diferencias en la radiación transmitida en el sentido N-S, entre invernaderos multicapilla y parabólico múltiple, orientados en el sentido E-O.

El empleo de doble cubierta no altera la distribución de radiación PAR dentro de los invernaderos con respecto a invernaderos de simple cubierta.

#### *4.6. Bibliografía*

- Alados, I.; Foyo\_Moreno, I.; Alado\_Arboledas, L. 1996. Photosynthetically active radiation: measurements and modeling. *Agricultural and forest meteorology*. 78:121-131 2003.
- Bailey, B.J.; Richardson, G.M. 1990. A rational approach to greenhouse design. *Acta Horticulturae*. 281:111-118

*Capítulo 4. Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.*

---

- Baille, A. 1998. Energy Cycle. En: Greenhouses ecosystems. 265-286. Stanhill, G. Enoch, H.Z. Ed. Elsevier. Amsterdam.
- Bot, G.P.A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Thesis Wageningen Agricultural University. Holanda.
- Bouzo, C. A.; Pilatti, R.A 1999. Evaluación de algunos factores que afectan la transmisión de radiación solar en invernaderos. Revista FAVE. 13 (2): 13-19
- Castilla, N.; Lopez-Galvez, J. 1994. Vegetable crop responses in improved low-cost plastic greenhouses. Journal of Horticultural Science. 69 (5) 915-921
- Castilla, N. 1998. Condiciones ambientales en invernaderos no climatizados. Tecnología de Invernaderos II. Curso Superior de Especialización. FIAPA. Pérez Parra y Cuadrado Gómez. Ed.
- Castilla, N.; Hernández J.; Quesada F.M.; Morales M.I.; Guillén A.; Escobar I.; Montero, J.I. 1999. Alternative asymmetrical greenhouses for the mediterranean area of Spain. Acta Horticulturae. 491:83-86
- Castilla, N. 2001. La radiación solar en invernadero en la costa mediterránea española. En: Lopez, J.C.; Lorenzo, P.; Catilla, N.; Pérez-Parra, J.; Montero, J.I.; Baeza, E.; Antón, A.; Fernández, M.D.; Baille, A.; González-Real, M. Incorporación de tecnología al invernadero mediterráneo. Ed. Cajamar. pp 35-48.
- Castilla, N.; Hernández, J.; Quesada, F.M., Morales, M.I.; Guillén, A.; Soriano, T. Escobar, I.; Antón, A.; Montero, J.I. 2001. Comparison of asymmetrical greenhouse types in the Mediterranean area of Spain. Acta Horticulturae. 559: 183-186.
- Critten, D. L. 1984. The effect of geometric configuration of the light transmission of greenhouses. J. Agr. Engng. Res. 29 (3): 199-206
- Critten, D. L. 1987. Light transmission losses due to structural members in multispans under direct light conditions. Agr. Engng Res. 38 (3): 209-215
- Critten, D.L. 1988. Light transmission through structureless multispans greenhouse roofs of "Gothic Arc" cross section. J. Agr. Eng. Res. 41:319-325
- Dimitrijevic, M.; Martinov, M.; Grafiadellis, M. 1999. Daily and monthly variations in the light transmission of four greenhouse types. Acta Horticulturae. 486 :75-82
- Feuilloley, P., Issanchou, G. 1996. Greenhouse covering materials measurement and modelling of thermal properties using the hot box method, and condensation effects. J. Agr. Engng. Res. 65: 129-142
- Geoola, F.; Kashti, Y.; Peiper, U.M. 2000. Solar radiation transmissivity of greenhouse cladding materials Acta Horticulturae. 534:109-116
- Giacomelli G.A.; Ting; K.C. 1999. Horticultural and engineering considerations for the design of integrated greenhouse plant production systems. Acta Horticulturae. 481: 475-487.
- Guertal, E.A.; Elkins, C.B. 1996. Spatial variability of photosynthetically active radiation in a greenhouse. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 121 (2) : 321 - 325

***Tesis Doctoral. Estudio de condiciones térmicas y lumínicas y determinación de alternativas tecnológicas para el ahorro de energía en invernaderos de la Patagonia Norte - Argentina***

---

- Hand, G.; Clark, M.A.; Thornley and Wilson, J.W. 1992. Measuring the canopy net photosynthesis of glasshouse crops. *Journal of Experimental Botany*. 43 (248): 375-381
- Hand, D. W.; Warren Wilson, J.; Hananh, M.A. 1993. Light interception by a row crop of glasshouse peppers *Journal of Horticultural Science*. 68(5): 695-703
- Heuvelink, E.; Batta, L.G.G.; .Damen, T.H.J. 1995. Transmission of solar radiation by a multispans Venlo-type glasshouse: validation of a model. *Agricultural and Forest Meteorology*. 74: 41-59
- Jaffrin, A.; Urban, L. 1990. Optimisation of light transmission in modern greenhouses. *Acta Horticulturae*. 281: 25-33.
- Kittas, C.; Baille, A. ; Giaglaras, P. 1999. Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouses. *J. Agr. Engng. Res*. 73: 341-351
- Kurata, K. 1990. Role of reflection in light transmissivity of greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology*, 52:319-331
- Montero, J.I.; Antón, A.; Hernández, J.; Castilla, N. 2001. Direct and diffuse light transmission of insect-proof screen and plastic films for cladding greenhouses. *Acta Horticulturae*. 559:203-210
- Nijkens, J.; Deltour, J.; Coutisse, S.; Nisen, A 1985. Radiation transfer through solar and thermal screens of greenhouses. *Agric. And Forest Meteorology*. 35:229-242
- Papadakis; G.; Manolakos D.; Kyritsis, S. 1999. Solar radiation transmissivity of a single-span greenhouse through measurements on scale models. *J. Agr. Engng. Res*. 71: 331-338
- Pearson S.; Wheldon A. E.; Hadley, P. 1995. Radiation transmission and fluorescence of nine greenhouse cladding material. *J. Agr. Engng. Res*. 62: 61-70
- Pieters, J.G. 1994. Condensation and PAR transmittance of greenhouses. *Plasticulture*. 112: 23-31
- Pollet I. V.; Pieters, J.G. 1999. Laboratory measurements of PAR transmittance of wet and dry greenhouse cladding materials. *Agricultural and forest meteorology*. 93: 149-152
- Pollet I. V.; Pieters, J.G. 2002. PAR transmittances of dry and condensate covered glass and plastic greenhouse cladding. *Agricultural and forest meteorology*. 110 : 285-298
- Quesada, F.M.; Hernández, J.; Morales, M.I.; Guillén, A.; Castilla, N. 1998. Pendientes de cubierta en invernaderos asimétricos: respuesta de un cultivo de pepino. *Actas de Horticultura*. 21: 45-50
- SAS Institute, Inc. 1985. *SAS User's guide: Statistics*. 5th Edition. SAS Inst., Inc. Cary, NC.
- Soriano, T.; Montero, J.I.; Sanchez Guerrero, M.C.; Medrano, E.; Anton, A.; Hernández, J.; Morales, M.I.; Castilla, N. 2004. A study of direct solar radiation transmission in asymmetrical multi-span greenhouses using scale models and simulation models. *Biosystems Engineering* 88 (2): 243-253

*Capítulo 4. Evaluación de la transmisión de luz en distintos modelos de invernaderos.*

---

- Stoffers, J.A. 1998. Light transmission of zig-zag-shaped multispans greenhouses. *Acta Horticulturae*. 456: 383-390.
- Zabeltitz, C.V. 1998. Greenhouse structures. En: *Greenhouses ecosystems*. 265-286. Stanhill, G. Enoch, H.Z. Ed. Elsevier. Amsterdam.
- Zhang Y.; Gauthier L.; de Halleux D.; Dansereau B.; Gosselin, A. 1996. Effect of covering materials on energy consumption and greenhouse microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*. 82: 227-244

---

---

**Capítulo 5: Análisis de las pérdidas calor, aportes de calor del suelo y necesidades de calefacción en un invernadero triple capilla**

---

---



*"...Lasciate ogne speranza, voi ch'entrate.  
Dante (La Divina Comedia)"*

### *5.1. Introducción*

El desarrollo, el crecimiento y la productividad de los cultivos se encuentran directamente relacionados con los factores ambientales, entre los cuales la temperatura actúa fundamentalmente en la velocidad de los procesos fisiológicos. Cuando la temperatura ambiental se encuentra fuera de los rangos óptimos para estos procesos la actividad enzimática se ve comprometida afectando dichos procesos. Cada especie, inclusive cada cultivar, presentan requerimientos específicos para crecimiento y desarrollo normal. Los procesos alcanzan su velocidad óptima dentro de determinados rangos denominado rango de temperatura óptima.

En regiones de clima templado, en Argentina desde el litoral hasta la Patagonia, es necesario usar sistemas de calefacción en los invernaderos lo cual permite un control eficaz de la temperatura de los invernaderos. A nivel mundial existe numerosa información sobre el uso de calefacción en invernadero, sobre todo a partir de la llamada *Crisis del petróleo*, en los años 70 que llevó a plantear estrategias para el ahorro de combustible (Garzoli y Blackwell, 1981; Nijskens y col., 1984; Kempkes y van de Braak, 2000). Los estudios enfocaron la problemática de la reducción del consumo de energía mediante distintas alternativas: otras fuentes energéticas, mejorar la eficiencia de conversión de la energía en los equipos calefactores, mejorar la eficiencia de la distribución dentro del invernadero, nuevos materiales de cubierta (Zhang y col. 1996; Papadakis y col., 2000) e implementación de estrategias de calefacción para reducir las pérdidas de calor en el invernadero.

En la región patagónica es imprescindible el aporte calórico nocturno entre los meses de otoño, invierno y primavera ya que las temperaturas nocturnas medias son inferiores a las temperaturas óptimas y además, las temperaturas mínimas nocturnas pueden producir la muerte celular. Se carece de información sobre las distintas componentes de las energéticas que ocurren en los invernaderos de la región, principalmente las pérdidas nocturnas. La determinación de las pérdidas de calor por radiación, convección y conducción son la herramienta fundamental para establecer mejoras en las estructuras.

### *5.2. Objetivo*

El objetivo de este capítulo fue evaluar las pérdidas energéticas totales y el aporte de calor del suelo en un invernadero triple capilla, estructura típica del norte de la Patagonia.

### *5.3 Antecedentes*

#### *5.3.1. Fundamentos teóricos*

La transmisión de calor del invernadero se debe a la diferencia térmica entre el exterior y el interior del mismo. Los procesos de transferencia de energía a través de la cubierta son básicamente las siguientes: convección, conducción, radiación y calor latente (Garzoli y Blackwell, 1981; Montero y col., 1998).

En el invernadero tienen lugar distintas formas de transmisión de calor, y el intercambio térmico por conducción, convección y radiación, determina el clima del invernadero. La conducción ocurre a través de la cubierta y el suelo del invernadero. La convección es generada por la diferencia de temperatura entre el aire y el suelo, cubiertas, plantas y calefactores dentro del invernadero y entre el aire externo y la cubierta. La ventilación, la cual deliberadamente transfiere calor y aire entre el interior y el exterior del invernadero es también relevante. También ocurren fugas o pérdidas de calor. El intercambio por radiación ocurre entre todos los elementos dentro y fuera del invernadero.

Finalmente, y debido a la transpiración de las plantas, se absorbe calor latente para producir vapor de agua, y es liberado cuando el vapor de agua se condensa en los elementos constitutivos del invernadero. La convección es el mecanismo más dificultoso de cuantificar con exactitud y los intercambios de calor debidos a la convección están invariablemente basados en interrelaciones empíricas (Critten y Bailey, 2002).

#### *Conducción.*

Es la transmisión de calor que ocurre desde una zona de un cuerpo a mayor temperatura a otra zona de menor temperatura, o también entre dos cuerpos de distinta temperatura en contacto, desde el de mayor al de menor temperatura.

Según la ley de Fourier la cantidad de calor conducida se relaciona directamente al aumento de la diferencia de temperatura y la conductividad térmica e inversamente al espesor del material.

$$Q_{\text{cond}} = K/d \cdot (T_1 - T_2) \quad (5.1)$$

Expresión en la cual:

K= conductividad térmica  
d= espesor  
T= temperatura del cuerpo

*Convección*

La convección térmica es el proceso por el cual se transmite calor desde una superficie a un fluido en movimiento. Se denomina convección forzada cuando el movimiento del fluido se debe a una fuerza exterior (una bomba de agua, un ventilador, etc.) y convección libre cuando el fluido se mueve porque la transmisión de calor a través de mismo provoca diferencias de temperatura dentro del fluido y por lo tanto diferencias de densidad.

En los dos casos, la cantidad de calor transmitida por convección ( $Q_c$ ), por unidad de tiempo, desde la superficie al fluido se expresa por la ley de enfriamiento de Newton.

$$Q_c = A \cdot h \cdot (T_w - T_f) \quad (5.2)$$

Donde:  $A$  = área de la superficie ( $m^2$ )  
 $h$  = coeficiente convectivo de transmisión de calor ( $W/m^2K$ )  
 $T_w - T_f$  = diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido ( $^{\circ}K$ )

La cantidad de calor transmitida por convección desde la cubierta al aire exterior, por unidad de tiempo se define:

$$Q_{c,e} = h_{c,e} (T_{ce} - T_e) \quad (5.3)$$

$h_{c,e} = 6.2v^{0.8}$  siendo  $v$ : velocidad del viento ( $W/m^2K^{-1}$ ) (Bailey, 1984):  
 $T_e$ : temperatura del aire exterior ( $^{\circ}K$ )  
 $T_{ce}$ : temperatura cara externa de la cubierta ( $^{\circ}K$ )

La cubierta también intercambia calor por convección con el aire del invernadero:

$$Q_{c,i} = h_i (T_{ai} - T_{ci}) \quad (5.4)$$

Siendo  $h_i$ : coeficiente convectivo aire del invernadero-cubierta.  
 $T_{ai}$ : temperatura del aire del invernadero ( $^{\circ}K$ )  
 $T_{ci}$ : temperatura cara interna de la cubierta ( $^{\circ}K$ )

Según Chalabi y Bailey (1989) si la temperatura del aire es superior a la de la cubierta, la transmisión de calor es turbulenta entonces:

$$h_i = 1.7 (T_{ai} - T_{ci})^{0.33} \quad W \cdot m^{-2} K^{-1} \quad (5.5a)$$

Si el techo está a mayor temperatura que el aire el flujo suele ser laminar, por lo tanto:

$$h_i = 0.64 (T_{ci} - T_{ai})^{0.25} \quad W \cdot m^{-2} K^{-1} \quad (5.5b)$$

### *Radiación*

La radiación térmica es radiación electromagnética emitida por un cuerpo en relación a su temperatura. Según la ley de Stefan-Boltzman, la cantidad de energía radiante:

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad \text{W.m}^{-2} \quad (5.6)$$

E: cantidad de energía emitida

$\varepsilon$ : emitancia del cuerpo adimensional

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzman ( $5.67 \cdot 10^{-8}$ . W.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>)

para el caso del invernadero se considera:

$$Q_{rad} = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (5.7)$$

T<sub>2</sub> es la temperatura del cielo el cual es considerado un cuerpo negro para calcular las pérdidas nocturnas del invernadero. Si no se dispone de estas medidas se puede recurrir al cálculo:

$$T_{cielo} = 0.0552 T_a^{1.5} \text{ siendo } T_a \text{ la temperatura del aire } ^\circ\text{K}$$

Otros autores (Brunt, 1932) tienen en cuenta el contenido de vapor de agua del aire para calcular la emitancia del cielo.

$$\varepsilon_{ci} = 0.564 + 0.059 e^{1/2} \quad (5.8)$$

siendo  $\varepsilon_{ci}$  la emitancia del cielo y  $e$  la presión de vapor de agua en mb.

En este caso, la expresión 5.7 quedaría como:

$$Q = A_1 \sigma (\varepsilon_{ci} T_e^4 - \varepsilon_1 T_{ce}^4) \quad (5.9)$$

### *Calor latente*

En el invernadero se produce el cambio de calor sensible a latente cuando existe evaporación o condensación de agua. Dicha transmisión de calor desde o hacia una superficie se expresa:

$$Q_{lt} = \Delta H * \frac{h}{C_p} * A(W_s - W_w) \quad \text{W} \quad (5.10)$$

$\Delta H$ : calor latente de vaporización (Jul.Kg<sup>-1</sup>)

$h$ : Coeficiente convectivo de transmisión de calor- W.m<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>

$C_p$ : Calor específico del aire seco (Jul.Kg<sup>-1</sup>)

$W_s$ : Humedad absoluta en la superficie (KgKg<sup>-1</sup>)

$W_w$ : Humedad absoluta en el aire del invernadero (KgKg<sup>-1</sup>)

*5.3.2. Modelos del clima del invernadero.*

La mayoría de los modelos que explican el clima del invernadero se basan en el principio de la conservación de la energía y de la masa. En situación de equilibrio térmico, para cada elemento del invernadero (por ejemplo, la cubierta, el aire, el cultivo o el suelo) debe cumplirse que la suma de las ganancias y pérdidas de calor de ese elemento debe ser cero. De la misma forma, el principio de la conservación de la masa puede servir para calcular el grado de humedad del aire, pues en situación de equilibrio el vapor de agua recibido por el aire del invernadero (evapotranspiración y entrada de humedad del aire externo) debe equilibrarse con el vapor de agua evacuado (salida por ventilación y por condensación en superficies frías)

Existen diversos modelos que describen, con distintos grados de complejidad, los procesos físicos del clima del invernadero (Bot, 1983, Bailey, 1984) los cuales han servido como base para trabajos posteriores. Gembloux ( en Pieters and Deltour, 1997) presentó un modelo dinámico que luego fue adaptado por Wang y col. (1997) para predecir exitosamente el intercambio de calor y masa entre el exterior y el interior de un túnel plástico. El modelo desarrollado por Vollebregt y van de Braak (1995) fue también un avance sobre el modelo básico. Estos autores enfrentaron el problema de las pérdidas de calor a través de una pared lateral de un invernadero tipo Venlo con cañerías de calefacción dispuestas sobre una estructura vertical cerca de la misma. Por otro lado también se diseñaron modelos para representar el clima del invernadero mediterráneo (Navas y col. 1998, Pita y col. 1998).

Numerosos trabajos se han realizado para estimar aspectos particulares de los sub-elementos dentro del invernadero con respecto al balance de calor en el invernadero. Yang (1995) consideró en detalle el movimiento de aire cercano a plantas de crisantemo y formuló tres términos de resistencia: resistencia estomática, relacionada al control de procesos fisiológicos, resistencia de la capa límite, controlando los procesos de intercambios cercanos a las hojas, y resistencia aerodinámica la cual controla el movimiento vertical del aire. Por su lado, Al-Massoum y col. (1998) evaluaron la eficiencia de los paneles de enfriamiento utilizados en invernaderos emplazados en condiciones climáticas del desierto de los Emiratos Árabes Unidos. El modelo permite medir las variaciones de temperatura del aire antes y después de pasar el panel y consecuentemente calcular la eficiencia de enfriado para distintas tasas de flujo de aire y agua.

Wei y col. (1998) elaboraron y probaron un sensor para detectar la condensación en las plantas de tomate dentro el invernadero. Benavente y col. (1998) compararon el consumo de energía pronosticado a través de un modelo con los resultados observados en un sistema de calefacción de un sustrato térmico obteniendo resultados satisfactorios, por otro lado, García y col. (1998) generaron un modelo dependiente del tiempo y evaluaron la eficiencia de un piso de concreto calefaccionado en el invernadero. El modelo

mostró que el ahorro depende de la altura de colocación de los controladores de temperatura.

