

2017

# "EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN SISTEMA EÓLICO DE ENERGIZACIÓN PARA INVERNADEROS AGRÍCOLAS UBICADOS EN CONDICIONES EXTREMAS EN LA XII REGIÓN DE CHILE"

ANGULO ESPINOZA, JUAN MANUEL

---

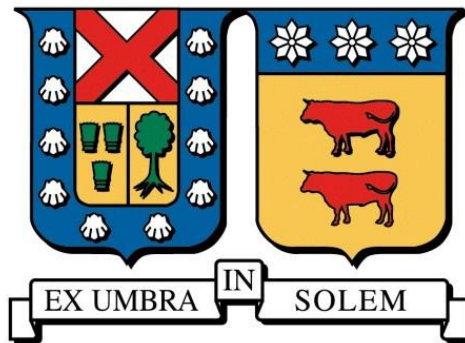
<http://hdl.handle.net/11673/13980>

*Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA*

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO - CHILE



“EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE UN  
SISTEMA EÓLICO DE ENERGIZACIÓN PARA  
INVERNADEROS AGRÍCOLAS EN CONDICIONES  
EXTREMAS EN LA XII REGIÓN DE CHILE”

JUAN MANUEL ANGULO ESPINOZA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR.-ING. ALEX FLORES MARADIAGA  
PROFESOR CORREFERENTE: MG.-ING. JAIME ESPINOZA SILVA

MAYO 2017

*Con amor a mis padres Juan y Maureen,  
a mi hijo Ian  
y a Silvana.*

*El Todo es mente, el universo es mental.*

*El Kybalión.*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer profundamente toda la ayuda y la excelente disposición del profesor Alex Flores, quien se interesó desde el primer minuto en mi trabajo de titulación y, además, tuvo extrema paciencia y comprensión ante las situaciones personales que dilataron este proceso, por lo que valoro mucho su actitud siempre humana. Agradezco también, al profesor Jaime Espinoza, por su colaboración en la finalización de este trabajo y por sus clases a las que tuve la oportunidad de asistir.

Además, agradezco a las personas que contacte y que me acerque con el fin de recibir información, y que me atendieron de muy buena gana: Cristina Rojas, Humberto Vidal, Julio Yagello, Nicolás Butorovic y a mi amigo Bob.

Agradezco de forma muy especial a: Silvana Levicán, por su infinito amor, por darme un hijo maravilloso y por su tremendo aguante en este proceso; a mis padres, por su amor, cariño y su incansable dedicación y esfuerzo por darnos lo mejor a mí y a mi hermana Maureen, y por supuesto, doy las gracias por haberme dado la oportunidad de vivir esta experiencia universitaria; a Silvana Santana y Juan Levicán, que se han portado excelente conmigo desde que los conocí, y en este proceso no ha sido la excepción.

Por último, doy gracias a todos aquellos seres humanos que conocí en la universidad y que compartimos la buena vibra, buenos momentos, y que ellos saben muy bien que los estimo mucho.

## RESUMEN

Este trabajo tuvo como fin evaluar y analizar las necesidades energéticas asociadas a la calefacción de un invernadero con un cultivo de tomate en su interior, ubicado en la Región de Magallanes. Con los resultados obtenidos se ha generado información que resulta útil en la búsqueda de medidas de eficiencia energética para el diseño y manejo de estas estructuras en la zona, permitiendo el estudio de distintas alternativas de calefacción.

El invernadero considerado es de tipo simétrico y unimodular, con un ángulo de inclinación del techo de  $26,5^\circ$ , cubierta de policarbonato alveolar de 4 mm, estructura de Metalcon, y cuyas dimensiones son 40 m de largo, 6 m de ancho y 3,9 m de alto a nivel de cumbre. El cálculo de la demanda energética en calefacción, se obtuvo resolviendo un modelo de balance de energía estacionario, para cada hora de un día característico de cada mes del año en la ciudad de Punta Arenas. Las condiciones climatológicas (variables de entrada para resolver el balance), consideradas constantes para cada hora, fueron: radiación solar global horizontal, temperatura y humedad relativa del aire, nubosidad y velocidad del viento. El cultivo interior se considera que tiene un desarrollo foliar máximo durante todo el año.