Kittas (1994) consideró las pérdidas nocturnas de calor a través de las paredes laterales calculando radiación y convección por separado. Kempkes y col. (1998) consideraron tanto a través de un modelo como experimentalmente, la distribución vertical de la temperatura en un cultivo en invernadero. La calefacción fue suministrada a través de tubos colocados a diferentes alturas en el cultivo logrando buenos resultados comparativos. Kempkes y van de Braak (2000) revalidan el modelo que permite predecir la distribución de temperatura en el cultivo de tomate en función de la posición y la temperatura de los tubos de calefacción y la distribución vertical de la evaporación del cultivo.

Numerosos trabajos han tenido como objetivo establecer modelos para calcular las pérdidas de calor en el invernadero durante la noche. Teitel y Segal (1995) describieron un modelo de las pérdidas de calor nocturnas en estructuras de mallas de sombreado colocadas en forma de capilla o túnel. Los autores observaron que el enfriamiento radiativo debajo de las mallas es afectado por las propiedades radiométricas de las mismas, siendo deseable que las pantallas tengan baja emitancia, baja transmitancia y por lo tanto alta reflectancia. Por otra parte verificaron que la radiación neta debajo de las pantallas aluminizadas fue menor que bajo el polietileno negro. Van de Braak y col. (1998) modelaron la transferencia de calor y de masa a través de pantallas térmicas como parte de un modelo general. El modelo fue usado para estudiar estrategias combinadas de pantallas térmicas y ventilación conjuntamente con diferentes puntos de humedad relacionados con el nivel de aire del invernadero, el consumo de energía y número de acciones de control.

Dentro de las condiciones climáticas a considerar en la Patagonia es fundamental la ocurrencia de temperaturas inferiores a 0°C. No solamente hay que dotar al invernadero de temperaturas óptimas para el cultivo sino también impedir la muerte de tejidos por heladas.

### ***5.3.3. Balance de Energía***

#### *5.3.3.1 Balance de energía de la cubierta*

Las pérdidas de calor se producen por convección, conducción y radiación térmica (Figura 5.1). En el caso de que se produzca condensación también habrá de considerarse la transmisión de calor que supone el cambio de estado de vapor de agua a agua líquida. Para calcular las pérdidas de calor es preciso conocer las temperaturas de la cara interna y externa del material de cubierta del invernadero. Dichas temperaturas pueden determinarse resolviendo las ecuaciones del balance de energía de cada cara: una vez

**Capítulo 5: Análisis de las pérdidas calor, aportes de calor del suelo y necesidades de calefacción en un invernadero triple capilla**

fijada la temperatura a mantener en el invernadero y conocida la temperatura del aire exterior, en régimen permanente, habrá una temperatura de la cara interna y otra de la cara externa que cumplan la condición de que la ganancia de energía de cada cara iguala a la pérdida de energía de dicha cara.

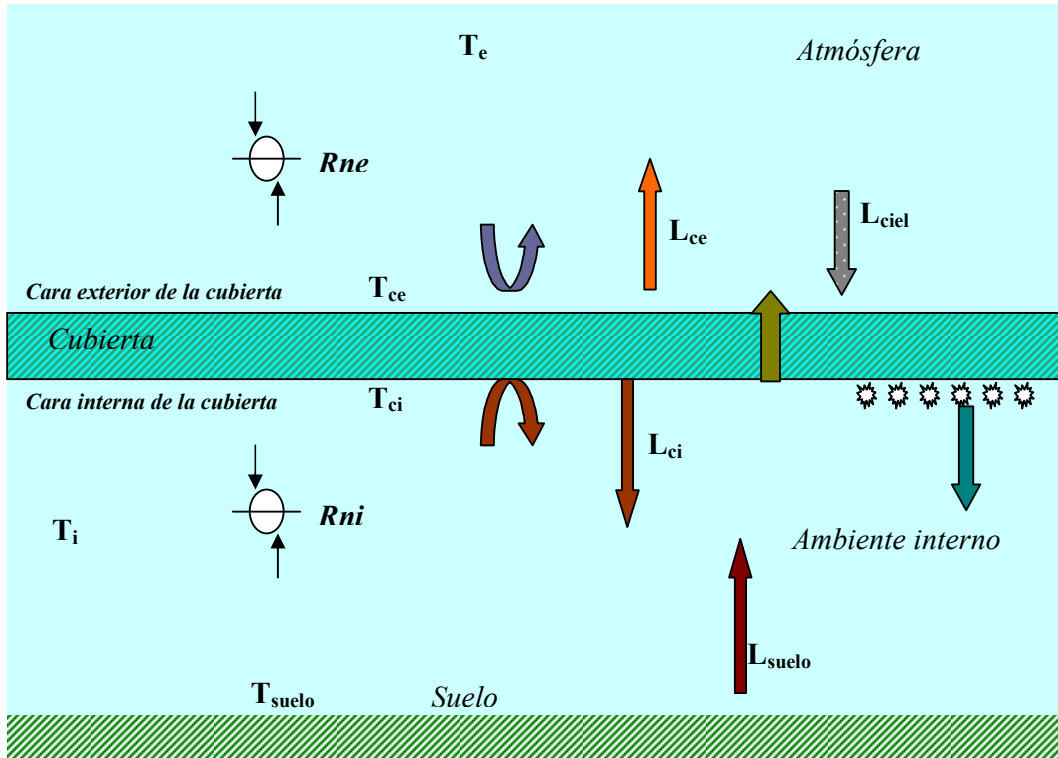


Figura 5.1. Esquema de las pérdidas de calor a través de la cubierta del invernadero.

Estas condiciones pueden expresarse de la siguiente manera:

**5.3.3.1.1. Balance de energía de la cara externa**

$$Q_{\text{ext}} = \left( \begin{array}{c} \text{Convección} \\ \text{cubierta - exterior} \\ \text{invernadero} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Radiación} \\ \text{cubierta -} \\ \text{atmósfera exterior} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Radiación} \\ \text{cielo - cubierta} \\ \text{exterior} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{c} \text{Conducción} \\ \text{cubierta interior -} \\ \text{a cubierta exterior} \end{array} \right) = 0$$

$$Q_{\text{ext}} = h_f(T_e - T_{ce}) \cdot L_{ce} + L_{\text{cielo}} + Q_{\text{cond}} = 0 \quad (5.11)$$

$h_f = 6.2V^{0.8}$  siendo V: velocidad del viento ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ ) (Bailey, 1984):

- $T_e$ : temperatura del aire exterior ( $^{\circ}\text{K}$ )
- $T_{ce}$ : temperatura cara externa de la cubierta ( $^{\circ}\text{K}$ )

Donde  $L_{\text{cielo}}$  es la radiación de la bóveda celeste que recibe la cubierta y  $L_{\text{ce}}$  la radiación emitida por la cubierta externa siendo las mismas:

$$L_{\text{ce}} = E_{\text{ce}} * \sigma * T_{\text{ce}}^4 * \eta_{\text{co}} \quad (5.12)$$

$E_{\text{ce}}$ : emisividad de la cubierta (cara exterior)

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann ( $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ )

$\eta_{\text{co}}$ : factor de forma (view factor) de la cubierta (Kindelan, 1980) en el cual:

$$\eta_{\text{co}} = \frac{1}{A_c} \sum \frac{1 + \cos \Psi_j}{2} A_{cj} \quad (5.13)$$

siendo  $A_c$ : superficie de la cobertura ( $\text{m}^2$ )

$\Psi_j$ : ángulo de las diferentes caras del techo

$$L_{\text{cielo}} = \sigma \alpha_e T_c^4 \quad (5.14)$$

$\alpha_e$  = coeficiente de absorción de radiación térmica de la cara exterior de la cubierta, 0.7 en consonancia con las evaluaciones del capítulo 3.

$T_c$ : temperatura equivalente del cielo supuesto cuerpo negro (K)

$T_c = 0.0552 T_e^{1.5}$  para cielos despejados

$T_c = T_e$  para cielos cubiertos. (Nijskens y col., 1984)

O bien, si se tiene en cuenta el contenido de vapor de agua del aire, y como se ha discutido antes en las expresiones 5.8 y 5.9

$$L_{\text{cielo}} = \sigma \alpha_e T_e^4 E_{\text{ci i}} \quad (5.15)$$

$Q_{\text{cond}}$  = *conducción a través de la cubierta*

$$Q_{\text{cond}} = \frac{K}{d} (T_{\text{ce}} - T_{\text{ci}}) \quad \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (5.16)$$

K: conductividad del material ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

valores de K para distintos materiales:

vidrio: 0.76

Polietileno: 0.45

Polipropileno: 0.22

d: espesor del material (m)

$T_{\text{ci}}$ : Temperatura cubierta interior (K)

### ***5.3.3.1.2. Balance de energía de la cara interna***

$Q_{\text{int}}$ : (Convección aire interior - cubierta interior) - (Radiación cubierta interior - ambiente interior) + (Radiación invernadero - cubierta interior) + (condensación cubierta interior) - (condensación cubierta interior - aire cubierta exterior) = 0



$$Q_{\text{int}} = h_s(T_{\text{ci}} - T_i) \cdot L_{\text{ci}} + L_{\text{suelo}} + \lambda \frac{h_s}{C_p} A(X_s - X_m) - Q_{\text{cond}} = 0 \quad (5.17)$$

$T_i$  = Temperatura del aire del invernadero (K)

Los valores de  $h_s$  se calculan según 5.5a y 5.5b.

$L_{\text{ci}}$  es la radiación de la cara interna de la cubierta y  $L_{\text{suelo}}$  la radiación emitida por el suelo

$$L_{\text{ci}} = E_{\text{ci}} \sigma T_{\text{ci}}^4$$

$E_{\text{ci}}$ : Emisividad de la cubierta (cara interna) *en este caso se considera 0.79*

$T_{\text{ci}}$ : Temperatura de la cubierta interna

$L_{\text{suelo}}$ : Radiación del suelo del invernadero a la cubierta interior

$$L_{\text{suelo}} = E_s \alpha_i \sigma T_{\text{suelo}}^4$$

$\alpha_i$  = coeficiente de absorción de radiación térmica de la cara interior de la cubierta.

$E_s$ : Emisividad del suelo, considerándose en este caso mulch de polietileno negro: 0.85 (Ham y Kluitenberg, 1994)

$T_{\text{suelo}}$ : temperatura del suelo (°K)

El término de la ecuación que considera la condensación en la cara interna del invernadero puede expresarse por la expresión 5.10

### 5.3.3.2. Balance de energía del aire

El balance de energía del aire del invernadero durante la noche, en términos generales, se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{\text{cal}} + Q_s = Q_f + Q_{\text{c,i}} \quad (5.18)$$

Siendo (mejora la presentación de lo que sigue)

$Q_{\text{cal}}$  = calor aportado por el sistema de calefacción ( $W \cdot m^{-2}$  de suelo)

$Q_s$  = intercambio de calor entre el aire y el suelo ( $W \cdot m^{-2}$  de suelo)

$Q_f$  = intercambio de energía por infiltración de aire ( $W \cdot m^{-2}$  de cubierta)

$Q_{\text{c,i}}$  = transferencia de energía por convección entre la cara interna de la cubierta y el aire del invernadero ( $W \cdot m^{-2}$  de cubierta)

Los flujos de energía por infiltración de aire ( $Q_f$ ) está determinados por intercambios de energía sensible ( $Q_{f,s}$ ) y por intercambios de energía latente ( $Q_{f,l}$ ). Lopez (2003) considera :

$$Q_f = Q_{f,s} + Q_{f,l} \quad (5.19)$$

Los flujos  $Q_{f,s} + Q_{f,l}$  se pueden estimar a partir de la tasa de infiltración del invernadero ( $N$ ), de la diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) y la variación de humedad absoluta ( $\Delta q$ ) entre el aire interior y el aire exterior a partir de las siguientes relaciones:

$$Q_{f,s} = \frac{N}{3600} \frac{V}{A_s} \rho C_p \Delta T \quad (5.20)$$

$$Q_{f,l} = \frac{N}{3600} \frac{V}{A_s} \rho \lambda \Delta q \quad (5.21)$$

En las cuales:

$N$ : tasa de infiltración ( volúmenes por hora)

$V$ : volumen del invernadero ( $m^3$ )

$A_s$ : Superficie del suelo del invernadero ( $m^2$ )

$\rho$ : densidad del aire ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$C_p$ : calor específico del aire ( $J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ )

$\lambda$ : calor latente de vaporización ( $J \cdot Kg^{-1}$ )

$\Delta T$ : diferencia de temperatura entre el aire del invernadero y el exterior ( $^\circ C$ )

$\Delta q$ : diferencia de humedad absoluta entre el aire del invernadero y el exterior ( $g_{vapor \text{ de agua}} \cdot Kg^{-1}_{aire}$ ).

El volumen de aire considerado para aplicar el balance de energía es el delimitado por el suelo y las paredes del invernadero (López 2003).

La tasa de infiltración ( $N$ ) depende de la velocidad del viento exterior y del gradiente térmico entre el aire interior del invernadero y el aire exterior. Bailey (1988) determinó tasas entre  $0.5$  y  $1 \text{ h}^{-1}$  para invernaderos de cristal a velocidades de viento menores a  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Para condiciones similares de viento, Lopez (2003), en mediciones realizadas en un invernadero tipo Parral, encontró valores próximos a  $1.5 \text{ h}^{-1}$  debida a la menor estanqueidad de dicho tipo de invernadero determinándose una ecuación que relaciona la tasa de infiltración y la velocidad del viento exterior en la cual

$$N = 0.29V_e + 0.76 \quad (5.22)$$

Por falta de material instrumental no fue posible medir la tasa de infiltración en el invernadero triple capilla de la experiencia. La importancia de la infiltración en las pérdidas de calor se pudo estimar de una manera indirecta, ya que los restantes elementos del balance de energía aparte de la infiltración si pudieron medirse o calcularse.

El calor intercambiado por convección entre la cubierta interna y el aire del invernadero depende del coeficiente de intercambio de energía por

convección y el gradiente térmico, el mismo fue estimado empleando la ecuación ( $Q_{c,i} = h_i (T_{ai} - T_{ci})$ ) a partir de registros de temperatura de aire interno y cubierta interna y un valor  $h_i$  de  $4.8 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$  (Lopez 2003)

### *5.3.3.3. Aporte de energía del suelo*

La transferencia de calor en el suelo ocurre por conducción: el movimiento de energía por vibración molecular en un sólido entre un sólido y un líquido inmóvil. El calor se puede mover hacia arriba de la superficie considerándose flujo positivo, o hacia abajo en cuyo caso se lo considera negativo desde las capas más cálidas a las más frías según la ley de Fourier en la cual:

$$G = -D_H \frac{(T_2 - T_1)}{(Z_2 - Z_1)} \quad (5.23)$$

donde  $D_H$  es la difusividad térmica,  $T$  es la temperatura en un punto y  $z$  la profundidad.

El flujo de calor entre el suelo y el aire, se puede medir con sensores de flujo de calor (Tarara, 2000), a partir de la relación:

$$G = \rho c_p \frac{(T_2 - T_1)}{(t_2 - t_1)} * \Delta z \quad (5.24)$$

$\rho c_p$  = capacidad de calor entre la superficie y la placa del sensor entre dos puntos ( $\Delta z$ ).

Si el valor medido con el sensor de flujo térmico es positivo, la temperatura del aire es mayor a la temperatura de suelo, si es negativo, el suelo aporta calor al aire.

### *5.3.3.4. Necesidad de calefacción*

Para determinar las necesidades de calor de un invernadero deben considerarse las pérdidas que se producen considerando el invernadero como un colector solar, hecho que permite la aplicación de un modelo simplificado del balance de energía (Boulard y Baille, 1987, 1993, Gonzalez y Baille, 1998). En el caso el sol contribuye a la calefacción del invernadero de una manera indirecta, ya que durante el día calienta el suelo, que actúa como acumulador solar y desprende dicho calor durante la noche disminuyendo así las necesidades de calefacción.



$$F = \frac{E}{\eta C_v} \quad (1) \quad (5.26)$$

donde: E: calor total requerido(J)  
 $\eta$ : rendimiento de la calefacción  
 $C_v$ : poder calorífico del combustible (KJ\*l)

*Tabla 5.3. Poder calorífico de diferentes combustibles*

combustible	densidad (Kg*l)	poder calorífico
Gasolina	0.724	30290 KJ*l
Gasoil	0.835	35570 KJ*l
gas natural (pobre)		31640 KJ*m <sup>-3</sup>
(rico)		36950 KJ*m <sup>-3</sup>
Butano	0.575	45850 KJ*Kg <sup>-1</sup>
propano	0.520	46060 KJ*Kg <sup>-1</sup>

#### **5.4. Materiales y métodos.**

##### *5.4.1. Invernadero e instrumental de medición*

Las experiencias se realizaron en un invernadero triple capilla de cubierta de polietileno LDT 150 $\mu$  y techo doble de cubierta externa de polietileno LDT 150 $\mu$  y cubierta interna de polietileno común de 50 $\mu$  , descrito en el Capítulo 2.

Se realizaron distintos registros de factores climáticos:

- *Humedad relativa:* se colocaron sensores en el exterior (HRe) y en el interior (HRi) del invernadero.
- *Temperatura de aire:* Se registraron datos de temperatura interna (Ti) y temperatura externa (Te) a 1.5 metros de altura.
- *Temperatura de suelo:* empleándose termopares de cobre constantán, se registraron datos de temperatura de suelo cubierto con polietileno negro (Tscm) y suelo desnudo (Tssm), a 0.01m de profundidad de suelo.
- *Temperatura de cubiertas:* usando termopares de cobre constantán, se colectaron datos de temperatura de la cubierta externa (Tce) y de la cubierta interna del invernadero (Tci).
- *Flujo de calor del suelo:* sensores de flujo, marca Omega, modelo HFS-4 colocados sobre el suelo cubierto con mulch de polietileno (Qscm) y el suelo desnudo (Qssm), colocados en la temporada primavera-verano de 2003 y otoño 2004. Se ha considerado el aporte de calor desde el suelo al aire, por lo tanto, se consideraron de valor positivo los registros que indicaban dirección del flujo desde el suelo al aire (registros negativos desde el punto de vista de ganancia de calor del suelo).

La ubicación de los sensores ha quedado expuesta en el capítulo 2, Anexo 1. Todos los registros fueron colectados empleándose un data logger Delta-T DL2e para registrar datos cada 10 minutos promediando lecturas de cada minuto. Los datos fueron procesados empleando el programa Excel 1 versión 2003 del paquete Office de Microsoft®.

Durante los meses de agosto a fines de diciembre dentro del invernadero se realizó cultivo de tomate, siendo calefaccionado en el período de agosto a mediados de octubre. Durante los meses de otoño (marzo a junio), el invernadero permaneció vacío y sin calefacción salvo días que se especifiquen particularmente.

#### *Sistema de calefacción*

El calor suplementario del invernadero fue aportado mediante un generador de aire caliente Marca Ciroc Modelo Agri-C 100 con una potencia térmica útil teórica de 87000 Kcal/h (101181 W) con combustión de gas-oil. El generador se ubicó en el extremo oeste del invernadero con la salida del aire caliente hacia el oeste permitiendo un sentido del flujo de calor E-O, a una altura de 2 metros desde el suelo.

#### **5.4.2 . Modelo simplificado de los flujos de calor en el invernadero.**

La resolución conjunta de las ecuaciones que expresan los balances de energía de la cubierta y del aire suministraría las temperaturas de los distintos elementos que componen el invernadero junto con los flujos de calor que existen entre ellos. Sin embargo, esta resolución no es siempre inmediata, y por ello se suele recurrir a la aplicación de una serie de simplificaciones en el análisis térmico.

Para la superficie externa de la cubierta del invernadero, las pérdidas de energía pueden estimarse así:

$$Q_{ce} = \left( \begin{array}{l} \text{Convección} \\ \text{cubierta - exterior} \\ \text{invernadero} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{Radiación} \\ \text{cubierta -} \\ \text{atmósfera exterior} \end{array} \right) + \left( \begin{array}{l} \text{Radiación} \\ \text{cielo - cubierta} \\ \text{exterior} \end{array} \right)$$

Esta expresión es válida para cubiertas perfectamente opacas a la radiación térmica. La mayoría de plásticos no tienen esta propiedad, y por tanto en el cálculo de la pérdidas totales habría que añadir un término adicional, que sería el porcentaje de radiación emitida por el cultivo o suelo que traspasa la cubierta. Este término puede calcularse por:

$$L_{\text{trans}} = E_p \sigma T_p^4 \tau_{\text{tmc}} \quad (5.27)$$

siendo  $\tau_{\text{tmc}}$ : transmisividad de la cubierta a la radiación térmica. Utilizando las expresiones 5.11, 5.12, 5.13, 5.15 y 5.27 se puede escribir:

$$Q_{\text{ce}} = h_f(T_e - T_{\text{ce}}) - E_{\text{ce}} * \sigma * T_{\text{ce}}^4 * \eta_{\text{co}} + \sigma \alpha_e T_e^4 E_{\text{ci}} - E_p \sigma T_p^4 \tau_{\text{tmc}} \quad (5.28)$$

Para el aire del invernadero, para que se cumpla la ley de la conservación de la energía, las pérdidas totales deben equilibrarse con los aportes o ganancias. Por tanto las pérdidas a través de la cubierta deben compensarse con los aportes energéticos recibidos desde el suelo o intercambiados por infiltración con el aire exterior, de manera que usando las expresiones 5.28 para la estimación de las pérdidas a través de la cubierta :

$$Q_c + Q_s = Q_f - h_f(T_e - T_{\text{ce}}) + E_{\text{ce}} * \sigma * T_{\text{ce}}^4 * \eta_{\text{co}} - \sigma \alpha_e T_e^4 E_{\text{ci}} + E_p \sigma T_p^4 \tau_{\text{tmc}} \quad (5.29)$$

Cuando no hay calefacción  $Q_c$  es cero.  $Q_s$  pudo medirse con los sensores de flujo de calor del suelo y  $Q_f$ , las pérdidas por infiltración, se estimaron indirectamente a partir de la ecuación 5.29.

#### *5.4.3. Aportes de calor del suelo en invernadero sin calefacción.*

Se realizaron dos tipos de mediciones: por un lado se registraron datos de flujo de calor en suelo cubierto con polietileno negro de 200 $\mu\text{m}$  ( $Q_{\text{scm}}$ ) del invernadero y suelo desnudo ( $Q_{\text{ssm}}$ ), en un área sin cubrir. Por otro lado, en el otoño de 2004, para evaluar el comportamiento del invernadero completo, se hicieron lecturas en dos períodos de 3 semanas cada uno, uno con suelo cubierto (mulch o acolchado) y otro con suelo descubierto.

Para poder comparar los resultados, se compararon estadísticamente los valores promedio de aportes de calor ( $Q$ ) y salto térmico ( $T_i - T_e$ ) entre  $Q_{\text{scm}}$  y  $Q_{\text{ssm}}$ , para iguales rangos de temperatura externa cada 0.5°C. El rango considerado fue -2°C y 10°C, por considerarse al mismo como el rango de  $T_e$  en el cual se usa la calefacción en los invernaderos del norte de la Patagonia.

$T_i$  y el salto térmico ( $T_i - T_e$ ) en función de  $T_e$  fueron ajustadas a un modelo lineal ( $y = a + bx$ ). Dicho modelo fue estudiado mediante análisis de residuales, utilizando una variable ficticia para contrastar diferencias en los parámetros de los modelos de cada tratamiento (con y sin mulch).

#### 5.4.4. Cálculo del aporte de calor por calefacción y del coeficiente global de pérdida de calor

Se repitieron experiencias de gasto de combustible en diferentes fechas del mes de mayo de 2004, en horas del amanecer cuando la radiación solar fuera inferior a 10 W por metro cuadrado y la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero permitiera el encendido y apagado automático del sistema con facilidad. El termostato se graduó para que el equipo encendiera con temperatura interna inferior a 6°C. El salto térmico, el tiempo transcurrido hasta el apagado, el consumo de combustible y la temperatura interna y la temperatura externa fueron registradas. Por otra parte también se registró el consumo de combustible demandado en cada lapso de tiempo comprendido entre el encendido y el apagado del calefactor.

Conocido el consumo del calefactor en una cierta unidad de tiempo y considerando el poder calórico expuesto en tablas se pudo estimar el rendimiento de calefactor teniendo en cuenta el valor de eficiencia del equipo especificado por el fabricante en la ficha identificatoria del modelo (Agri C-100) es cual es 0.87.

Por otro lado se registró el gasto de combustible para distintas noches durante el mes de septiembre de 2002 y mayo de 2004, calculando a partir de esos datos el calor aportado por el sistema de calefacción. Conocido el valor de calor aportado por el sistema se estimó el coeficiente global de pérdida de calor como:

$$U = \frac{Q}{A_c * (T_i - T_e)} \quad \text{W*m}^{-2} \text{ de cubierta} \quad (5.30)$$

### 5.5. Resultados y discusión

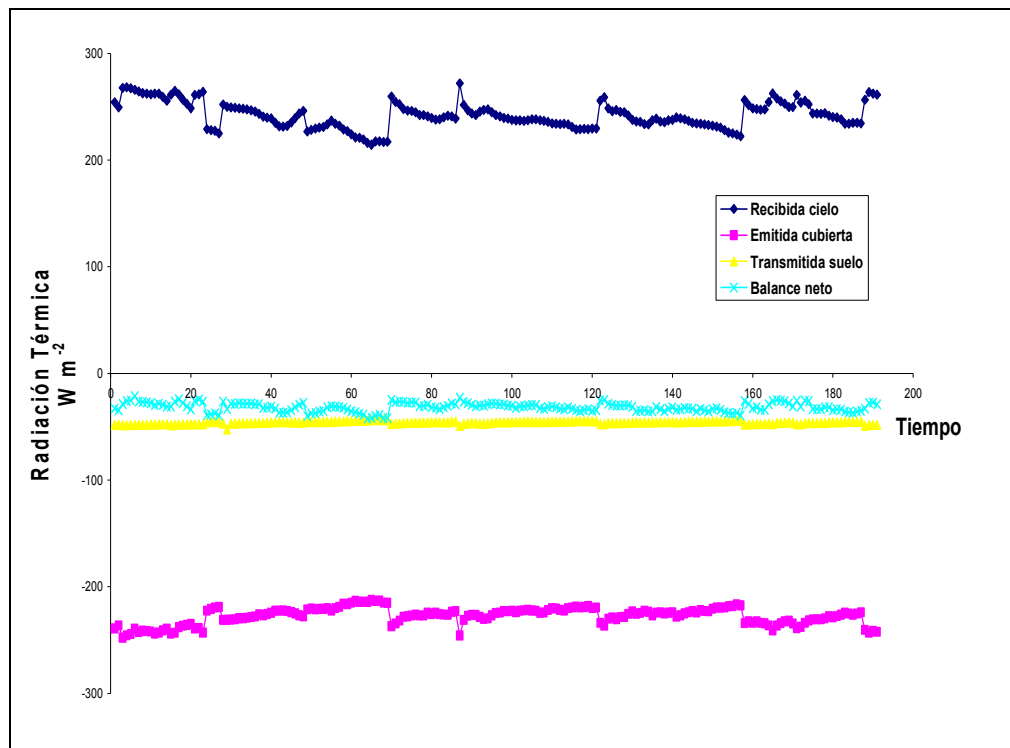
#### 5.5.1. Pérdidas de calor en el invernadero sin calefacción.

Durante el otoño de 2002 se realizó el análisis de los balances de energía nocturnos en el invernadero sin calefacción, en los días comprendidos entre el 13 de abril y el 8 de mayo. Se escogieron aquellos periodos de noche despejada, caracterizados porque la radiación neta sobre el invernadero fue de  $-20 \text{ W*m}^{-2}$  o inferior. Durante las noches de la evaluación, la temperatura externa osciló entre un mínimo de 0.4 °C y un máximo de 11.67 °C. El salto térmico del aire del invernadero en relación con el exterior varió entre 0.4 °C y 5.0 °C, con un valor medio de 2.9 °C por debajo de la temperatura exterior mientras que el techo interno estuvo a 1.6 °C menos



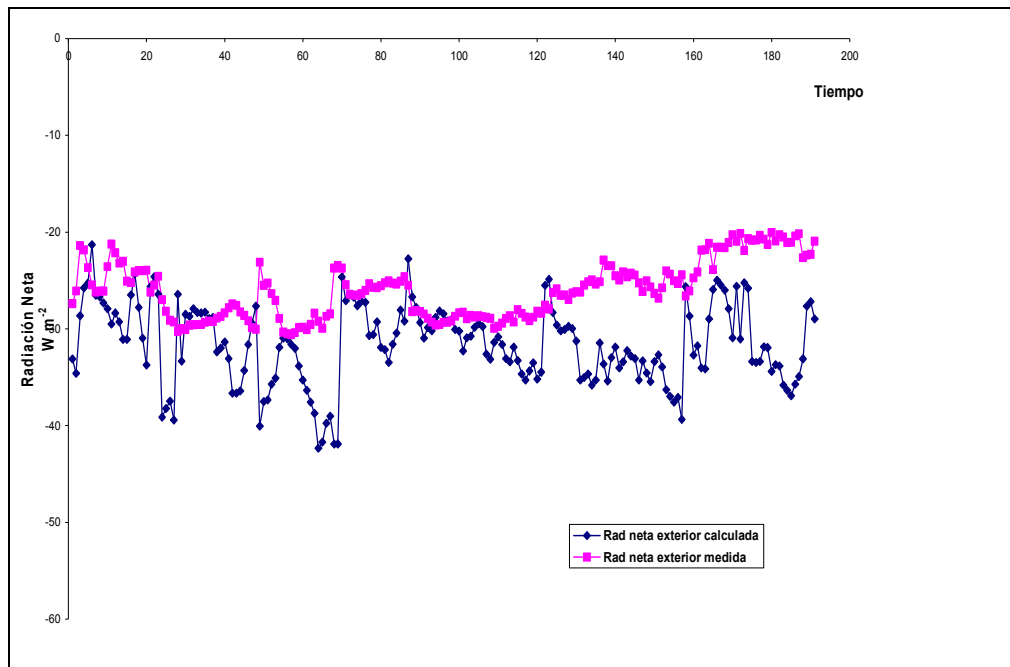
que el aire del invernadero. La velocidad del viento fue siempre inferior a  $1 \text{ m s}^{-1}$  durante las medidas.

La figura 5.2 muestra el cálculo del balance de radiación neta sobre el invernadero. La mayor ganancia de radiación térmica procede del cielo, con valores máximos aproximados de  $270 \text{ W}^*\text{m}^{-2}$  y media de  $242 \text{ W/m}^2$ . Las pérdidas de radiación térmica provienen, por orden de importancia, de la emisión de la cubierta ( $227 \text{ W}^*\text{m}^{-2}$  de promedio) y de la emitida desde el suelo y transmitida a través de la cubierta, que se aproxima a los  $50 \text{ W}^*\text{m}^{-2}$  sin llegar a ellos. En conjunto, las pérdidas por radiación neta superan a las ganancias en valores que oscilan entre  $-21.3$  y  $-42.3 \text{ W}^*\text{m}^{-2}$ .



*Figura 5.2 Balance de radiación neta sobre el invernadero. (Registros cada 10 minutos en noches de otoño de 2002)*

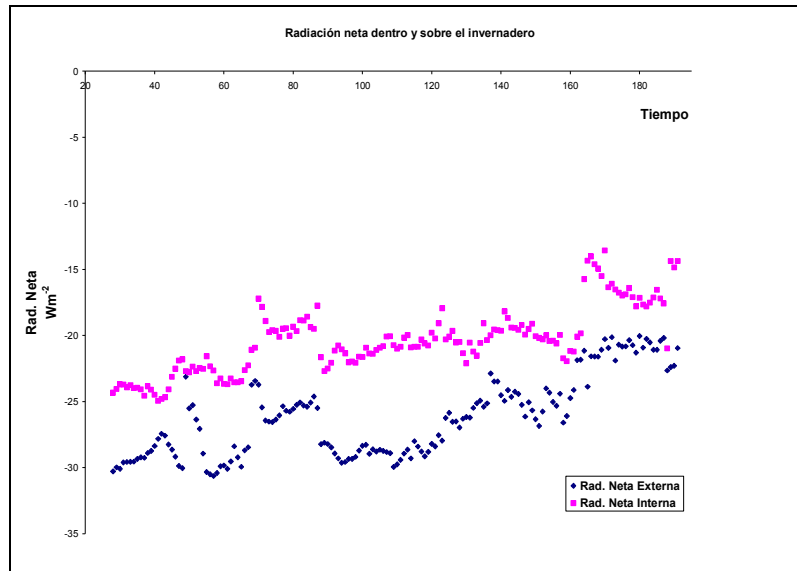
La figura 5.3 compara la radiación neta medida sobre el invernadero con los valores calculados según el modelo. Como promedio, los valores medidos y calculados difieren en  $5.6 \text{ Wm}^{-2}$ . En cualquier caso, para el objetivo de este estudio que no es otro que el de conocer cual es el orden de magnitud de los flujos de calor en el invernadero patagónico, la diferencia entre los valores medidos y calculados de la radiación neta sobre invernadero pueden considerarse aceptables.



*Figura 5.3. Comparación de la radiación neta medida sobre el invernadero y calculada por el modelo simplificado. (Registros cada 10 minutos en noches de otoño de 2002)*

La figura 5.4 muestra que la radiación neta interna está la mayoría de las noches en torno a  $-20 W \cdot m^{-2}$ , valor menor que los registrados en invernaderos sin calefacción en otras latitudes (Montero y cols, 1986). Ello puede deberse al efecto beneficioso de la doble cubierta, que hace que la cara interior del plástico esté a una temperatura superior a la del invernadero de cubierta simple, y por tanto el balance de radiación entre la emitida desde el suelo o cultivo y la emitida por la cara interior de la cubierta es pequeño. La misma figura ilustra que la diferencia entre la radiación neta externa e interna es pequeña, puesto que sólo en contadas noches la diferencia entre ambos valores alcanza la cifra de  $10 W \cdot m^{-2}$ .

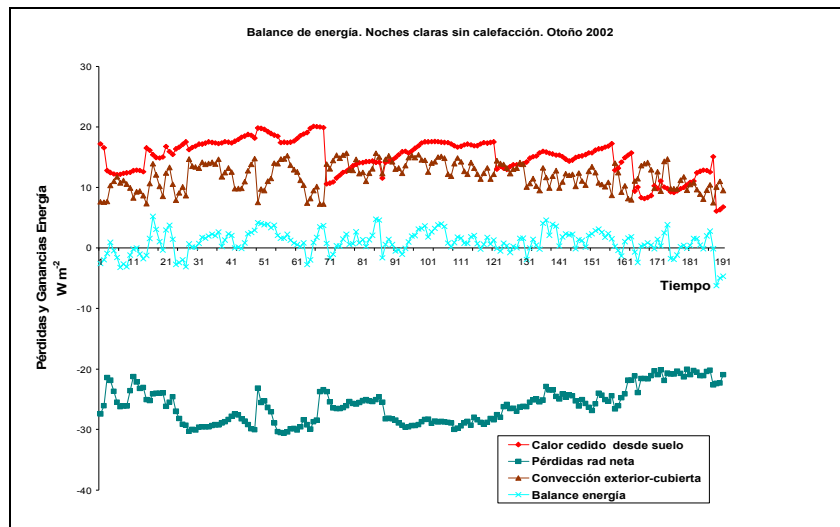
Este valor también es un índice de que el aislamiento térmico del invernadero en el aspecto de la radiación térmica es parcial, pues en invernaderos de una sola capa se dan diferencias menores a las registradas aquí, ya que a menor aislamiento térmico menor diferencia entre la radiación neta externa e interna, lo que se puede corroborar en tabla 6.2, página 157.



*Figura 5.4. Radiación neta sobre y dentro del invernadero. (Registros cada 10 minutos en noches de otoño de 2002)*

En el conjunto del invernadero, las pérdidas de energía por radiación térmica se compensan con dos clases de aportes energéticos (Figura 5.5). Por una parte, el suelo cede calor al invernadero con aportes inferiores siempre a  $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  durante el periodo de medidas (más adelante se discutirá este aspecto en detalle). Además, la cubierta del invernadero recibe calor por convección del aire externo, ya que la temperatura de la cubierta, por efecto de la emisión de radiación térmica, está a menos temperatura que el aire externo, habiéndose registrado temperaturas en la cubierta de hasta  $4.4 \text{ }^\circ\text{C}$  por debajo del aire exterior.

La figura 5.5 también muestra que las pérdidas de energía (radiación térmica) se asemejan a las ganancias (aporte desde el suelo y convección de la cubierta) y por tanto se cumple el balance energético del invernadero sin calefacción. Las pequeñas diferencias encontradas pueden deberse a los errores en las medidas o a las simplificaciones del modelo de cálculo. Cabe decir que los flujos energéticos del invernadero frío son de un orden de magnitud pequeño, y por tanto su estimación precisa por medida o cálculo es difícil.



*Figura 5.5. Balance de energía del invernadero en noches despejadas sin calefacción. (Registros cada 10 minutos en noches de otoño de 2002)*

Las diferencias entre pérdidas y ganancias pueden también deberse al hecho de no haber podido medirse ni estimarse las pérdidas por infiltración de aire. Estas pérdidas pueden ser importantes en invernaderos poco herméticos en el caso de existir gradientes térmicos acusados del interior al exterior, cosa que ocurre cuando se calientan artificialmente los invernaderos, pero para las noches sin calefacción como las que se analizan en este apartado, el salto térmico fue pequeño y cabe inferir que las pérdidas por infiltración lo fueron también.

Algunos autores señalan que las pérdidas por infiltración de aire son significativas. Por ejemplo, en el trabajo de López (2003) la infiltración supuso el 23% de las pérdidas totales en condiciones de viento inferior a  $2 \text{ m s}^{-1}$ , pero estos resultados se obtuvieron en invernaderos poco herméticos y de una sola capa de cubierta, como es el tipo de invernadero parral almeriense. Cabe pensar que la infiltración no es tan importante en el invernadero patagónico como en el parral. Sin embargo sería muy útil incidir más en las medidas de infiltración durante las noches en las que exista un salto térmico elevado generado por el sistema de calefacción.

En resumen, en el invernadero pasivo (sin calefacción) la fuente de calor nocturno es fundamentalmente el suelo, que es el almacén térmico que se recarga durante el día por efecto de la radiación solar, mientras que el sumidero de energía es la cubierta externa que se refrigera en noches claras por efecto de la radiación térmica y es así el elemento de menor temperatura del invernadero.