En primer lugar, la demanda energética calculada bajo las condiciones descritas, indican una demanda de **7813 MJ/m<sup>2</sup>** al año, que para la superficie total del invernadero fue de **1.875 GJ**. Las pérdidas por convección entre el aire exterior y la cubierta, son un 21,6% de las pérdidas totales, las pérdidas por radiación infrarroja entre la cubierta y el cielo un 12,4%, por evapotranspiración un 7,5%, por conducción a través del suelo un 24,0% y por ventilación o infiltración de aire un 34,6%.

Posteriormente, se hicieron comparaciones para la demanda energética bajo ciertos cambios en las condiciones iniciales, estudiando así la variación obtenida. Primero, se estimó la energía necesaria para calefaccionar el suelo a las temperaturas recomendadas:  $14\text{ }^\circ\text{C}$  de noche y  $16\text{ }^\circ\text{C}$  de día, lo que supone un aumento de 6,5% respecto a la demanda total obtenida bajo condiciones estándar. Otra comparación, fue suponer noches despejadas en todos los días del año, lo que incrementa en un

3,2% el valor anual de la demanda inicial, debido a las pérdidas por radiación infrarroja. La tercera comparación se hizo modificando la geometría del invernadero por una de tipo asimétrica, que maximiza la transmisividad a la radiación solar, disminuyendo la demanda anual en un 3,2%, valor que puede alcanzar incluso un 8,4% durante enero, debido a la mayor radiación solar en verano.

La cuarta comparación se hizo calculando la tasa de renovaciones de aire para una configuración determinada de ventanas cenitales y laterales. Esto incrementó la demanda en un 26,6% y las pérdidas por ventilación fueron un 45,8% del total, lo que indica que este es un punto crítico en las pérdidas de energía. Por último, se estimó que una mejora de la hermeticidad del invernadero puede disminuir la demanda en un 7,0%, lo que significa una mejora relevante. Con estos resultados se determina que la ventilación y las pérdidas por infiltración tienen una influencia considerable en las pérdidas de calor, por lo que se sugiere estudiar métodos de control en las renovaciones de aire en los invernaderos de la XII Región, para hacerla de la manera más eficiente posible.

Por último, se calculó la potencia necesaria en calefacción al combinar las condiciones climáticas de temperatura, viento y nubosidad, más desfavorables o extremas. La máxima potencia requerida fue de  $352,5 \text{ W/m}^2$  (84,61 kW para la superficie total del invernadero). Al evaluar el invernadero bajo las condiciones más altas de temperatura, se determina que la ventilación natural es suficiente para no superar la máxima biológica del cultivo.

## ABSTRACT

The present work was aimed to analyze and evaluate the different energetic demand associated to the heating of a greenhouse with a tomato crop in it, located in the Magallanes region. The obtained results provides useful information for the search of energetic efficiency measures for the design and handling of this type of structures in the area, allowing the study of different heating alternatives.

The considered greenhouse is an unimodular and symmetric type, with an inclination roof angle of  $26,5^{\circ}$ , a 4mm alveolar polycarbonate cover, a Metalcon structure with overall dimensions of 40m large, 6m wide, and 3,9m high. The energy demand calculates in heating, was obtained solving a stationary energy balance model for each hour of a specific day per month in the city of Punta Arenas. The climate conditions (input variables to solve the balance model) considered as constants for each hour, were: horizontal global solar radiation, temperature and relative air humidity, cloudiness and wind speed. The Indoor cultivation is considered to have a maximum leaf development throughout the year.

First, the energy demand was calculated under the above described conditions, denominated “standard conditions”, obtaining a demand of  $7813 \text{ MJ/m}^2$  per year, which for the total surface of the greenhouse was 1.875 GJ. Convective losses between the external air and the cover were 21,6% of the total losses, the losses by infrared radiation between the cover and the ceiling were 12,4%, by evapotranspiration were 7,5%, by ground conduction were 24,0% and by ventilation or air infiltration were 34,6%.

Second, comparisons were made for energy demand under certain changes in the initial conditions in order to study the variation obtained. First, estimating the energy needed to heat the soil to the recommended temperatures:  $14^{\circ}\text{C}$  at night and  $16^{\circ}\text{C}$  during the day, which means an increase of 6,5% regarding the total demand obtained under the standard conditions. Another comparison was to assume clear nights every night of the year, which increases the annual value of the energy demand by 3,2%, due to the losses by infrared radiation.