Las mejoras en el clima nocturno del invernadero pasivo vendrán previsiblemente a través del aumento de la recarga térmica del suelo (uso de

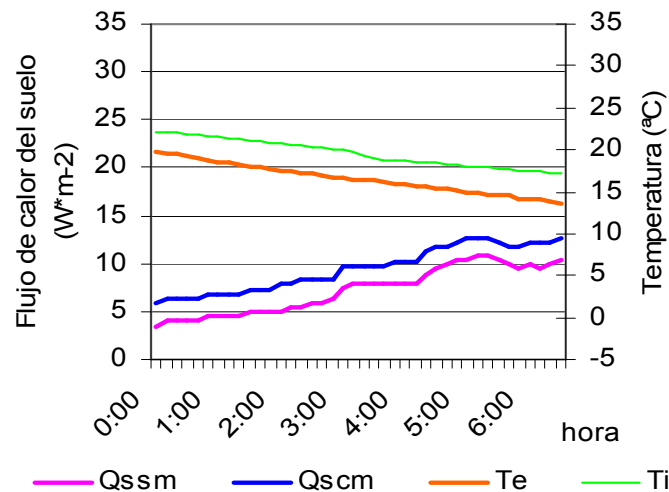
mulch o acolchado) y de la reducción de la emisión de radiación (cortinas internas o externas, plásticos de bajo poder de emisión, etc).

### **5.5.2. Aporte de calor del suelo durante la noche en invernadero sin calefacción.**

La magnitud del calor aportado desde el suelo al aire durante la noche, depende del salto térmico entre el exterior y el interior del invernadero y de la capacidad de almacenar calor del suelo durante horas del día. Durante la temporada de cultivo de primavera-verano 2003, y los meses de otoño de 2004 (sin cultivo), se registraron diferentes situaciones que serán expuestas y discutidas a continuación. En todos los casos se observa que la colocación de una cubierta de polietileno negro sobre el suelo presenta mayores valores de cesión de calor nocturno.

#### *Primavera 2003*

Durante la noche del 29 al 30 de octubre de 2003 (Figura 5.6), se registraron temperaturas externas superiores a 10°C, el salto térmico promedio fue de 4°C observándose que el Scm aportó más calor que el Ssm, aproximadamente  $2 \text{ W}^*\text{m}^{-2}$ . Durante el día se registró una acumulación de calor mayor del suelo cubierto frente al suelo desnudo, siendo los registros  $0.80 \text{ MJ}^*\text{m}^{-2}$  y  $0.74 \text{ MJ}^*\text{m}^{-2}$ , respectivamente.



*Figura 5.6.: Evolución, promedio cada 10 minutos, del flujo de calor del suelo con cubierta ( $Q_{cm}$ ) y sin cubierta ( $Q_{ssm}$ ), observado durante noches despejadas de fines de invierno y comienzos de primavera. noche del 29-30 de octubre de 2003. -  $T_e$ : temperatura externa.  $T_i$ : temperatura interna.*

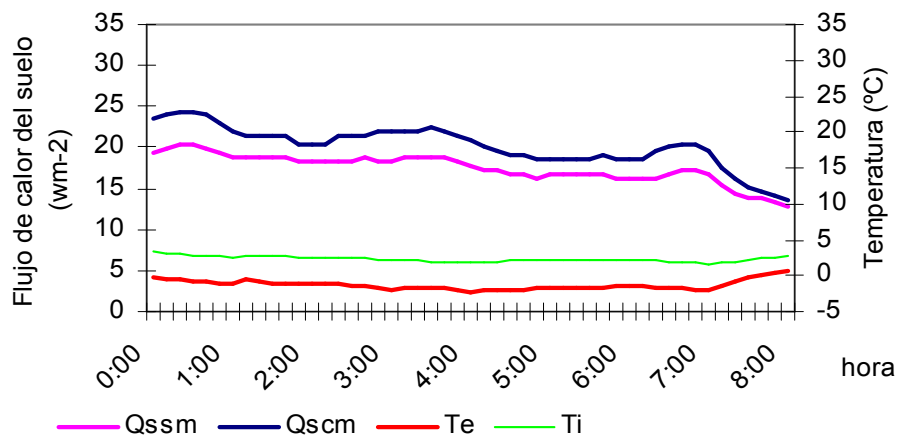
A medida que avanza la primavera y el salto térmico entre el interior del invernadero y el exterior es menor, la transferencia de calor del suelo al aire disminuye, como se puede observar en la tabla 5.4 .

*Tabla 5.4.: Aportes nocturnos de calor del suelo al aire del invernadero*

Mes	Aporte de calor $Q_{scm}$ ( $W \cdot m^{-2}$ )	Aporte de calor $Q_{ssm}$ ( $W \cdot m^{-2}$ )	$T_i - T_e$ ( $^{\circ}C$ )
Septiembre 2003	23.60	14.82	3.61
Octubre 2003	21.14	11.93	2.31
Noviembre 2003	14.11	7.77	0.53
Diciembre 2003	13.57	7.14	0.52

*Otoño 2004*

Durante el otoño no se aplicó calefacción y no se realizó ningún cultivo. Durante la noche del 24 al 25 de mayo de 2004, las temperaturas externas fueron inferiores a  $0^{\circ}C$  registrándose un salto térmico entre el exterior y el interior del invernadero de  $4^{\circ}C$  (figura 5.7). El comportamiento del suelo cubierto con mulch no difiere a lo observado durante los días de primavera del año 2003, también los aportes de calor del suelo cubierto fueron superiores a los del suelo desnudo en aproximadamente  $4 W \cdot m^{-2}$ . Durante las horas del día del 24 de mayo el suelo sin cubierta de polietileno acumuló  $0.56 MJ \cdot m^{-2}$  mientras que el suelo con cobertura pudo acumular más calor ( $1.15 MJ \cdot m^{-2}$ ).



*Figura 5.7: Evolución, promedio cada 10 minutos, del flujo de calor del suelo con cubierta ( $Q_{scm}$ ) y sin cubierta ( $Q_{ssm}$ ), calculado para noches despejadas de otoño avanzado. Noche del 24-25 mayo de 2004*

Coincidiendo con trabajos realizados en zonas de inviernos fríos de Europa (Baille, 1999 citado en Lopez 2003), los flujos de energía del suelo han sido negativos durante el día, esto es, ocurre una transferencia de energía desde el aire del invernadero al suelo, y positivo durante la noche cuando el suelo libera calor al aire. Los valores de calor almacenado durante el día que se han mencionado en párrafos anteriores no se contradicen por lo observado por Jolliet (1988), durante el desarrollo del cultivo de tomate.

**Capítulo 5: Análisis de las pérdidas calor, aportes de calor del suelo y necesidades de calefacción en un invernadero triple capilla**

Por otro lado, al realizar la experiencia de medir la cesión de calor comparando situaciones del invernadero con el suelo completamente cubierto frente al suelo completamente desnudo, teniendo en cuenta distintos rangos de temperatura cada  $0.05^{\circ}\text{C}$  entre  $-2^{\circ}\text{C}$  y  $10^{\circ}\text{C}$ , la diferencia de aporte de calor se mantiene alrededor de  $12\text{-}14\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  con una tendencia a disminuir el aporte de calor del suelo a medida que aumenta la temperatura externa (Figura 5.8), estos valores son notoriamente mayores a los observados dejando solo áreas de suelo sin cubrir pero representan situaciones más reales del intercambio de calor entre el suelo y el aire del invernadero.

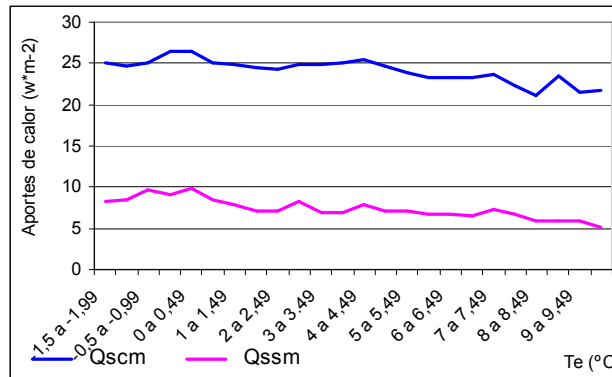


Figura 5.8 :Aportes de calor de suelo cubierto con mulch ( $Q_{scm}$ ) y suelo desnudo ( $Q_{sm}$ ) para distintos rangos de temperatura externa ( $T_e$ ) durante los meses de mayo y junio de 2004

Las figuras 5.9 a y b muestran una relación directamente proporcional entre la cesión de calor por el suelo y la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior con una diferencia de  $14.4\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  a favor del suelo cubierto con mulch. Esto corrobora lo expuesto en el párrafo anterior, a medida que aumenta la temperatura exterior el salto térmico disminuye y el suelo cede menos calor.

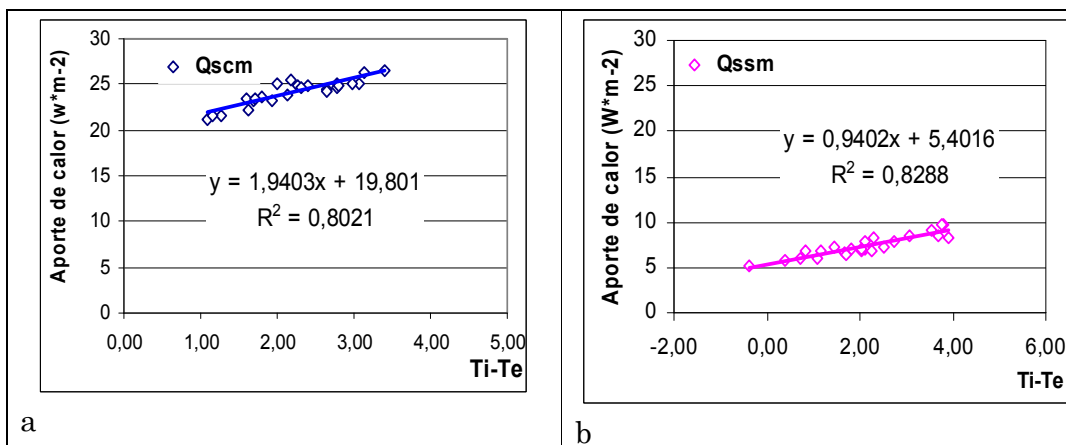


Figura 5.9: Aportes de calor en función del salto térmico en a) suelo cubierto y b) suelo descubierto. Mayo junio 2004.

Esta diferencia de aporte de calor se traduce en un incremento de la temperatura dentro del invernadero. La idoneidad del modelo lineal propuesto fue verificada, encontrando que las funciones obtenidas para cada tratamiento no difieren estadísticamente en sus pendientes ( $p=0,7239$ ) pero sí en sus ordenadas al origen ( $p<0,0001$ )

*El modelo final que expresa la temperatura interna en función de la temperatura externa para suelo cubierto y descubierto, es:*

$$T_i = 2.01 + 0.88 T_e + 0.87 \text{ Mulch} \quad (5.31)$$

siendo:

$T_i$  = temperatura Interna

$T_e$  = temperatura externa

Mulch = variable clasificatoria ficticia (. Vale 0 si no se aplicó mulch y 1 en caso contrario.

*De este modelo general se deducen las dos ecuaciones según se haya aplicado o no mulch:*

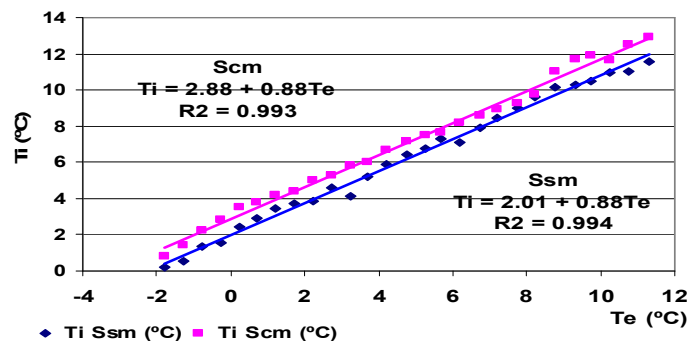
*Sin mulch:*

$$T_i = 2.01 + 0.88 T_e \quad (5.32)$$

*Con mulch:*

$$T_i = 2.01 + 0.88T_e + 0.87 = 2.88 + 0.88 T_e \quad (5.33)$$

*La correlación entre los registros de temperatura interna y temperatura externa se muestra en la figura 5.10, verificándose el comportamiento expresado por las ecuaciones 5.32 y 5.33.*



*Figura 5.10. Relación entre  $T_i$  y  $T_e$  (referencias de puntos) para suelo desnudo (Ssm) y suelo con mulch (Scm). Estimación de  $T_i$  en función de  $T_e$  (líneas de regresión lineal  $y=a+bx$ ).*

Los registros de Rne expuestos en la tabla 5.5 indican que para ambos casos, suelo cubierto y suelo desnudo, las pérdidas de calor del invernadero fueron



**Capítulo 5: Análisis de las pérdidas calor, aportes de calor del suelo y necesidades de calefacción en un invernadero triple capilla**

equivalentes, independientemente del tratamiento de suelo. Sin embargo los valores de Rni son diferentes, mayores en el suelo con mulch indicando que el flujo de calor desde el suelo al aire del invernadero fue mayor en el suelo cubierto que en el suelo desnudo, datos que reafirman los datos obtenidos con el empleo de los sensores de flujo de calor del suelo expuesto en párrafos anteriores.

*Tabla 5.5: Aporte de calor, salto térmico y balance térmico del aire y la cubierta para invernadero con suelo cubierto con mulch y suelo desnudo. (valores promedio)*

	Aporte de calor (W*m <sup>-2</sup> )	Ti-Te (°C)	Rni (W.m <sup>-2</sup> )	Rne (W.m <sup>-2</sup> )
Suelo con mulch (Scm)	27.87 a	2.31 a	-17.01 a	-20.80 a
Suelo desnudo (Ssm)	6.74 b	1.46 b	-10.49 b	-18.80 a

*Valores seguidos con igual letra, en el sentido de la columna, no difieren significativamente (LSD 0.05)*

De los gráficos y datos, se puede calcular que el empleo de la cubierta de polietileno permite un aumento de la temperatura interna del invernadero estudiado, triple capilla, de 468 m<sup>2</sup>, de 0.87 °C. La diferencia de calor aportado entre Scm y Ssm, según se puede calcular de la tabla 5.5 son 19.13 W\*m<sup>-2</sup>. Si se tiene en cuenta que 1 litro de gasoil, combustible utilizado por comúnmente en los sistemas de calefacción de la Patagonia, aporta 35570 KJ por litro (tabla 5.3), y considerando que la eficiencia del calefactor utilizado fue de 0.81 (5.4.4 en este capítulo) se puede estimar el ahorro de combustible (en litros de gasoil por hora) debido al empleo de la cubierta de polietileno negro de 200 µm sobre el suelo: el aporte diferencial de calor (19.13 W\*m<sup>-2</sup>) significan, para la superficie de 468 m<sup>2</sup> de invernadero: 8952.84 W lo que equivale a 32230.22 KJ por hora. Considerando el aporte de calor del gasoil y la eficiencia de calefactor esto significa aporte de calor equivalente al gasto de 1.04 litros de gasoil por hora.

A partir de los registros de temperatura durante las temporadas de cultivo entre los años 2001 y 2003, teniendo en cuenta temperatura óptima nocturna 10°C, y considerando el ahorro de 1.13 litros de gasoil por hora, se calculó el ahorro de combustible en el período con aporte de calefacción durante esas tres temporadas (tabla 5.6.). Si se considera que el tipo de cubierta de polietileno utilizada permite se usada durante 5 años con doble temporada de cultivo (otoño y primavera), el ahorro de combustible es mucho mayor al calculado sobre datos de la experiencia.

Por otro lado, esto permite considerar, para la temporada otoñal, la posibilidad de mejorar las condiciones para el cultivo de especies menos exigentes en temperaturas nocturnas que el tomate. Por lo expuesto, el uso de cubiertas plásticas permitiría disminuir los costos devengados de la necesidad de calefaccionar. (Nijskens y col., 1984)

*Tabla 5.6: estimación del ahorro de combustible debido al empleo de cubierta de polietileno negro de 200 $\mu$ m (Considerando  $T_i$  mínima óptima nocturna= 10°C, para 500 m<sup>2</sup>)*

Período	Horas $T_e < 10^\circ\text{C}$	Litros gas-oil
13 set-31 oct 2001	192	199.97
29 ago-31 oct 2002	358	372.86
1 ago-31 oct 2003	640	666.56
	1190	1239.39

### *5.5.3. Cálculo de pérdida de calor en el invernadero con calefacción y coeficiente U*

Las pérdidas de calor fueron estimadas a partir del consumo calórico del invernadero en condiciones de radiación total externa menores a 10 W/m<sup>2</sup>, sin viento. Considerando el aporte de calor del sistema de calefacción y las pérdidas de calor por el suelo, medidas con los sensores de flujo de calor, a partir de la ecuación 5.18 se calculó las pérdidas de calor a través de la cubierta.

La relación de la superficie de cubierta con respecto a la superficie de suelo del invernadero, es de 1,57 valor utilizado (empleando la ecuación 5.25) para realizar el cálculo de las pérdidas de calor por unidad de cubierta resultando el coeficiente U promedio fue 7.79 (Tabla 5.7).

Si bien este valor es mayor al que cabría esperar si se considera lo expuesto por diferentes autores (von Zabeltitz, 1986), hay que considerar que el invernadero considerado es un modelo que responde a las características de los invernaderos locales, con características de construcción que favorecen las pérdidas de calor por infiltración de aire debido principalmente a ineficientes cerramientos en los laterales de las cortinas. También es probable que las experiencias de von Zabeltitz se realizaran en las condiciones de cielos cubiertos característicos del norte de Europa, donde son menores pérdidas nocturnas por radiación que las que ocurren en noches despejadas en la Patagonia.

Por último hay que considerar que el invernadero patagónico evaluado es un invernadero de cubierta mixta, siendo plástico doble en el techo y plástico sencillo en los laterales y frontales. Por tanto el coeficiente global de pérdidas de calor debe ser necesariamente mayor que el invernadero de techo doble en toda su superficie.

**Capítulo 5: Análisis de las pérdidas calor, aportes de calor del suelo y necesidades de calefacción en un invernadero triple capilla**

*Tabla 5.7: Aportes de calor, pérdidas de calor por el suelo, y coeficiente global de pérdida de calor*

noche	Te (°C)	Ti (°C)	Ti-Te (°C)	Calefacción (W/m <sup>2</sup> )	Suelo (W/m <sup>2</sup> )	Cubierta (W/m <sup>2</sup> )	Coef. Global (U)
2002							
1-2 set	5,80	10,60	4,80	58,30	5,61	52,69	6,99
3-4 set	6,10	9,92	3,82	36,47	3,37	33,10	5,52
4-5 set	0,12	6,26	6,14	69,09	5,41	63,68	6,61
5-6 set	-0,23	11,80	12,03	131,28	5,26	126,02	6,67
6-7 set	2,17	12,50	10,33	160,45	3,27	157,19	9,69
7-8 set	3,16	14,59	11,43	143,06	4,69	138,37	7,71
8-9 set	2,80	13,65	10,85	140,66	4,04	136,62	8,02
9-10 set	7,10	14,50	7,40	93,77	3,38	90,39	7,78
10-11 set	4,80	13,77	8,97	109,40	3,89	105,51	7,49
11-12 set	5,23	13,91	8,68	135,31	4,62	130,69	9,59
13-14 set	5,60	10,38	4,78	60,32	3,83	56,50	7,53
14-15 set	-0,77	9,50	10,27	135,14	6,71	128,43	7,97
16-17 set	5,80	10,18	4,38	63,35	6,64	56,71	8,25
18-19 set	7,20	10,00	2,80	46,45	6,86	39,58	9,01
6-7 oct	5,20	10,94	5,74	72,10	0,65	71,45	7,93
7-8 oct	3,73	9,96	6,23	79,17	0,76	78,41	8,02
2004							
26-27 may	-4,20	10,50	14,70	179,94	4,22	175,72	7,62
27-28 may	-2,60	9,23	11,83	149,18	4,16	145,03	7,81
	3,17	11,23	8,07	103,53	4,30	99,23	7,79

A partir de los resultados de este apartado se infiere que uno de los caminos de mejora de los invernaderos de la Patagonia, para el empleo de dobles cubiertas en paredes y frontales significaría una forma alternativa de ahorro energético en el período de los cultivos en los cuales se aporta calor por calefacción.

### **5.5. Conclusiones**

En condiciones de noche despejada, sin aporte de calefacción, la mayor ganancia de radiación térmica proviene del cielo, con valores medios de 242 W\*m<sup>-2</sup> mientras que las pérdidas de radiación térmica se producen principalmente por emisión de la cubierta (227 W/m<sup>2</sup>) y en segundo lugar por la radiación emitida por el suelo y transmitida por la cubierta (cerca de 50 W/m<sup>2</sup>)

Las pérdidas por radiación neta superan a las ganancias en valores que oscilan entre -21.3 y -42.3 W\*m<sup>-2</sup>.

El empleo de doble cubierta de techo tiene un efecto beneficioso permitiendo un balance entre la radiación emitida desde el suelo o cultivo y la radiación emitida por la cara interior de la cubierta interna pequeño, con valores promedios de  $-20 \text{ W/m}^2$ .

El invernadero presenta buen aislamiento térmico respecto a las pérdidas por radiación presentando diferencias entre radiación neta externa e interna en torno a  $10 \text{ W/m}^2$ .

En general, las pérdidas de energía (radiación térmica) se asemejan a las ganancias (aporte de calor del suelo y convección de la cubierta) cumpliéndose por lo tanto el balance energético del invernadero sin calefacción.

En condiciones de invernadero pasivo (sin calefacción), la fuente de calor nocturno es fundamentalmente el suelo mientras que el sumidero de energía es la cubierta externa.

El empleo de cubierta plásticas sobre el suelo permite mayor acumulación de calor durante el día y mayor liberación de calor desde el suelo al invernadero en horas de la noche con respecto al suelo desnudo. En promedio, el calor liberado por el suelo cubierto fue  $19 \text{ W}^*\text{m}^{-2}$  superior al suelo desnudo.

La diferencia de aporte de calor del suelo con cobertura, se traduce en un incremento de la temperatura del orden de  $0.87^\circ\text{C}$  con respecto a la temperatura del suelo desnudo.

## **5.6. Bibliografía.**

- Al-Massoum, A.; Haffar, I.; Mahmoud, A. 1998. A similitude model for testing greenhouse evaporative cooling pads under the hot\_aride conditions of the U.A.E. *Acta horticulturae*. 456:329-338
- Bailey, B. 1984. Limiting the relative humidity in insulated greenhouses at night. *Acta horticultutae*. 148: 411-419.
- Bailey, B. 1988. Energy conservation and renewable energies for greenhouses heating. *Fao REUR. Technical series n°3*.
- Benavente, R.M.; de la Plaza S.; Navas L. M.; García J.L.; Hernández E.; Luna, L. 1998. Establishment and validation of a model to estimate energy consumption of localized heating of greenhouse substrates. *Acta horticulturae*. 456: 339-346
- Bot, G.P.A. 1983. Greenhouse climate: from physical processes to a dynamic model. Thesis Wageningen Agricultural University.
- Bot G P A; 1995. Greenhouse Climate Control: Physics of Greenhouse Climate. Wageningen Pers. The Netherlands

- Boulard T, Baille A. 1987. Analysis of thermal performance of greenhouse as a solar collector. *Energy Agriculture*. 6: 17-26.
- Boulard T, Baille A. 1993. A simple greenhouse climate control model incorporating effects of ventilation and evaporative cooling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 79: 61-77.
- Brunt, D. 1932. Notes on Radiation in the atmosphere. Quart. J. R. Meteor. Soc. 58, 389 en: Berdahl, P. and Martin, M. 1984 Emissivity of clear skies. International Journal for Scientists, Engineers and Technologists in Solar Energy and its Application. Int. Journal of Solar Energy 32( 5): 663-665.*
- Chalabi, Z.S.; Bailey, B.J. 1989. Simulation of the energy balance in a greenhouse. AFRC Institute of Engineering Research, Silsoe, Bedford, MK45 4HS. Divisional Note 1516
- Critten, D.L.; Bailey, B.J. 2002. A review of greenhouse engineering developments during 1990s. *Agricultural and Forest Meteorology*. 112: 1-22
- García, J.L., de la Plaza, S., Navas, L.M., Benavente ,R. M. Luna L.; Duran, J.M. 1998. Energy modeling for heated concrete floors in greenhouses. *Acta Horticulturae* 456: 451-456
- Garzoli, K.V.; Blackwell, J. 1981. An analysis of the nocturnal heat loss from a single skin plastic greenhouse. *J. Agr. Engng. Res.* 26, 203-214
- Gonzalez M, Baille A. 1998. Calefacción de Invernaderos. Tecnología de Invernaderos II. Curso Superior de Especialización. F.I.A.P.A. Pérez Parra y Cuadrado Gómez Ed.
- Ham, J. M.; Kluitenberg, G.J. 1994. Modeling the effect of mulch optical properties and mulch-soil contact resistance on soil heating under plastic mulch culture. *Agricultural and forest meteorology*. 71: 403-424
- Jolliet, O. 1988. Modelisation du comportement thermique d'une serre horticole. PhD. Dissertation. Ecole Polytechnique de Lausanne, Switzerland: 244pp.
- Kempkes, F.L.K; Bakker, J.C.; van de Braak, N.J. 1998. Control and modelling of vertical temperature distribution in greenhouse crops. *Acta Horticulturae*. 456: 363-370
- Kempkes, F.L.K.; van de Braak, N.J. 2000. Heating system position and vertical microclimate distribution in chrysanthemum greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*. 104: 133-142
- Kindelan, M. 1980. Dynamic modeling of greenhouse environment. *Transactions of the ASAE*. 23:1232-1239
- Kittas, C. 1994. Determination du coefficient global de transmission de chaleur a travers la paroi d'une serre. *Agricultural and Forest Meteorology*. 69:205-221
- López Hernández ,J.C. 2003. Sistemas de calefacción en invernaderos cultivados de judía en el litoral mediterráneo. Tesis doctoral. Departamento de producción vegetal. Escuela politécnica superior. Universidad de Almería. pp. 164
- Monteith, J.L. 1975. Principles of Environmental Physics. Edward Arnold Publishers ltd.

- Montero, J.I.; Antón, A. 1993. Tecnología del invernadero. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad de Buenos Aires.
- Montero, J.I.; Antón, A.; Muñoz, P. 1998. Fundamentos. Cap. VI: Instalación y métodos de control climático. Pp 253-266. Tecnología de invernaderos II. Perez Parra- Cuadrado Gomez. Ed.
- Navas, L.M.; de la Plaza, S.; García, J.L.; Luna, L.; Benavente, R.; Durán, J.M.; Retamal, N. 1998. Formulation and sensivity analysis of a dinamic model of the greenhouse climate validation for a mild .Acta Horticulturae. 456:305-312
- Nijkens, J., Deltour, J., Coutisse, S.; Nisen, A. 1984. Heat transfer through covering materials of greenhouses Agricultural and Forest Meteorology. 33 (1984) 193-214
- Papadakis, G.; Briassoulis, D.; Scarascia Mugnozza, G.; Vox, G.; Feuilloley, P.; Stoffers, J.A. 2000. Radiometric and thermal properties of, and Testing methods for, greenhouse covering material (review paper). J. Agr. Engng. Res. 77 (1) 7-38
- Pieters, J.G.; Deltours, J.M. 1997. Performances of greenhouses with the presence of condensation on cladding materials J. Agr. Engng. Res. 68: 125-137
- Pita, P.A., Pontes, M.; Vargues, A.. 1998. Mediterranean greenhouse energy balance. Acta Horticulturae. 456:375-382.
- Tarara, J.M. 2000. Microclimate modification with plastic mulch. HortScience. Vol 35 (2). 169-180
- Teitel, M.; Segal, I. 1995. Net thermal radiation under shading screens. J. Agr. Engng. Res. 61: 19-26
- van de Braak, N.J., Kempkes, F. L. K., Baker, J. C.; Breuer, J.J.G. 1998. Application of simulation models to optimise the control of thermal screens. Acta Horticulturae .456: 391-398
- Vollebregt, H.J.M.; van de Braak, N.J. 1995. Analysis of radiative and convective heat exchange at greenhouse walls. J. Agr. Engng. Res. 60: 99-106
- Von Zabeltitz C.1986. Energy conservation and renewable energies for greenhouses heating. REUR Tecnical serie 3. European cooperative networks on rural energy. CNRE Guideline n°2 FAO
- Wang, S.; Zhu, S.; Deltour. 1997. Simulation and measurement of tunnel greenhouse climate. Trans. Chin. Soc. Agric. Eng. 13 (4): 139-144
- Wei, Y.Q.; Bailey, B.J.; Wilkinson, D.; Lockwood A.; Stenning, B.C. 1998. Detecting surface consensation on tomato plants in greenhouses. Acta Horticulturae. 421:57-63.
- Yang X. S. 1995. Greenhouse micrometeorology and estimation of heat and water vapour fluxes. J. Agr. Engng. Res. 61: 227-238
- Zhang, Y.; Gauthier, L.; de Halleux, D.; Dansereau, B.; Gosselin, A. 1996. Effect of covering materials on energy consumption and greenhouse microclimate. Agricultural and Forest Meteorology. 82: 227-244



---

*Capítulo 6: Modelo del clima del invernadero patagónico  
basado en la Mecánica de Fluidos computacional (CFD)*

---





“Las meninas”. (Velázquez, 1656)

### *6.1 Introducción.*

La Mecánica de Fluidos Computacional o CFD es una herramienta de simulación que se utiliza para analizar cualquier sistema en el que participe un fluido y en el que también puedan tener lugar transmisiones de masa, energía o reacciones químicas. Algunas de las ventajas de este método sobre la experimentación clásica son: a) la reducción en tiempo y en costes, b) la posibilidad de estudiar sistemas en los que la experimentación sería prácticamente imposible, y c) la facilidad de estudiar la respuesta del sistema a un rango muy amplio de parámetros de diseño, con lo que se pueden efectuar estudios de optimización.

El CFD ha evolucionado desde sus primeros pasos en la década de los 80 en paralelo con el desarrollo de los ordenadores. Hoy día es una herramienta de simulación ampliamente usada en las industrias química, de automoción y aeroespacial, y últimamente también encuentra nuevas aplicaciones en la industria agroalimentaria. A partir de las simulaciones en CFD pueden obtenerse las distribuciones espaciales y temporales de la velocidad y dirección del flujo, presión, temperatura y concentración de diferentes especies.

#### *6.1.1 Principios de CFD.*

Para llevar a cabo las simulaciones, primero es preciso definir el espacio o dominio que se pretende estudiar, que en el caso del invernadero sería la propia estructura y el medio que lo rodea. Este dominio de cómputo se divide en pequeñas celdas que constituyen los volúmenes de control, o superficies de control en problemas bidimensionales. En cada uno de los volúmenes de control se aplican las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía, que, una vez resueltas, proporcionan los valores de las variables en estudio en cada volumen, ya sea la temperatura, humedad, velocidad del aire, concentración de un gas, etc. Antes de comenzar a

resolver las ecuaciones de continuidad es preciso definir los materiales que forman parte del dominio junto con las condiciones de contorno; por ejemplo, en estudios de ventilación es necesario definir la velocidad del aire que entra en el dominio, y en estudios de intercambios de radiación térmica entre el invernadero y el cielo es preciso definir el poder de emisión del cielo y su temperatura. El procedimiento de cálculo es iterativo y continúa hasta que los residuos o diferencias de una iteración a otra entre los valores de las variables en estudio son inferiores a unos umbrales previamente elegidos.

De una manera general, la ecuación que describe el fenómeno de transporte es:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \vec{\nabla}(\Phi \vec{v}) = \vec{\nabla} \cdot (\Gamma_{\Phi} \vec{\nabla}(\Phi)) + S_{\Phi} \quad (6.1)$$

donde  $\vec{v}$  es el vector velocidad,  $\Gamma_{\Phi}$  es el coeficiente de difusión y  $S_{\Phi}$  es el término fuente (suma de fuerzas que actúan en el sistema para el caso de la ecuación de la cantidad de movimiento o suma de energía añadida o quitada al sistema por unidad de masa para la ecuación de la conservación de la energía). La variable  $\Phi$  es la variable principal en la ecuación de conservación, es decir  $\Phi$  representa a la densidad  $\rho$  en la ecuación de continuidad, al producto de  $\rho \vec{v}$  en la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento y a  $\rho c_p T$  en la ecuación de balance de energía, donde  $c_p$  es el calor específico y  $T$  la temperatura del fluido (Bird y cols, 1960).

Las ecuaciones generales del tipo de 6.1 junto con otras ecuaciones complementarias que añaden complejidad y precisión al proceso (por ejemplo, las ecuaciones que introducen el modelo de la turbulencia) componen un grupo de ecuaciones diferenciales que necesitan el ordenador para su resolución. La popularidad del CFD se debe al desarrollo de paquetes comerciales de manejo relativamente sencillo que solventan este problema matemático, con lo que el usuario se puede dedicar a la obtención y análisis de los resultados de la simulación sin necesidad de ser un experto en métodos numéricos.

### *6.1.2 Aplicaciones a los invernaderos*

Las aplicaciones de CFD en la horticultura protegida son muy recientes. Reichrath y Davies (2002) revisaron los artículos sobre el uso de la técnica CFD para modelar el clima interno de los invernaderos. El primer trabajo se llevó a cabo en un invernadero vacío tipo Venlo de una sola capilla con ventanas laterales y cenitales (Okushima y col., 1989). El invernadero considerado para el trabajo de modelación fue un modelo a escala 1/10, previamente empleado en ensayos en túnel de viento por Sase y col. (1984). En el estudio se compararon los vectores de velocidad calculados con los datos del túnel de viento. Aunque los campos de velocidades coincidieron de

un modo general, Okushima y col. (1989) concluyeron que se necesitaba mejorar el programa de cálculo para aumentar su precisión. Además, los ordenadores de la época no disponían de suficiente capacidad de cálculo para incrementar el número de celdas en la malla.

Debido al desarrollo del hardware y del software, con el paso del tiempo se consiguieron predicciones más realistas al comparar las simulaciones en dos dimensiones de ventilación por efecto eólico con los resultados de túnel de viento (Mistriotis y col., 1997a, 1997b, 1997c). Mistriotis y col. (1997a, 1997c) presentaron simulaciones en dos dimensiones de distribuciones de temperatura y los patrones de flujo interno bajo condiciones de viento cero y bajas velocidades y realizaron una comparación con los datos experimentales.

A pesar de la falta de información sobre los flujos de calor desde el suelo del invernadero en el ensayo, se obtuvo una buena concordancia tanto para condiciones sin viento como para velocidades bajas del mismo.

Mistriotis y col. (1997d) concluyeron que este resultado justificaba el uso del CFD para el cálculo de la ventilación por efecto térmico en invernaderos. Estos mismos autores (Mistriotis y col., 1997d) también presentó resultados en invernaderos de diferentes dimensiones y configuraciones manteniendo una misma superficie total de ventilación. Se predijo una ventilación total menos eficiente con una ventana lateral cerrada, lo cual se tradujo en mayores temperaturas interiores. Mediante la simulación con CFD, los autores demostraron la importancia de combinar la ventilación lateral y cenital.

Otros estudios que merecen citarse son las comparaciones con un modelo a escala reducido de un Venlo de una sola capilla en dos dimensiones para el estudio del clima interior (Boulard y col., 1997, 1999); (Haxaire y col., 1998a, 1998b). En todos los estudios, la ventilación estaba provocada por el efecto térmico.

En el diseño de invernaderos para aumentar la tasa de ventilación por efecto eólico, cabe destacar los trabajos de Short (1998) y Short y Lee (1999) sobre un invernadero tipo arco de cubierta doble de polietileno de 4,5 capillas con una ventana lateral a barlovento y ventanas cenitales continuas a sotavento. Todos los modelos de simulación fueron de dos dimensiones y en régimen estacionario. Concluyeron que las tasas de ventilación estuvieron fuertemente afectadas por la velocidad del aire y la ventilación a sotavento proporcionó tasas de intercambio de aire mayores que la ventilación a barlovento.

Este estudio condujo a la conclusión de que el diseño con una ventana lateral a barlovento y ventanas cenitales a sotavento era el mejor para la ventilación, conclusión que también obtuvieron para estudios con

invernaderos en diente de sierra (Kacira y col., 1998). En todas las simulaciones se halló una influencia muy significativa del tamaño de las ventanas sobre el intercambio de aire para todas las ventanas y todas las direcciones de viento. Los cultivos, particularmente cerca de la ventana lateral, hacían disminuir ligeramente el intercambio de aire con un incremento de su influencia con velocidades de viento creciente.

La apertura de la ventana influyó en gran medida sobre las temperaturas interiores y la tasa de ventilación, pero conforme aumentó la anchura del invernadero; el incremento en el número de capillas produjo un descenso de la ventilación natural.

En (Lee y Short, 1999) la ventilación natural predicha se comparó con la ventilación de un invernadero de cristal del mismo tamaño con techo susceptible de ser completamente abierto, bajo las mismas condiciones. No se halló una relación consistente entre la tasa de ventilación, el número de capillas y la apertura de la ventana lateral. En el caso de 8 capillas (Short y Lee, 1999) se observa un clima interno muy estancado más allá de la sexta capilla.

Reichrath y col. (2002) han realizado simulaciones de invernaderos de cristal multicapilla comerciales a gran escala con cultivo de tomate, con 60 capillas y casi 40000 m<sup>2</sup> (240 m × 157.5 m) de área. El trabajo pretende desarrollar un modelo tridimensional de “realidad virtual” del invernadero de cristal de forma que las predicciones puedan ser empleadas para servir de guía en el control de este tipo de invernaderos. Reichrath y col. (2000) intentaron identificar una parte bidimensional representativa de todo el invernadero que pudiera ser modelada en lugar de modelar todo el invernadero. Se encontró un flujo interior de dirección contraria a la del viento exterior y se presentaron las distribuciones de temperatura y dióxido de carbono.

Posteriormente, se desarrolló un modelo en dos dimensiones a tamaño completo del invernadero Venlo de 60 capillas bajo condiciones similares. El programa y el modelado del problema fueron validados de forma satisfactoria frente a medidas de la distribución exterior de presiones en el techo de dos invernaderos de 7 y 52 capillas (Reichrath y Davies, 2001). El efecto de algunos parámetros numéricos tales como el tamaño del dominio de cómputo y el número de celdas también se estudió para optimizar los modelos y encontrar un balance entre precisión y esfuerzo de cómputo.

Los avances metodológicos más recientes van encaminados a incorporar plenamente el modelo del cultivo en el modelo completo de simulación, En esta línea cabe destacar el trabajo de Roy y Boulard (2004): mediante la ecuación de Darcy-Forchheimer estos autores determinan la caída de presión en el dosel vegetal e incorporan esta caída de presión en las ecuaciones de la cantidad de movimiento. A partir de la resolución de estas ecuaciones, el campo de velocidad del aire en el dosel se usa para determinar

la resistencia externa o aerodinámica, que junto con la resistencia estomática considerada como función de la radiación global y del déficit de presión de vapor permiten el cálculo de la tasa de transpiración del cultivo. El conocimiento detallado de la respuesta del cultivo al clima interno abre nuevas expectativas en el diseño y gestión climática del invernadero, pues este diseño y gestión se podrán hacer en base al conocimiento detallado de los campos de temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>.