Third, another comparison was made by the greenhouse geometry modification, from a symmetric type to an asymmetric one, which maximizes the transmissivity to the solar radiation, decreasing the annual energy demand by 3,2%, value that could go as high as 8,4% during January due to a highest solar radiation in summer.

The fourth comparison was made by calculating the rate of air renewals for a given configuration of zenith and side windows. This increased energy demand by 26,6% and ventilation losses were 45,8% of the total, indicating that this is a critical point regarding energy losses. Then, it was estimated that an improvement of the greenhouse air tightness can reduce the energy demand by 7,0%, which means a relevant improvement. With these results, it is determined that ventilation and infiltration losses have a considerable influence on heat losses, so it is suggested to study control methods in air renewals in the greenhouses of Region XII, in order to the process more efficiently.

Finally, the required power in heating was calculated by combining the most unfavorable or extreme climatic conditions of temperature, wind and cloudiness. The maximum required power was  $352,5 \text{ W/ m}^2$  (84,6 kW for the total greenhouse area). When evaluating the greenhouse under the highest temperature conditions, it is determined that the natural ventilation is sufficient to not exceed the biological maximum of the crop.

## ABREVIATURAS

|        |                                                     |
|--------|-----------------------------------------------------|
| AFC:   | Agricultura Familiar Campesina                      |
| CERE:  | Centro de Estudio de los Recursos Energéticos       |
| CFD:   | Computational Fluid Dynamics                        |
| GDGCM: | Gembloux Dynamic Greenhouse Climatic Model          |
| INDAP: | Instituto de Desarrollo Agropecuario                |
| INE:   | Instituto Nacional de Estadísticas                  |
| INIA:  | Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias |
| PAR:   | Photosynthetic Active Radiation                     |

## CONSTANTES FÍSICAS

|                                        |                                                         |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Constante universal de los gases       | $R_a: 0,2869 \text{ kJ/kg} \cdot K$                     |
| Constante de Stefan-Boltzmann          | $\sigma: 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot K^4$ |
| Calor de vaporización del agua a 1 atm | $h_{fg}: 2257,1 \text{ kJ/kg}$                          |

## NOMENCLATURA

|               |                                                                                                |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$      | : Absortividad [-]                                                                             |
| $\delta$      | : Espesor [m]                                                                                  |
| $\varepsilon$ | : Emisividad [-]                                                                               |
| $\rho$        | : Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]                                                                |
| $\tau$        | : Transmisividad [-]                                                                           |
| $G$           | : Radiación solar directa [W/m <sup>2</sup> ]                                                  |
| $G_s$         | : Irradiancia total o constante solar [W/m <sup>2</sup> ]                                      |
| $G_{solar}$   | : Energía solar total sobre una superficie horizontal [W/m <sup>2</sup> ]                      |
| $HR$          | : Humedad Relativa (-)                                                                         |
| $R$           | : Tasa de renovaciones por hora [h <sup>-1</sup> ]                                             |
| $\dot{m}$     | : Razón de transferencia de masa [kg/s]                                                        |
| $\dot{E}$     | : Razón de transferencia de energía [W]                                                        |
| $m$           | : Masa [kg]                                                                                    |
| $E$           | : Energía [J]                                                                                  |
| $A$           | : Superficie [m <sup>2</sup> ]                                                                 |
| $T$           | : Temperatura [°K, °C]                                                                         |
| $e$           | : Presión de vapor [kPa]                                                                       |
| $ET$          | : Evapotranspiración [W]                                                                       |
| $DVP$         | : Déficit de presión de vapor [kPa]                                                            |
| $V$           | : Volumen [m <sup>3</sup> ]                                                                    |
| $C_p$         | : Calor específico a presión constante [kJ/kg°K]                                               |
| $LAI$         | : Leaf área index [-]                                                                          |
| $p_z$         | : Fracción de la superficie total cubierta por el elemento z [m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ] |
| $q$           | : Flujo de calor [W/m <sup>2</sup> ]                                                           |
| $Q$           | : Razón de transferencia de calor [W]                                                          |
| $\dot{V}$     | : Flujo volumétrico [m <sup>3</sup> /s]                                                        |
| $w$           | : Humedad especifica [kg/kg]                                                                   |

### **Subíndices**

|              |                      |
|--------------|----------------------|
| <i>a</i>     | : Aire               |
| <i>c</i>     | : Cubierta           |
| <i>calef</i> | : Calefacción        |
| <i>dif</i>   | : Difusa             |
| <i>e</i>     | : Aire exterior      |
| <i>ent</i>   | : Entrada            |
| <i>ET</i>    | : Evapotranspiración |
| <i>h</i>     | : Hoja               |
| <i>i</i>     | : Aire interior      |
| <i>int</i>   | : Interior           |
| <i>s</i>     | : Suelo              |
| <i>S</i>     | : Solar              |
| <i>sal</i>   | : Salida             |
| <i>ss</i>    | : Subsuelo           |
| <i>v</i>     | : Vegetación         |
| <i>vc</i>    | : Volumen de control |

### **Superíndices**

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| <i>cond</i> | : Conducción      |
| <i>conv</i> | : Convección      |
| <i>IR</i>   | : Infrarroja      |
| <i>lat</i>  | : Latente         |
| <i>ren</i>  | : Renovación aire |

# ÍNDICE

|                                                         |      |
|---------------------------------------------------------|------|
| AGRADECIMIENTOS .....                                   | ii   |
| RESUMEN.....                                            | iii  |
| ABSTRACT.....                                           | v    |
| ABREVIATURAS .....                                      | vii  |
| CONSTANTES FÍSICAS.....                                 | vii  |
| NOMENCLATURA .....                                      | viii |
| ÍNDICE .....                                            | x    |
| 1 INTRODUCCIÓN .....                                    | 1    |
| 1.1 OBJETIVOS.....                                      | 2    |
| 1.1.1 OBJETIVO GENERAL .....                            | 2    |
| 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                        | 2    |
| 1.2 ALCANCES.....                                       | 3    |
| 2 ESTADO DEL ARTE .....                                 | 4    |
| 2.1 INVERNADEROS .....                                  | 4    |
| 2.1.1 HISTORIA .....                                    | 5    |
| 2.1.2 DESARROLLO TECNOLÓGICO ACTUAL.....                | 6    |
| 2.1.3 USO DE INVERNADEROS EN CHILE .....                | 9    |
| 2.2 Agricultura en la XII región .....                  | 11   |
| 2.2.1 Cultivo de tomate .....                           | 12   |
| 2.2.2 Actores e iniciativas en el sector agrícola ..... | 13   |
| 2.2.3 Invernaderos en la Región de Magallanes .....     | 14   |
| 3 FISIOLOGÍA DE LOS CULTIVOS .....                      | 18   |

|       |                                                 |    |
|-------|-------------------------------------------------|----|
| 3.1   | ÓRGANOS DE UNA PLANTA Y SUS FUNCIONES .....     | 18 |
| 3.2   | DESARROLLO, CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO.....      | 18 |
| 3.3   | FUNCIONES FISIOLÓGICAS Y CRECIMIENTO .....      | 18 |
| 3.3.1 | ABSORCIÓN DE AGUA.....                          | 19 |
| 3.3.2 | TRANSPIRACIÓN.....                              | 19 |
| 3.3.3 | FOTOSÍNTESIS .....                              | 19 |
| 3.3.4 | RESPIRACIÓN .....                               | 20 |
| 3.4   | FASES DEL DESARROLLO.....                       | 21 |
| 4     | COMPORTAMIENTO FÍSICO DE LOS INVERNADEROS ..... | 22 |
| 4.1   | PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....                | 22 |
| 4.2   | CONDICIONES CLIMÁTICAS .....                    | 23 |
| 4.2.1 | RADIACIÓN SOLAR .....                           | 23 |
| 4.2.2 | TEMPERATURA .....                               | 27 |
| 4.2.3 | EL VIENTO.....                                  | 27 |
| 4.2.4 | COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA .....               | 27 |
| 4.2.5 | PRECIPITACIONES .....                           | 28 |
| 4.2.6 | OTROS FACTORES .....                            | 29 |
| 4.3   | MICROCLIMA DE UN INVERNADERO .....              | 29 |
| 4.3.1 | CONDICIONES GENERALES INTERNAS.....             | 29 |
| 4.3.2 | CLIMA ESPONTÁNEO EN UN INVERNADERO.....         | 31 |
| 4.3.3 | TRANSMISIVIDAD A LA RADIACIÓN.....              | 32 |
| 5     | SELECCIÓN DE CULTIVO: EL TOMATE .....           | 34 |
| 5.1   | CARACTERÍSTICAS GENERALES .....                 | 34 |