La propuesta de investigación que se presenta con este proyecto se encuadra dentro de esta línea de conocimientos y pretende aportar avances metodológicos en el estado del arte de la cuestión.

En esta revisión también cabe destacar el trabajo de Fatnassi y col (2003) en invernaderos del tipo canario o marroquí. Los autores presentan campos de velocidades, temperatura y humedad de un invernadero de 80 por 70 metros, y analizan el efecto de tres mallas contra insecto de distinta porosidad en el clima interno. Los resultados muestran la complejidad del flujo dentro del invernadero al tiempo que sugieren mejoras en el diseño para que las condiciones de cultivo sean aceptables cuando se utilicen mallas de escasa porosidad.

En los invernaderos de climas mediterráneos las aplicaciones de CFD son muy incipientes. Brugger y col (2003) simularon el comportamiento de un parral de cinco naves comparando la ventilación a barlovento y sotavento para ventanas del tipo abatible y enrollable. Los resultados coincidieron con precisión con las medidas en campo con gas trazador y avalaron la mayor tasa de ventilación de las ventanas abatibles, especialmente cuando se abren a barlovento.

Baeza y cols (2004) han presentado los primeros resultados sobre la tasa de ventilación del parral en función de la superficie de ventanas, número de módulos adosados y pendiente del techo. En relación con este último aspecto es de destacar que la tasa de ventilación crece con la pendiente hasta que ésta alcanza un valor próximo a 30°, valor a partir del cual la tasa de ventilación deja de depender apreciablemente de la pendiente del techo. Es preciso aquí hacer hincapié en el interés de usar CFD en el diseño de la ventilación del invernadero parral, ya que es un invernadero no considerado en los trabajos previamente discutidos y que además tiene la ventaja de poder introducir en él algunos cambios en la forma del techo sin variar esencialmente su diseño constructivo.

Molina-Aiz y cols (2004) también han contribuido al estudio del parral al analizar invernaderos de grandes dimensiones, con superficies cubiertas representativas de las de los invernaderos comerciales de la zona almeriense.

Otro trabajo que se aparta de los anteriores en cuanto a los objetivos es el de Montero y col, 2004, que estudia el comportamiento nocturno en invernaderos sin calefacción. Los primeros resultados muestran la capacidad del CFD para simular la inversión térmica y la influencia que ejerce la radiación neta de longitud de onda larga en el nivel al que se establece la temperatura de la pared cubierta en periodo nocturno. Esta simulación puede servir para comprender y prevenir la acumulación de condensado en el techo, que es uno de los problemas capitales a resolver en los invernaderos del Mediterráneo.

En este capítulo se estudia el clima nocturno del invernadero patagónico usando la técnica CFD. Dada la gran cantidad de simulaciones posibles se ha seleccionado el caso del invernadero pasivo, puesto que como ya se ha comentado en la zona patagónica las bajas temperaturas son uno de los factores limitantes de la producción bajo invernadero, siendo los costos de calefacción el principal aspecto que repercute negativamente sobre la rentabilidad de los cultivos, como se ha expresado en capítulos anteriores.

Por esta razón, el empleo de técnicas pasivas que permitan reducir las pérdidas de calor o aumentar la temperatura dentro de los invernaderos, es fundamental para la producción bajo cubierta en la Patagonia.

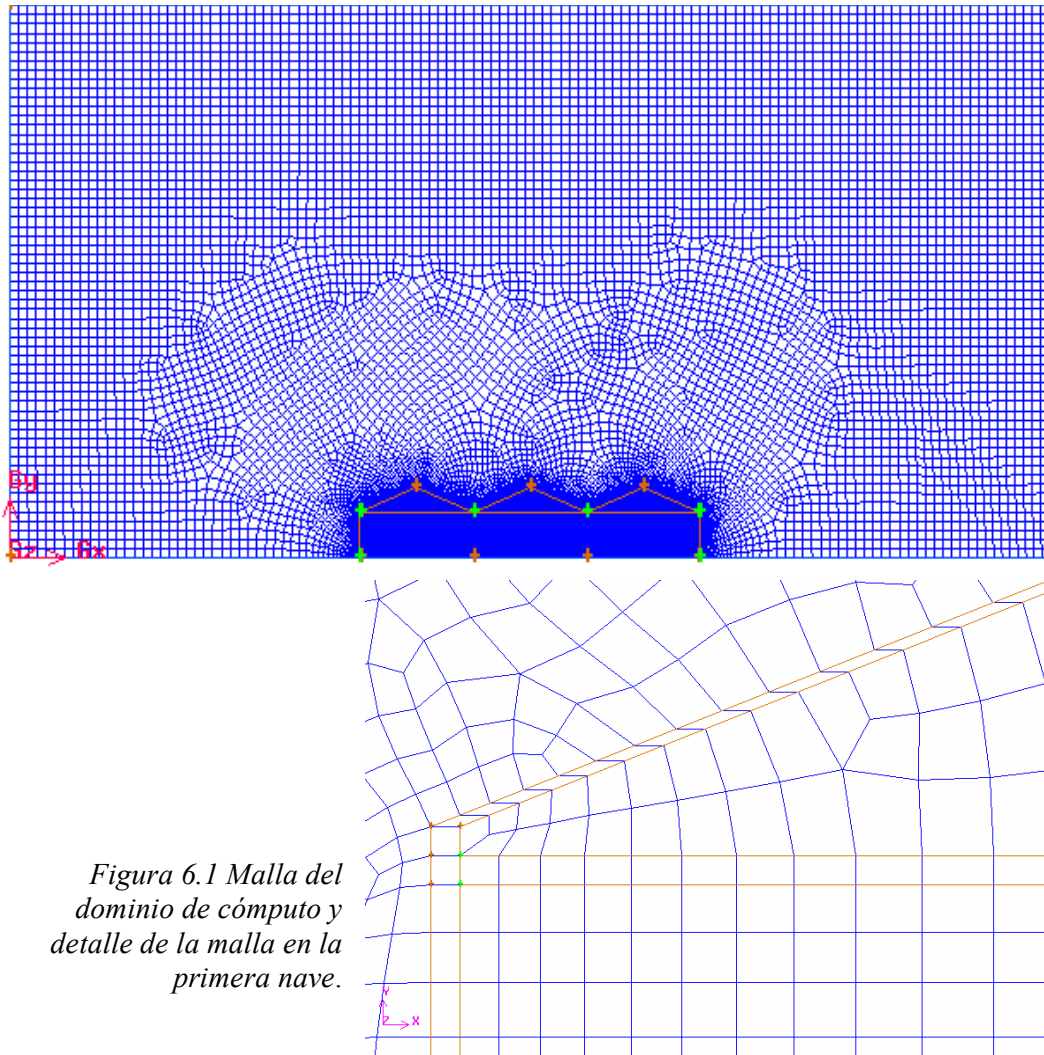
### *6.2 Objetivos.*

- Utilizar un modelo CFD para estudiar el clima nocturno y los flujos de energía de un invernadero sin calefacción en distintas condiciones de noches despejadas y cubiertas.
- Comparar distintos métodos para aumentar la temperatura nocturna por medios pasivos, esto es, sin calefacción artificial.

### *6.3 Materiales y métodos.*

Para las simulaciones se tomó la geometría del invernadero objeto de estudio en esta tesis (tres módulos adosados de techo plano a dos aguas con 6.5 m de ancho cada uno, de 2.5 m de altura en canaleta y 3.8 m en cumbre).

El modelo CFD utilizado fue de dos dimensiones, representativo de un corte transversal del invernadero real en su zona central. El dominio de cálculo fue de 60 m de longitud por 30 m de altura, y el invernadero se situó a 20 m de distancia del borde izquierdo del dominio. Dicho borde se definió como el de entrada de aire externo al dominio, saliendo este aire fundamentalmente por el borde derecho y también en parte por el borde superior considerado como el cielo. (Figura 6.1)



*Figura 6.1 Malla del dominio de cómputo y detalle de la malla en la primera nave.*

En la creación del invernadero virtual se definió la geometría del polietileno de cubierta, de 0.2 mm de espesor, de manera que al realizar la malla del dominio (con código GAMBIT 2.1.6) la cubierta contuvo una serie de elementos de control de 0.1 mm de espesor. Con esta disposición fue posible calcular la temperatura y los flujos de energía en cualquier punto de la cubierta plástica, tanto en su cara externa como en su cara interna hacia el invernadero. El mismo tipo de malla se hizo en las cortinas térmicas cuando se estudió el caso de los invernaderos con techos dobles interiores o exteriores.

Se utilizó el programa comercial Fluent 6.1 en las simulaciones. La tabla 6.1 contiene un resumen de las opciones utilizadas en la modelación del sistema y en el procedimiento de cálculo.

*Tabla 6.1. Parámetros de entrada para el modelo CFD.*

Parámetro	Value
Sistema de resolución	Segregado
Formulación	Implícita
Régimen temporal	Permanente
Modelo de viscosidad	k-epsilon (2 ecuaciones) standard con funciones standard en las paredes. Efectos de flotabilidad incluidos.
Cmu	0.09
C1 Epsilon	1.44
C2 Epsilon	1.92
Modelo radiativo	Ordenadas discretas con discretización angular
Densidad de los materiales	Aproximación de Boussinesq en los fluidos

Para el cálculo de los intercambios por radiación térmica entre el invernadero y su entorno fue necesario definir las propiedades ópticas de los materiales de cubierta en cuanto a su índice de refracción y coeficiente de absorción a la radiación infrarroja de onda larga. Como no fue posible obtener estos valores directamente del fabricante ni medirlos experimentalmente se recurrió a las leyes de Fresnel para estimar por tanteo unos valores del índice de refracción y del coeficiente de absorción que dieran una transmisión de radiación, una absorción y una reflexión de radiación térmica parecidas a las medidas en el capítulo 3 o a las conocidas de materiales similares. Este cálculo dio que, para la radiación perpendicular el polietileno de 0.2 mm de espesor tendría un poder de absorción ( $\alpha$ ) de 0.69, un poder de transmisión ( $\tau$ ) de 0.19 y un poder de reflexión ( $\rho$ ) de 0.11 respectivamente si el índice de refracción y el coeficiente de absorción fueran de 2 y 7000 respectivamente. Estos valores de  $\alpha$ ,  $\tau$  y  $\rho$  están en consonancia con las medidas del capítulo 3. Por tanto se tomaron las constantes 2 y 7000 en el modelo del intercambio de radiación de la cubierta.

El modelo CFD utilizado, con ser bastante complejo, tiene algunas simplificaciones. Una de ellas es que no se consideró el efecto del cultivo en el clima nocturno del invernadero, por la complejidad de incluir un modelo del cultivo en el cálculo. Se aceptó esta simplificación porque el flujo energético de la transpiración nocturna es relativamente pequeño. Otra simplificación admitida fue que se supuso el invernadero perfectamente hermético, lo que fue necesario por la dificultad de definir la superficie de huecos en la cubierta. Ambas simplificaciones se justifican en parte si se piensa que el modelo CFD pretende comparar distintos tipos de cubiertas en distintas condiciones de clima externo, y por tanto es de esperar que en el estudio comparativo, los errores derivados tengan el mismo grado de magnitud.



Para todas las comparaciones se consideró una serie de condiciones constantes de temperatura, velocidad de viento, etc. en todas las simulaciones, variándose sólo el tipo de cubierta. Estas condiciones fueron:

- Temperatura del aire en el dominio fuera del invernadero de 283 K. Por debajo de esta temperatura generalmente se recurre a la calefacción. Por ello marca aproximadamente el límite de los invernaderos pasivos y por eso se eligió para las simulaciones.
- Cesión de calor desde el suelo al invernadero de 20 W m<sup>-2</sup>. Este valor coincide con las medidas registradas durante muchas noches en invernaderos sin calefacción (capítulo 5)
- Velocidad del viento constante de 1 m s<sup>-1</sup> ya que generalmente durante la noche la velocidad del viento es muy baja.

Para evaluar el intercambio de radiación entre el cielo y el invernadero se consideró el cielo como un cuerpo negro a una temperatura equivalente  $T_{\text{ciel}}$  en grados Kelvin tal que un radiómetro recibiría una radiación desde el cielo dada por

$$L_{\text{ciel}} = \sigma T_{\text{cielo}}^4 \quad (6.2)$$

Para cielos totalmente despejados Swinwank (1963) propuso una expresión simple que relaciona  $T_{\text{ciel}}$  con la temperatura del aire  $T_a$  en grados Kelvin.

$$T_{\text{cielo}} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (6.3)$$

Si  $T_a$  se consideró constante en todas las simulaciones e igual a 283 K, según la expresión 6.3  $T_{\text{ciel}}$  sería 262.8 K. Otros autores (por ejemplo Bliss, 1961 y Berdahl y Martin, 1984) incluyen el efecto de la humedad ambiental en el cálculo de la temperatura equivalente del cielo. Por ejemplo, según Bliss en una noche despejada y con humedad próxima a saturación  $T_{\text{ciel}}$  sería aproximadamente 10 K inferior a la temperatura del aire.

Para el caso del cielo totalmente cubierto de nubes se puede considerar que tiene una temperatura equivalente igual a la temperatura del aire. Por estas razones se decidió hacer las simulaciones para todos los tipos de invernaderos en estudio bajo tres hipótesis de cálculo.

- Noches despejadas y secas. Temperatura equivalente del cielo (supuesto cuerpo negro) de 263 K
- Noches despejadas y húmedas. Temperatura equivalente del cielo (supuesto cuerpo negro) de 273 K
- Noches totalmente cubierta de nubes. Temperatura equivalente del cielo (supuesto cuerpo negro) de 283 K

Finalmente, se consideró el invernadero con cuatro tipos de cubierta:

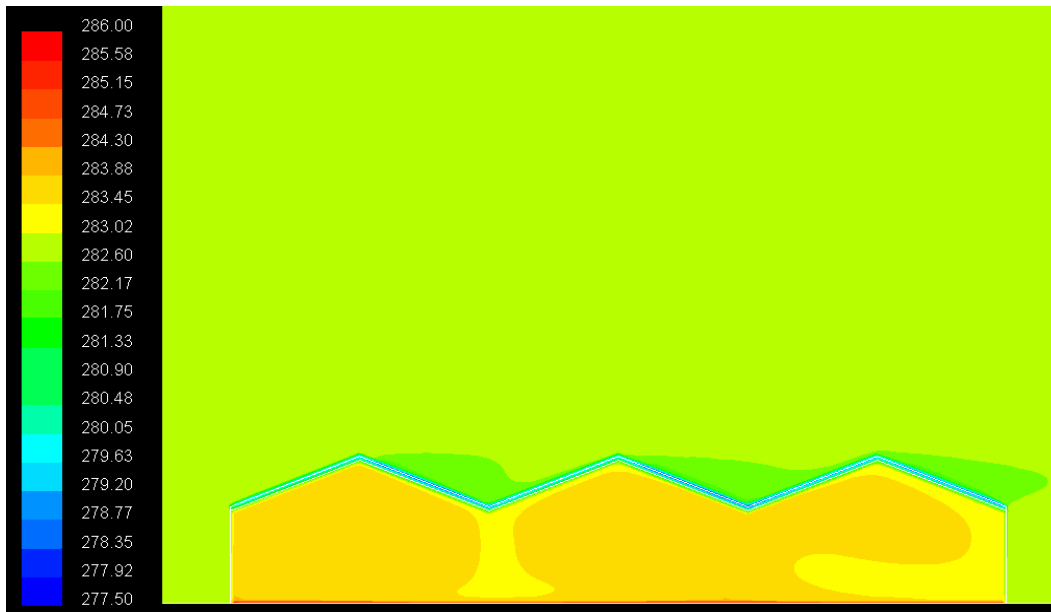
- Cubierta sencilla de PE térmico.
- Cubierta doble de PE separadas 10 cm.
- Cubierta de PE y pantalla térmica horizontal interna de PE
- Cubierta de PE y pantalla térmica horizontal interna de aluminio

Para cada una de estas cuatro cubiertas de invernaderos se hicieron simulaciones con las tres condiciones de cielo citadas antes, produciéndose un total de doce casos de estudio que se comentan a continuación.

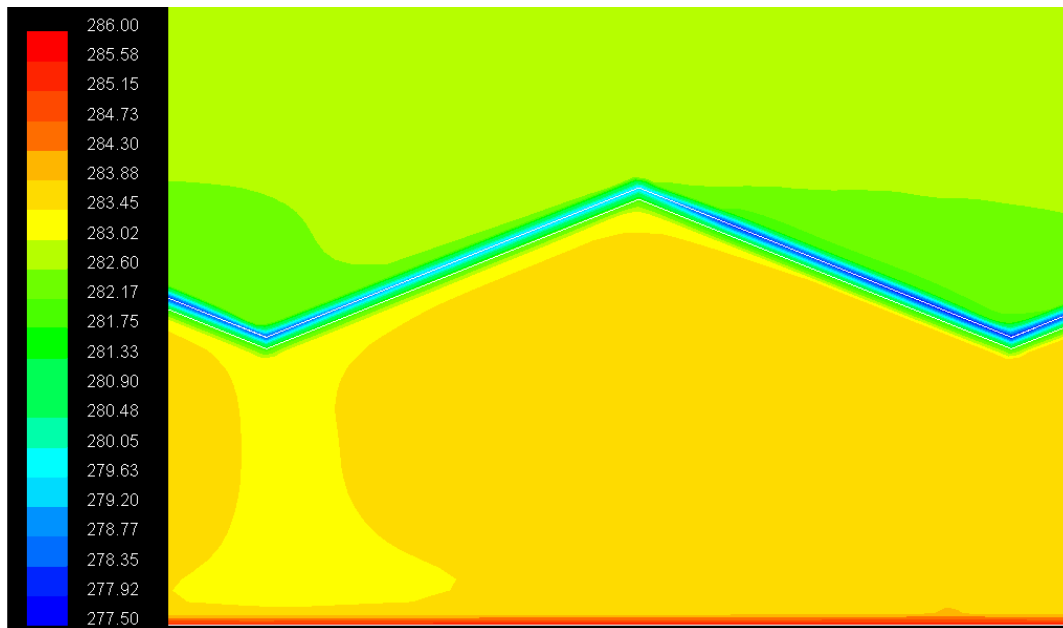
## 6.4 Resultados.

### 6.4.1 Invernadero de cubierta doble de polietileno.

El mapa térmico del invernadero para el supuesto de que el cielo actúe como cuerpo negro con una temperatura de 263 K, 20 grados inferior a la temperatura ambiente, queda reflejado en la figura 6.2, mientras que la figura 6.3 presenta una ampliación de la zona central del techo del invernadero. La escala de colores indica que las zonas de menor temperatura están en azul y las de mayor temperatura en rojo.