|       |                                                  |    |
|-------|--------------------------------------------------|----|
| 5.2   | FENOLOGÍA .....                                  | 35 |
| 5.3   | TEMPERATURA .....                                | 35 |
| 5.4   | HUMEDAD.....                                     | 36 |
| 5.5   | SUELO .....                                      | 37 |
| 5.6   | MANEJO.....                                      | 37 |
| 5.6.1 | ÉPOCAS DE PLANTACIÓN Y DENSIDAD DE PLANTAS ..... | 37 |
| 5.6.2 | CONDUCCIÓN Y PODA DE LAS PLANTAS .....           | 38 |
| 5.7   | RENDIMIENTO .....                                | 38 |
| 6     | SELECCIÓN DE INVERNADERO .....                   | 39 |
| 6.1   | CRITERIOS .....                                  | 39 |
| 6.2   | ESPECIFICACIONES .....                           | 40 |
| 6.2.1 | MATERIAL DE CUBIERTA.....                        | 40 |
| 6.2.2 | DIMENSIONES.....                                 | 41 |
| 7     | BALANCE ENERGÉTICO EN INVERNADEROS .....         | 42 |
| 7.1   | INTERCAMBIOS DE ENERGÍA Y MASA.....              | 42 |
| 7.2   | MODELO GDGCM .....                               | 42 |
| 7.3   | MODELO ESTACIONARIO .....                        | 44 |
| 7.4   | DATOS METEOROLÓGICOS .....                       | 45 |
| 7.4.1 | Temperatura exterior ( $T_e$ ).....              | 45 |
| 7.4.2 | Humedad relativa exterior ( $HR_e$ ).....        | 46 |
| 7.4.3 | Radiación solar global ( $R_S$ ) .....           | 47 |
| 7.4.4 | Viento exterior ( $U_e$ ).....                   | 48 |
| 7.4.5 | Nubosidad ( $C$ ) .....                          | 49 |

|       |                                                                                                               |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.5   | RESOLUCIÓN DEL MODELO ESTACIONARIO .....                                                                      | 50 |
| 7.5.1 | Flujos de radiación solar .....                                                                               | 50 |
| 7.5.2 | Flujos de transferencia de calor por convección .....                                                         | 56 |
| 7.5.3 | Transferencia de calor por radiación infrarroja.....                                                          | 57 |
| 7.5.4 | Calor latente consumido por evapotranspiración .....                                                          | 60 |
| 7.5.5 | Flujos de calor sensible y latente por ventilación .....                                                      | 61 |
| 7.5.6 | Flujo de calor por conducción a través del suelo .....                                                        | 63 |
| 7.6   | Estimación de la demanda energética.....                                                                      | 64 |
| 7.7   | Principales parámetros .....                                                                                  | 65 |
| 8     | RESULTADOS .....                                                                                              | 67 |
| 8.1   | Demanda energética en calefacción bajo condiciones estándar .....                                             | 67 |
| 8.2   | Demanda energética en calefacción para suelo calefaccionado .....                                             | 69 |
| 8.3   | Demanda energética en calefacción bajo condiciones de cielo despejado en las noches .....                     | 72 |
| 8.4   | Demanda energética en calefacción considerando geometría asimétrica como medida de eficiencia energética..... | 74 |
| 8.5   | Demanda energética mensual considerando ventilación lateral y cenital ....                                    | 77 |
| 8.6   | Demanda energética mensual considerando mejora en la hermeticidad .....                                       | 81 |
| 8.7   | Cálculo de la potencia necesaria para calefacción .....                                                       | 83 |
| 9     | CONCLUSIONES .....                                                                                            | 85 |
| 10    | REFERENCIAS.....                                                                                              | 87 |
|       | ANEXO A.....                                                                                                  | 93 |