*Figura 6.2. Distribución térmica en el invernadero de techo doble*



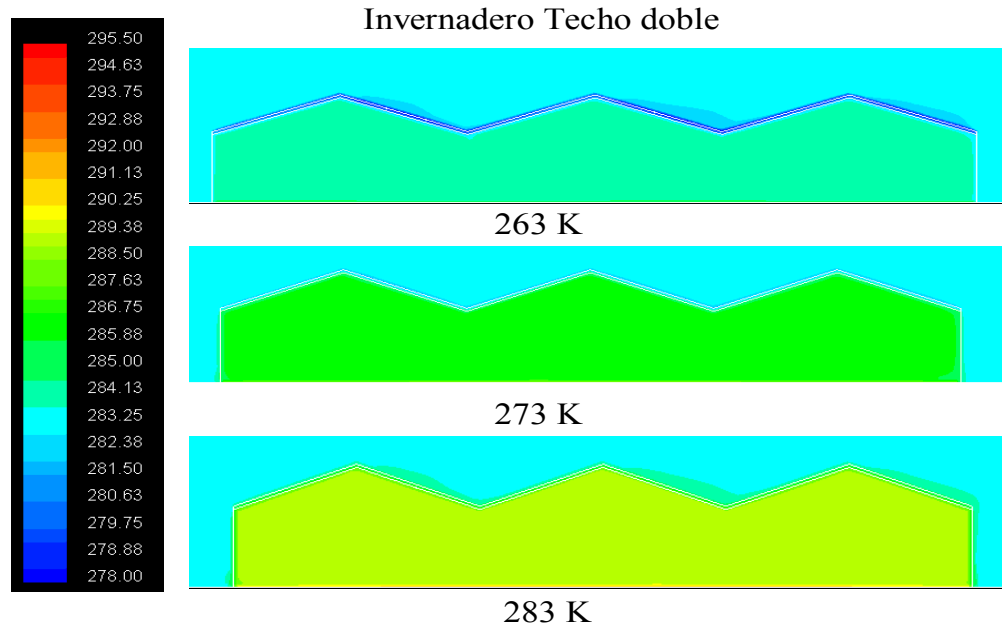
*Figura 6.3 Detalle de la distribución de temperatura en la nave central.*

El comportamiento térmico del invernadero simulado tiene unas cualidades que coinciden con las observaciones en el invernadero real reflejadas en la figura 2.3 del capítulo 2 y en el apartado 5.5.1 del capítulo 5. Puede verse que el suelo es la fuente de calor ya que es la zona a mayor temperatura, mientras que el techo, sobre todo el PE exterior, es el sumidero de energía debido a su alto poder de emisión de radiación térmica.

Por ello el conjunto del techo exterior está a una temperatura de 4.5 °C menos que el aire externo y el techo interior está a 1.7 °C menos que el aire del invernadero. Este dato puede verse en la Tabla 6.2 (al final del presente capítulo) en la cual también se resumen los resultados de todas las simulaciones del modelo CFD con diferentes tipos de cubierta. La tabla 6.2 muestra también que la radiación neta nocturna sobre el invernadero fue 34.28 W/m<sup>2</sup> negativos mientras que la radiación neta interior fue -14.62 W/m<sup>2</sup>. De los valores de temperatura y radiación neta se puede deducir que el invernadero recibe calor del aire exterior a través de su cubierta, tal y como se ha comentado en el capítulo 5 a partir de los datos experimentales.

La figura 6.4 a, b y c representa la distribución de temperatura del invernadero de cubierta doble para las tres situaciones consideradas: a) Cielo despejado en noche seca (temperatura equivalente de 263 K), b) cielo despejado en noche húmeda (temperatura equivalente de 273 K) y c) cielo totalmente cubierto de nubes (temperatura equivalente de 283 K) Según la figura 6.4 conforme aumenta la temperatura equivalente del cielo también aumenta la temperatura del aire y del techo exterior e interior. Así, el salto térmico aire interior-aire exterior fue + 0.5, +3.1 y + 5.9 °C respectivamente para las tres condiciones de cielo consideradas. Conforme aumenta la

temperatura equivalente del cielo disminuyen las pérdidas por radiación neta sobre el invernadero, que fueron  $-34.28$ ,  $-21.63$  y  $-7.35$   $\text{W/m}^2$  respectivamente. En comparación con la noche despejada y seca, la temperatura del techo interior fue  $2.9$   $^{\circ}\text{C}$  superior cuando  $T_{\text{ciel}}$  fue  $273$  K y  $5.9$   $^{\circ}\text{C}$  para  $T_{\text{ciel}}$  igual a  $283$  K. El aumento de la temperatura del techo interior siempre es un fenómeno positivo por reducir el riesgo de formación de condensado.



*Figura 6.4: Temperatura en el invernadero de techo doble para  $T_{\text{ciel}}= 263$ ,  $273$  y  $283\text{K}$*

Cuantitativamente, los valores experimentales recogidos en el capítulo 2 y 5 parecen situarse entre los valores calculados para los casos de  $T_{\text{ciel}}$  263 y 273, estando más próximos a este segundo caso que representa las condiciones de las noches despejadas y próximas a humedad de saturación. Por ejemplo, en las simulaciones en que  $T_{\text{ciel}}=273$  K el salto térmico aire interior-aire exterior fue  $3.1$   $^{\circ}\text{C}$  mientras que en el capítulo 5 se comentó que el salto térmico medio del aire durante las noches de medidas sin calefacción fue  $2.9$   $^{\circ}\text{C}$ . Así mismo, según las simulaciones el techo externo estuvo a  $1.5$   $^{\circ}\text{C}$  menos que el aire externo, y las medidas experimentales dieron de promedio  $2.46$   $^{\circ}\text{C}$ . Por último, el techo interior estuvo a  $1.4$   $^{\circ}\text{C}$  menos que el aire del invernadero según el modelo de simulación y a  $1.57$   $^{\circ}\text{C}$  según las medidas.

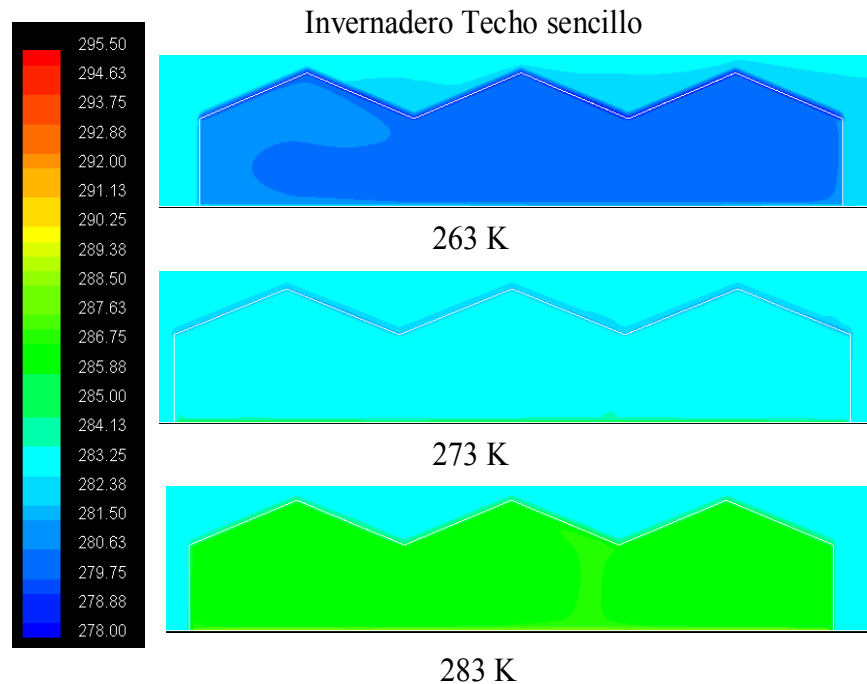
En relación con la radiación neta nocturna sobre y dentro del invernadero, los valores de la tabla 6.2 están dentro del rango de los valores medidos experimentalmente y representados en la figura 5.4. Por tanto, aunque no se ha podido llevar a cabo en este trabajo una validación exhaustiva del modelo CFD, la semejanza entre la simulación y las medidas experimentales en los aspectos cualitativos y cuantitativos aporta confianza a los resultados derivados del modelo CFD. Este hecho apoya el uso del modelo para

comparar distintas alternativas de cubiertas y ver cual es más efectiva en el aumento de temperatura nocturna.

#### **6.4.2. Invernadero de cubierta sencilla de PE.**

La figura 6.5a, b y c representa el mapa térmico del invernadero de cubierta sencilla para los tres casos de temperatura de cielo ya comentados. Frente al invernadero de cubierta doble, quizás el rasgo más característico sea la notable inversión térmica de 2.5 °C para  $T_{\text{ciel}} = 263\text{K}$ . Esta inversión de una magnitud parecida ha sido documentada en varios trabajos previos en invernaderos sin calefacción. (Montero y cols, 1986, López 2003).

Para las noches totalmente cubiertas no se observa inversión térmica, sino que la temperatura del invernadero está 3.7 °C por encima de la temperatura exterior. Cabe recordar que el invernadero simulado es perfectamente estanco al aire, y por tanto en la realidad seguramente no se darían saltos térmicos tan elevados. En cualquier caso, el efecto de la temperatura del cielo es mucho más acusado en el invernadero de techo sencillo que en el invernadero de techo doble, lo que tiene pleno sentido físico puesto que el aire confinado en el invernadero de techo doble está más aislado térmicamente del exterior, y por ello es menos sensible a los cambios de cualquier condición externa.



*Figura 6.5 Temperatura en invernadero de techo sencillo*

Para el invernadero de cubierta sencilla la temperatura del techo fue 4.4. K menor que el aire externo en noches claras y secas, mientras que en noches cubiertas el techo estuvo por encima de la temperatura externa (Tabla 6.2). Ello confirma las observaciones que indican que la condensación es mayor en noches despejadas.

La comparación del techo sencillo y del doble muestra por tanto las claras ventajas del segundo frente al primero en cuanto al superior nivel térmico del aire, menor riesgo de condensación y menor dependencia de las condiciones externas.

Sin embargo en la práctica el techo doble fijo tiene dos claros inconvenientes que afectan al clima diurno: la pérdida de transmisión de radiación solar y la dificultad de construcción de ventanas cenitales. Por este motivo se decidió simular la acción de un techo doble móvil a modo de pantalla horizontal que pudiera extenderse durante la noche y plegarse durante el día.

#### **6.4.3. Invernadero de cubierta sencilla de PE y pantalla térmica de PE.**

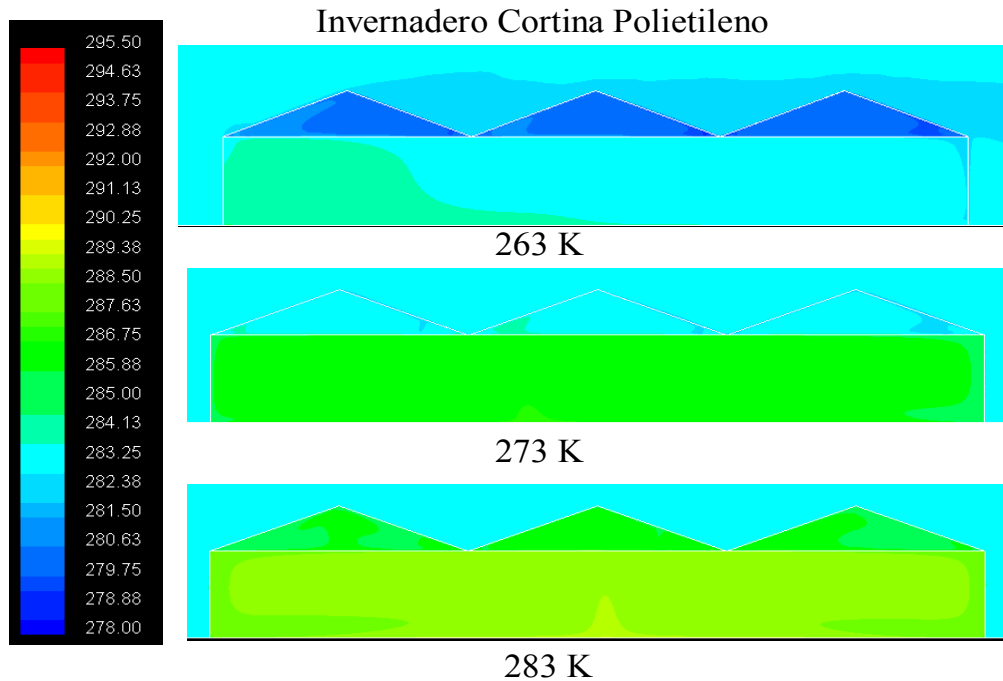
La figura 6.6a, b y c representa el mapa térmico del invernadero de cubierta sencilla de PE con pantalla térmica también de PE para los tres casos de temperatura de cielo ya comentados. En comparación con el invernadero sin cortina, el efecto de la cortina es muy notable puesto que el incremento que produce la cortina está comprendido entre 2.8 y 1.9 °C en función de la temperatura del cielo. Este valor está dentro del rango medido en invernaderos experimentales (Montero y cols, 1986) que registraron aumentos térmicos entre 1 y 2 °C en invernaderos con el dosel vegetal completo y entre 3 y 4 °C en invernaderos sin plantas.

Posiblemente en los invernaderos sin cultivo el calor aportado desde el suelo sería superior a los 20 W/m<sup>2</sup> supuestos en las simulaciones, pues el suelo desnudo recarga energía solar durante el día en mayor proporción que el suelo sombreado por las plantas.

El perfil térmico del invernadero con cortina muestra dos zonas muy diferenciadas; por encima de la cortina se forman tres triángulos limitados por la cortina horizontal y el techo del invernadero que están a menor temperatura que la zona inferior, donde teóricamente se desarrollaría el cultivo. Para esta segunda zona, las simulaciones muestran que es prácticamente irrelevante construir un doble techo o una cortina horizontal de PE (Figuras 6.4 y 6.6a, b y c) puesto que las diferencias son del orden de 0.2 o 0.3 °C con ligera ventaja del techo doble.

Es posible que esta ligera ventaja se deba a que en el caso de la cortina horizontal, el aire encerrado en los triángulos del techo circula a mayor velocidad que el aire entre las dos capas del techo doble, con lo cual la

transmisión de calor desde la zona de cultivo hacia el exterior es mayor en el invernadero con cortina.



*Figura 6.6. Temperatura en invernadero con cortina PE*

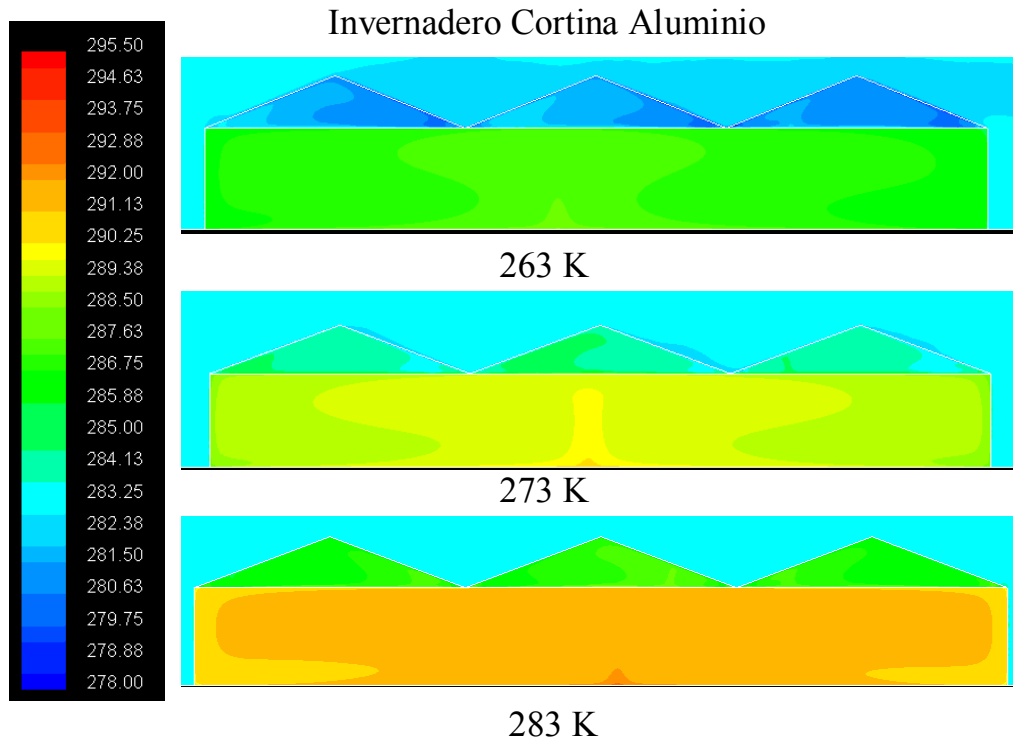
En cualquier caso, la decisión de usar uno u otro sistema debe basarse en otras razones de índole técnicas o económicas, pero no por el régimen térmico nocturno.

#### ***6.4.4. Invernadero de cubierta sencilla de PE y pantalla térmica de aluminio.***

Otra de las opciones que quiso investigarse fue la de utilizar un material con poder de reflexión de la radiación térmica, como es el caso de una cortina de aluminio. Se escogió para las simulaciones una pantalla de un poder de reflexión de 0.85, porque se pretendía averiguar cual es el potencial máximo de aumento térmico que puede tener una pantalla. Un material de estas características es posible encontrarlo en la práctica, pero es más propio de la industria o de una agricultura altamente intensificada, que no es el caso del invernadero patagónico. Sin embargo, puesto que en esta tesis se presentan simulaciones de una cortina de polietileno y de otra cortina de alto poder de reflexión, la mayoría de las cortinas del mercado agrícola pueden considerarse entre una y otra, y su efecto en el invernadero debe quedar en una posición intermedia a las presentadas aquí.

La figura 6.7a, b y c muestra el contorno térmico del invernadero de cubierta sencilla de PE con pantalla térmica de aluminio reflexivo, para los tres casos

de temperatura de cielo. La cortina de aluminio produce un aumento térmico adicional muy estimable sobre la cortina de PE. Este aumento es máximo (3.5 °C) para  $T_{\text{ciel}} = 263 \text{ K}$  y se reduce hasta 2.7 K para  $T_{\text{ciel}} = 283 \text{ K}$ . Según la tabla 6.2, la cortina de aluminio puede lograr un salto térmico respecto al aire exterior de 3.9 K para noches muy despejadas y de 8.2 K para noches muy cubiertas. La temperatura de la cortina de aluminio también muestra ser superior a la de PE, aunque el efecto de la cortina de aluminio es mayor en la temperatura de aire que en la del techo.



*Figura 6.7 Temperatura en invernadero con cortina de aluminio.*

Entre los casos comparados en esta tesis, el campo de temperatura mostrado en la figura 6.7 marca el nivel térmico máximo que puede alcanzar un invernadero por medios pasivos, a través de la reducción de las pérdidas por infiltración y de la reflexión de la radiación térmica emitida por el suelo.

### **6.5 Discusión.**

Las comparaciones de los casos en estudio muestran que la temperatura interna es muy sensible al tipo de construcción de la cubierta y a los materiales que se utilicen. Puede verse que una reducción pequeña en las pérdidas a través del techo puede ocasionar un cambio notable en el aire del invernadero (tabla 6.2). Se da la circunstancia de que, conforme se reducen las pérdidas a través del techo, aumenta la temperatura del invernadero y también aumentan las pérdidas a través de los laterales, ya que estas pérdidas se deben fundamentalmente a la conducción/convección que depende en gran manera del salto térmico interior–exterior.



En esta tesis no se ha simulado ningún invernadero con techo doble en los laterales. Sin embargo, de los resultados de la tabla 6.2 se deduce el interés de reducir las pérdidas a través de los laterales. Por ejemplo, para el invernadero de cortina de aluminio el techo pierde  $10.15 \text{ W/m}^2$  mientras que el lateral pierde  $34.98 \text{ W/m}^2$  para  $T_{\text{ciel}} = 283 \text{ K}$ . En invernaderos de pequeñas dimensiones en los que la superficie de laterales y frontales tiene importancia en comparación con la superficie del techo parece muy aconsejable hacer un esfuerzo para doblar el material de cobertura también en estas zonas, sobre todo en las noches nubladas en las que el salto térmico es mayor.