# 1 INTRODUCCIÓN

El año 2013 se dio inicio al proyecto “Eficiencia Energética en invernaderos”, desarrollado en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena. Ejecutado por el Centro de Estudio de los Recursos Energéticos (CERE) y el Centro Hortícola de la Universidad de Magallanes, el proyecto tuvo como objetivo principal, potenciar la actividad hortícola de la zona a través del estudio del comportamiento higrotérmico (humedad y temperatura) en invernaderos.

Esta iniciativa responde al interés que existe por obtener cultivos fuera de temporada, los cuales debido a factores propios de la Zona Austral (bajas temperaturas, viento intenso y escasas horas de luz en invierno), poseen una alta estacionalidad, lo que genera ciertos problemas no menores. Uno de ellos es que gran parte de los productos hortícolas que se consumen en la región, provienen de regiones ubicadas al norte, lo que eleva los precios que pagan los consumidores debido a los costos adicionales en transporte.

También podemos mencionar, que con el fin de obtener ciertos cultivos en la región, se construyen invernaderos los cuales muchas veces están calefaccionados artificialmente, por ejemplo a través de calderas que funcionan con gas natural. Esto significa por supuesto, una inversión en la construcción del invernadero y gastos de operación debido al consumo de combustible, lo que también eleva el precio final de los productos.

En ambas situaciones expuestas se debe considerar que, además de las implicancias económicas mencionadas existe un impacto ambiental importante, ya que el consumo de combustibles fósiles emite dióxido de carbono, uno de los principales gases que genera el efecto invernadero, responsable del calentamiento global. En respuesta al interés mundial por reducir el calentamiento global, Chile formó parte del Protocolo de Kioto, cuyo objetivo es reducir la emisión de gases de efecto invernadero, hecho que debe tenerse en cuenta al momento de buscar soluciones para satisfacer las demandas energéticas en los distintos sectores productivos, entre ellos el agrícola.

En respuesta a los antecedentes mencionados, y considerando los desafíos que implica satisfacer de forma rentable y limpia las necesidades de calefacción en construcciones ubicadas en climas fríos, surge la idea de realizar una evaluación del comportamiento térmico de un invernadero calefaccionado, permitiendo analizar y proponer mejoras en el uso de estas estructuras. Este trabajo pretende ser un aporte para el desarrollo agrícola de la Región de Magallanes, constituyendo una base para futuras investigaciones relacionadas con el tema.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO GENERAL**

“Estimar y analizar la demanda energética en calefacción para un invernadero en particular, ubicado teóricamente en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena y diseñado para cultivo de tomates”.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Seleccionar un cultivo hortícola que sea producido bajo invernadero.
2. Seleccionar y/o diseñar un invernadero apropiado según las necesidades del cultivo y las condiciones climáticas.
3. Seleccionar y/o diseñar un modelo físico que permita calcular la demanda energética en calefacción de un invernadero.
4. Estimar la demanda energética en calefacción del invernadero determinado, a lo largo de un año típico en la Región de Magallanes.
5. Analizar los principales parámetros constructivos y factores climatológicos que influyen en la demanda energética calculada.
6. Determinar las principales pérdidas de calor, en particular aquellas asociadas al viento exterior.
7. Proponer y evaluar características técnicas de una o más mejoras a la eficiencia térmica en los invernaderos adecuados para la región

## 1.2 ALCANCES

Dos hechos relacionados con los invernaderos se deben tener en consideración para comprender los alcances de este trabajo. El primero consiste en que el estudio, desarrollo y evolución de los invernaderos y sus tecnologías asociadas, son el fruto de un continuo trabajo realizado por la combinación de distintas ciencias o ramas de estas, tales como la biología, termodinámica, transferencia de calor, mecánica de estructuras, entre otras; por ende, este progreso científico ha sido de carácter multidisciplinario.