De los resultados de las simulaciones puede afirmarse que es posible mejorar notablemente la temperatura nocturna sin ayuda de calefacción artificial. Para este objetivo, además de hacer esfuerzos en reducir las pérdidas térmicas cabe la opción complementaria de tratar de aumentar la cesión de calor desde el suelo por encima del valor de  $20 \text{ W/m}^2$  considerado en este estudio. Como se ha discutido en el capítulo 5 el acolchado o mulch ayuda a lograr este objetivo. Como continuación de los resultados presentados aquí se sugiere continuar en el futuro con las simulaciones CFD para estudiar el comportamiento térmico del suelo y aumentar su cesión de calor al invernadero mediante la elección adecuada de materiales de acolchado.

## *6.6. Conclusiones*

El modelo permite una buena explicación del comportamiento térmico del invernadero sin calefacción ya que las temperaturas simuladas coincidieron con las observaciones realizadas previamente.

Los resultados mostraron un efecto positivo, aumento de la temperatura del aire, mediante el empleo de techo de doble cubierta en relación al techo simple. La temperatura del plástico interior o de la cortina térmica fue también superior a la del plástico simple, con lo que el riesgo de condensación disminuye.

No se encontraron diferencias importantes, en el régimen térmico del aire interior, entre los invernaderos de techo doble y de cortina horizontal.

La cortina de alto poder de reflexión fue la que produjo mayor aumento térmico.

Es conveniente reducir las pérdidas a través de las paredes laterales y frontales, sobre todo: en invernaderos de pequeñas dimensiones y en condiciones en que haya un salto térmico del aire mayor (noches con nubes)

## 6.7. Bibliografía

- Baeza, E.J.; Pérez-Parra, J.; Montero, J.I. 2004. Effect of ventilator size on natural ventilation in parral greenhouse by means of CFD simulations. Greensys meeting in Leuven. Acta Horticulturae. En prensa.
- Berdahl, P. and Martin, M. 1984. Emissivity of clear skies. International Journal for Scientists, Emgineers and Technologist in Solar Energy and its Application. Int. Journal of Solar Energy 32( 5): 663-665.
- Bird, R. B. , W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, 1960. Transport phenomena. John Wiley and Sons, Inc. Nueva York.
- Bliss, R.W. 1961. Atmospheric Radiation near the surface of the ground. Solar Energy 5: 103
- Boulard, T., Roy, J.C., Lamrani, M.A., Haxaire, R. 1997. Characterising and modelling the air flow and temperature profiles in a closed greenhouse in diurnal conditions. En: IFAC Mathematical and Control Applications in Agriculture and Horticulture. (Ed). Hannover, Germany. 37-42.
- Boulard, T., Haxaire, R., Lamrani, M.A., Roy, J.C. 1999. Characterization and modelling of the air fluxes induced by natural ventilation in a greenhouse. Journal of Agricultural Engineering Research. 74: 135-144.
- Brugger, M., Montero and J.I., Baeza, E.,Pérez-Parra, J. 2003. Computational Fluid Dynamic Modeling to Improve the Design of the Spanish Parral Style Greenhouse. Annual International Meeting.ASAE. Paper N°:034046.
- Fatnassi, H., Boulard, T. and Bouirden, L. 2003. Simulation of climatic conditions in full-scale greenhouse fitted with insect-proof screens. Agricultural and Forest Meteorology 118: 97-111.
- Haxaire, R., Roy, J.C., Boulard, T., Lamrani, M.A., Jaffrin, A. 1998a. Étude numérique et expérimentale de la ventilation par convection naturelle dans une serre. En: Ates Congress Annual, SFT. (Ed). Marseille. Elsevier, Paris. 64-69.
- Haxaire, R., Roy, J.C., Boulard, T., Lamrani, M.A., Jaffrin, A. 1998b. Greenhouse natural ventilation by buoyancy forces,. En: EPIC'98/1. Proceedings of the 2nd European Conference on Energy Performance an Indoor Climate in Buildings and 3rd International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings. (Ed). École Nationale des Traveaux Publics de l'État, Lyon, France. 522-527.
- Haxaire, R., Boulard, T., Mermier, M. 2000. Greenhouse natural ventilation by wind forces. En: Internatiuonal Conference and British-Israeli Workshop on greenhouse Techniques towards the 3rd Millennium. Bailey, B.J. (Ed). Haifa, Israel. Acta Horticulturae. 534: 31-39.

- Kacira, M., Short, T. and Stowell, R.R. 1998. A CFD evaluation of naturally ventilated, multi-span, sawtooth greenhouses. Transactions of the ASAE 41 (3): 833-836.
- Lee, I., Short, T.H. 1999. Computational fluid dynamic study for structural design of naturally ventilated multi-span greenhouses. En: 92nd Annual International Meeting of ASAE. (Ed). Toronto Ontario, Canada. ASAE.
- López Hernández, J.C. 2003. Sistemas de calefacción en invernaderos cultivados de judía en el litoral mediterráneo. Tesis doctoral. Departamento de producción vegetal. Escuela politecnica superior. Universidad de Almería. Almería. pp. 164.
- Mistriotis, A., Arcidiacono, C., Picuno, P., Bot, G.P.A., Scarascia Mugnozza, G. 1997a. Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low-wind-speeds. Agricultural and Forest Meteorology. 88: 121-135.
- Mistriotis, A., Bot, G.P.A., Picuno, P., Scarascia Mugnozza, G. 1997b. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. Agricultural and Forest Meteorology. 85: 217-228.
- Mistriotis, A., Jong, T.d., Wagemans, M.J.M., Bot, G.P.A. 1997c. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool for the analysis of ventilation and indoor microclimate in agricultural buildings. Netherlands Journal of Agricultural Science. 45: 81-96.
- Mistriotis, A., Picuno, P., Bot, G.P.A., Scarascia Mugnozza, G., Munack, A., Tantau, H.J. 1997d. Computational study of the natural ventilation driven by buoyancy forces. En: Mathematical and control applications in agriculture and horticulture. (Ed). Germany. Hannover: 67-72.
- Molina-Aiz, F.D., Valera, D. L., Alvarez, A.J. 2004. Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using computational fluid dynamics. Agricultural and Forest Meteorology 125: 33-51
- Montero, J.I., Bretones, F. and Castilla, N. 1986. Comparación del microclima en invernadero de cubierta doble y sencilla en Almería.. Caja Rural de Almería Congreso SECH. Córdoba
- Montero, J.I., Muñoz, P., Antón, A. 2004. Computational Fluid Dynamic modelling of night-time energy fluxes in unheated greenhouses. Greensys meeting in Leuven, Acta Horticulturae En prensa.
- Okushima, L., Sase, S., Nara, M. 1989. A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics. Acta Horticulturae. 284: 129-136.
- Reichrath, S., Davies, T. 2001. Analysis of the internal flow in a multi-span glasshouse. En: 1st Workshop on "Management , Identification and control of Agriculture Buildings" MICAB. (Ed). Vila Real, Portugal. 55-68.
- Reichrath, S and Davies, T. W. 2002 Using CFD to model the internal climate of greenhouse: past, present and future. Agronomie 22: 3-19.

- Roy, J.C., Boulard T. 2004. Prediction of the natural ventilation in a tunnel-type greenhouse: influence of wind direction and sensibility to turbulence models. Greensys meeting in Leuven, Acta Horticulturae. En prensa.
- Sase, S., Takakura, T., Nara, M. 1984. Wind tunnel testings on airflow and temperature distribution if a naturally ventilated greenhouse. Acta Horticulturae. 174: 329-336.
- Short, T.H., 1998. Aerodynamic design improves ventilation. Grower Talks Magazine, July 1998:90-98
- Short, T.H., Lee, I. 1999. Fluid dynamic studies of naturally ventilated greenhouse designs. The Ohio Florist Association Bulletin. 835:

Tabla 6.2. Saltos térmicos en relación con la temperatura exterior de 283 K y flujos de energía para los cuatro tipos de invernadero en estudio y para tres temperaturas equivalentes del cielo supuesto cuerpo negro.

Tipo de cubierta	Temperatura equivalente cielo °K	Salto térmico			Flujos de energía			
		Aire invernadero °C	<b>Techo interior</b> °C	Techo exterior °C	Techo			Laterales Pérdida total W/m <sup>2</sup>
					Pérdida total W/m <sup>2</sup>	Radiación neta exterior W/m <sup>2</sup>	Radiación neta interior W/m <sup>2</sup>	
Techo doble PE	263	0,5	-1,2	-4,5	-17,16	-34,28	-14,62	-7,29
	273	3,1	1,7	-1,5	-15,48	-21,63	-13,55	-12,55
	283	5,9	4,7	1,6	-13,99	-7,35	-12,51	-18,3
Techo sencillo PE	263	-2,5	-	-4,4	-19,25	-34,18	-16,28	-1,9
	273	0,4	-	-1,4	-17,42	-22,03	-14,88	-5,35
	283	3,7	-	2	-15,73	-8,79	-13,56	-11,25
Cortina interior PE	263	0,4	-0,8	-4,4	-16,97	-34,43	-13,57	-6,81
	273	2,9	1,8	-1,5	-15,46	-21,67	-12,65	-12,97
	283	5,5	4,6	1,6	-13,61	-7,21	-11,72	-20,63
Cortina interior Al	263	3,9	2	-4,8	-13,03	-32,18	-5,96	-23,16
	273	5,9	4,3	-1,9	-11,64	-19,56	-5,6	-28,8
	283	8,2	6,7	1,2	-10,15	-5,34	-5,19	-34,98

---

---

*Capítulo 7: Conclusiones*

---

---

En este capítulo se presentan las conclusiones acordes a los objetivos específicos planteados en los distintos capítulos que componen el cuerpo de la tesis.

### **1 Objetivos**

*Caracterizar las condiciones ambientales del entorno productivo del área de cultivos en la cual se desarrollan los trabajos de tesis*

*Describir las características de los invernaderos típicos de la región*

### **Conclusiones**

Los invernaderos del norte de la Patagonia son adaptaciones de modelos mediterráneos ajustados a las condiciones climáticas locales, principalmente el viento, que obliga a diseñar estructuras reforzadas.

La ventilación es casi exclusivamente lateral, mediante cortinas enrollables, ya que el empleo de una doble cubierta de techo complica diseños con ventilación cenital.

Los invernaderos del norte patagónico no cubre superficies totales superiores a 5000 m<sup>2</sup>, siendo superficies compuestas por módulos entre 6 y 6.5 metros de ancho con alturas promedio a canalón de 2.5 metros y altura promedio a cumbrera de 3.5 metros.

El principal ciclo de cultivo es durante la primavera-verano siendo el tomate la especie más difundida, las bajas temperaturas al inicio del ciclo obligan al aporte suplementario mediante sistemas de calefacción por lo general de aire forzado.

### **2. Objetivo**

*Caracterizar parámetros microclimáticos de un invernadero típico de la región Patagonia Norte que puedan llegar a limitar la productividad dentro del mismo.*

### **Conclusiones**

No se verifica un gradiente de temperatura en el plano horizontal, a 1m de altura dentro del invernadero, que pongan en riesgo la homogeneidad en la calidad y productividad del cultivo en ese plano que pudieran deberse a diferencias de temperatura en el sentido N-S.

Se observa un gradiente de temperatura en el plano vertical el cual comprometería la productividad de los racimos superiores del cultivo de tomate. Esto indica la necesidad de prever ventilación cenital o construir invernaderos más altos y mayor superficie de ventanas laterales.

El empleo de mulch produce un notorio incremento de la temperatura a nivel de suelo durante el día y la noche beneficiaría al cultivo con respecto al suelo desnudo.

Los registros de radiación permiten afirmar que la misma no es una limitante para el cultivo de tomate en el ciclo primavera-estival pero que para el cultivo otoñal los valores registrados comprometen el desarrollo normal del cultivo.

Los rangos de humedad relativa observados se consideran normales para el tipo de invernadero en estudio, no poniendo el riesgo el normal desarrollo del cultivo de tomate.

### **3. Objetivo**

*Determinar de la transmitancia a la radiación solar y a la radiación infrarroja térmica de distintos materiales empleados como cubierta de los invernaderos en el norte de la Patagonia.*

### **Conclusiones**

Existe una disminución de la transmitancia de la radiación solar del orden del 8-9% debida a la colocación de la doble cubierta de techo.

La doble cubierta, en techos de una pendiente de 20°, implica una disminución de la transmitancia a la radiación PAR del 8- 9%.

Las cubiertas con aditivos para mayor duración (PE LDTX 150) muestran mayores valores de luz transmitida dentro del invernadero con respecto a las cubiertas sin este aditivo.

El PE LDTX 150 permite disminuir la pérdida de calor por transmisión de radiación térmica con respecto al PE LDT 150.

El empleo de una doble cubierta de polietileno normal o cristal, de 50 µm de grosor, permite reducir las pérdidas de calor entre el 7 y 11%.

### **4. Objetivo**

*Comparar la transmitancia de la radiación fotosintéticamente activa, durante la temporada de cultivo de primavera-verano, para distintos tipos de invernaderos con techos curvos y planos, utilizados comúnmente en norte de la Patagonia.*

### **Conclusiones**

Para estructuras metálicas de similares características de construcción con orientación de cumbrera en el sentido E-O, no existen diferencias entre la

radiación PAR global transmitida por un invernadero de techo curvo frente a uno de techo en capilla.

Los invernaderos de techo de doble cubierta, orientados en el sentido E-O, durante horas de mediodía solar de ángulo  $\alpha$  entre  $16^\circ$  y  $19^\circ$ , presentan disminución del 16-17% de la radiación PAR transmitida frente a invernaderos de techos de simple cubierta.

Durante días de primavera-verano, no se registran diferencias en la radiación transmitida en el sentido N-S, entre invernaderos multicapilla y parabólico múltiple, orientados en el sentido E-O.

El empleo de doble cubierta no altera la distribución de radiación PAR dentro de los invernaderos con respecto a invernaderos de simple cubierta.

### **5. Objetivo**

*Evaluar las pérdidas energéticas totales y el aporte de calor del suelo en un invernadero triple capilla, estructura típica del norte de la Patagonia.*

### **Conclusiones**

En condiciones de noche despejada, sin aporte de calefacción, la mayor ganancia de radiación térmica proviene del cielo, con valores medios de  $242 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  mientras que las pérdidas de radiación térmica se producen principalmente por emisión de la cubierta ( $227 \text{ W}/\text{m}^2$ ) y en segundo lugar por la radiación emitida por el suelo y transmitida por la cubierta (cerca de  $50 \text{ W}/\text{m}^2$ )

Las pérdidas por radiación neta superan a las ganancias en valores que oscilan entre  $-21.3$  y  $-42.3 \text{ W}/\text{m}^2$ .

El empleo de doble cubierta de techo tiene un efecto beneficioso permitiendo un balance entre la radiación emitida desde el suelo o cultivo y la radiación emitida por la cara interior de la cubierta interna pequeño, con valores promedios de  $-20 \text{ W}/\text{m}^2$ .

El invernadero presenta buen aislamiento térmico respecto a las pérdidas por radiación presentando diferencias entre radiación neta externa e interna en torno a  $10 \text{ W}/\text{m}^2$ .

En general, las pérdidas de energía (radiación térmica) se asemejan a las ganancias (aporte de calor del suelo y convección de la cubierta) cumpliéndose por lo tanto el balance energético del invernadero sin calefacción.

En condiciones de invernadero pasivo (sin calefacción), la fuente de calor



nocturno es fundamentalmente el suelo mientras que el sumidero de energía es la cubierta externa.

El empleo de cubierta plásticas sobre el suelo permite mayor acumulación de calor durante el día y mayor liberación de calor desde el suelo al invernadero en horas de la noche con respecto al suelo desnudo. En promedio, el calor liberado por el suelo cubierto  $19 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  superior al suelo desnudo.

La diferencia de aporte de calor del suelo con cobertura, se traduce en un incremento de la temperatura del orden de  $0.87^\circ\text{C}$  con respecto a la temperatura del suelo desnudo.

### **6. Objetivos**

*Utilizar un modelo CFD para estudiar el clima nocturno y los flujos de energía de un invernadero sin calefacción en distintas condiciones de noches despejadas y cubiertas.*

*Comparar distintos métodos para aumentar la temperatura nocturna por medios pasivos, esto es, sin calefacción artificial.*

### **Conclusiones**

El modelo permite una buena explicación del comportamiento térmico del invernadero sin calefacción ya que las temperaturas simuladas coincidieron con las observaciones realizadas previamente.

Los resultados mostraron un efecto positivo, aumento de la temperatura del aire, mediante el empleo de techo de doble cubierta en relación al techo simple. La temperatura del plástico interior o de la cortina térmica fue también superior a la del plástico simple, con lo que el riesgo de condensación disminuye.

No se encontraron diferencias importantes, en el régimen térmico del aire interior, entre los invernaderos de techo doble y de cortina horizontal.

La cortina de alto poder de reflexión fue la que produjo mayor aumento térmico.

Es conveniente reducir las pérdidas a través de las paredes laterales y frontales, sobre todo: en invernaderos de pequeñas dimensiones y en condiciones en que haya un salto térmico del aire mayor (noches con nubes)

A partir de estas conclusiones de esta tesis quedan abiertas una serie de interrogantes que permiten sugerir un amplio espectro de temas a

investigar, tanto en lo que respecta a las estructuras como a tipos de cubiertas que permitiesen hacer más eficiente el control de las variables climáticas de los invernaderos del norte de la Patagonia.

En lo referido a las estructuras, sería necesario evaluar distintos diseños que contemplasen una mayor hermeticidad de los invernaderos a fin de evitar pérdidas de calor por la noche, por ejemplo sistema de puertas dobles y mejor cierre en los sectores de solapado de las cortinas con las paredes. Por otro lado en lo que respecta a la transmisión global de luz de los invernaderos, habría que comparar modelos con ángulo de inclinación de techo mayor a los existentes en la región.

Si se considera que las elevadas temperaturas a fines de primavera son una limitante para la productividad y calidad de tomate, sería conveniente evaluar alternativas estructurales que evitasen temperaturas elevadas, entre otras cosas se podría considerar mayor altura de las naves y/o disposición de aberturas cenitales, para lo cual habría diseñar un sistema que permitiese correr y descorrer la doble capa de techo interno.

Con respecto al control de clima, el empleo de mallas de sombreado tanto dentro como por encima del invernadero, es una alternativa de reducción de altas temperaturas que debe ser considerada en futuras líneas de investigación. Por otro lado, una línea de investigación es la evaluación de paredes dobles como opción para disminuir las pérdidas de calor nocturno, debiéndose estudiar las pérdidas de transmitancia de radiación solar que eso implica.

A su vez nuevos materiales plásticos aparecen constantemente en el mercado lo cual requiere de trabajos de evaluación de la respuesta de los mismos a las condiciones climáticas locales, tanto en lo que refiere a sus propiedades ópticas como mecánicas y la durabilidad como cubierta de los invernaderos regionales.

Teniendo en cuenta el cultivo de tomate como principal actividad económica en el ciclo primavera-estival, habría que establecer líneas de investigación para evaluar el efecto de los factores climáticos (luz, temperatura y humedad), sobre la productividad y calidad de los frutos de los distintos racimos de la planta, con la finalidad de establecer manejos de dichos factores climáticos que permitan aumentar los rendimientos.