Lo anterior se debe a que en los invernaderos existe una interacción constante entre sistemas biológicos y físicos, y por lo tanto, analizar estas estructuras implica indagar en algunas áreas científicas que probablemente no son la especialidad de un solo investigador. Esta situación se refleja en el presente trabajo, el cual pretende afrontar problemáticas propias de los invernaderos desde la visión de la Ingeniería Mecánica, y por ende, a lo largo de los siguientes capítulos se da énfasis a aquellos temas que a esta materia le compete. Sin embargo, también se explican otros temas (principalmente relacionados con la biología), debido a la necesidad de tener un conocimiento mínimo sobre estos, pero profundizándolos solo en la justa medida.

El segundo hecho consiste en que temas como la ventilación, el material de cubierta, los materiales constructivos, calefacción, iluminación, aporte de CO<sub>2</sub>, etc., pueden alcanzar una alta complejidad y, por lo tanto, el estudio uno solo de estos puntos puede abarcar gran cantidad de tiempo e información.

Ante estos hechos resulta inevitable que el presente trabajo trate muy superficialmente algunos de los temas mencionados, aún cuando la mayoría requiere cierto conocimiento para cumplir los objetivos planteados. Por ejemplo, al seleccionar el invernadero a estudiar, su geometría podría no ser la más eficiente según las características de la zona; sin embargo, si se justifica su elección de forma razonable, entonces se da por satisfecho este punto, ya que profundizar sobre este aspecto escapa de la finalidad que tiene este trabajo.

## 2 ESTADO DEL ARTE

A continuación se da a conocer el contexto en el que se enmarca este trabajo, para lo cual se describe en forma breve, una reseña histórica y funcional acerca de los invernaderos y su desarrollo en Chile. También, se detalla la situación actual de la producción agrícola de la Región de Magallanes, identificando los actores (principalmente públicos) que forman parte del sector y los invernaderos típicamente utilizados.

### 2.1 INVERNADEROS

En un artículo de la Revista de la Hortifloricultura Italiana de 1962 se presenta la siguiente definición de un invernadero:

*Un invernadero es una construcción de madera o de hierro u otro material, cubierta por cristales, provista por lo general de calefacción, que, a veces, está iluminada artificialmente y en donde se pueden cultivar hortalizas tempranas, flores y plantas verdes, en épocas en las que la temperatura y la luz del lugar en donde se está cultivando serían insuficientes para su crecimiento y fructificación.*<sup>1</sup>

Esta definición, a pesar de que podría considerarse antigua, resulta muy completa, ya que resume aspectos constructivos, funcionales y otros de especial relevancia en la caracterización de diferentes tipos de invernadero.

Una mejora de esta definición, según el desarrollo que han alcanzado los invernaderos hoy en día, implica precisar que actualmente las cubiertas no son necesariamente de vidrio\*, si no que existen diversos plásticos y otros materiales que se pueden utilizar con este fin y cuyo uso es masivo debido a que poseen diversas ventajas, principalmente económicas.

---

\* Si bien la definición habla de “cristales”, en realidad se refiere al “vidrio” (material que si es usado como cubierta de invernaderos). Esto se debe a que en algunas partes del mundo, como España, se utiliza frecuentemente el término “cristal” como sinónimo de vidrio. En el ámbito científico, esto es incorrecto debido a que el vidrio es un sólido amorfo y no un sólido cristalino.

En definitiva, un invernadero es un medio de protección de los cultivos principalmente contra las condiciones climáticas, aunque también contra plagas, predadores u otros factores, y que es capaz de permitir producciones anticipadas o totalmente fuera de temporada (semiforzado y forzado de cultivos), mejoras de calidad y optimización de recursos.

### **2.1.1 HISTORIA**

La necesidad y el interés por obtener cultivos fuera de temporada, y el consecuente uso de técnicas para lograrlo, se remontan a miles de años atrás, existiendo documentación sobre intentos de cultivos protegidos que datan del siglo I, en la época del imperio romano. Sin embargo, los primeros pasos hacia los invernaderos, se dieron con la construcción y el uso de camas móviles con plantas. En el siglo XV, en el norte de Italia y en el sur de Alemania llegaron a ser muy comunes el uso de cabañas para la protección de cultivos en invierno.<sup>2</sup>

Luego, en el siglo XVI las casas reales europeas empezaron a cultivar cítricos en sus jardines. Las naranjas y otros cítricos estaban de moda, pero la importación de estos resultaba complicada y cara, por lo que estas frutas estaban reservadas a los aristócratas. En sus jardines era frecuente ver naranjos y estos cultivos se conocían como “Orangeries”.

En el siglo XVII, gracias a los avances de la tecnología en el manejo del vidrio, se construyeron grandes superficies de este material para proteger los cítricos de las inclemencias del tiempo y las bajas temperaturas en invierno. Estas construcciones con grandes ventanales que permitían la entrada de luz hacia las plantas, y que en invierno a veces se calentaban con estufas, también se denominaban “Orangeries”, y son una de las primeras formas de invernadero de los que se tiene registro, aunque para la aristocracia de la época representaban mucho más que eso, ya que eran un símbolo de distinción y poder entre sus dueños.<sup>3</sup>



**Fig. 2.1. Orangerie en el Palacio de Schonbrunn, Viena.**

Durante el siglo XIX aparecen los primeros invernaderos de vidrio con cubierta a dos aguas, y luego, el cultivo de uvas, melones, duraznos y fresas se generaliza; a finales de ese siglo se introducen los tomates. Pronto se expandieron los invernaderos desde Europa a América y Asia.

Un hecho clave en la evolución de los invernaderos, fue la aparición de los plásticos. El primer invernadero de plástico se construyó en 1948 y consistía en una simple estructura de madera recubierta de celofán. De ahí en adelante se comenzaron a utilizar nuevos materiales de cubierta, como el polietileno y el policarbonato, los cuales permitieron la producción a bajo coste de hortalizas fuera de estación, y en consecuencia se generó una expansión enorme de la superficie de invernaderos en el Oriente (Japón y China principalmente) y en los países mediterráneos (España e Italia a la cabeza en superficie).

### **2.1.2 DESARROLLO TECNOLÓGICO ACTUAL**

En la actualidad es posible distinguir una serie de tecnologías que buscan mejorar la calidad de los cultivos bajo invernadero, aumentar la eficiencia energética, la productividad, entre otros objetivos. A continuación se hace una revisión de

algunas de estas tecnologías asociadas a ciertos aspectos que serán relevantes en el desarrollo de este trabajo.

**Geometría:** existe una gran cantidad de tipos de invernadero según su estructura geométrica (unimodulares o multimodulares, de cubiertas curvas o rectas, etc). Gran parte de estas estructuras han sido estudiadas en detalle gracias a los avances tecnológicos, evaluando la resistencia de sus elementos ante ciertas cargas o su eficiencia en la captación de la energía solar.

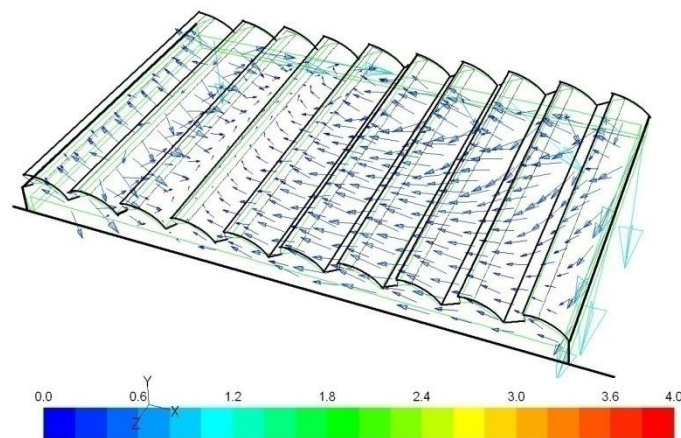
Estos estudios han facilitado la comprensión del comportamiento de las variables físicas asociadas a cada modelo, ampliando así la información relativa a estas estructuras, lo que permite al productor agrícola escoger aquella que le resulte más adecuada según las condiciones climáticas, las necesidades del cultivo y su capacidad económica.

**Cubierta:** los materiales de cubierta típicamente utilizados en invernaderos, se pueden agrupar de la siguiente forma<sup>4</sup>:

- **Materiales rígidos:** vidrio, policarbonato ondulado, policarbonato alveolar, poliéster, PVC.
- **Flexibles:** polietileno normal, polietileno larga duración, polietileno térmico, EVA, tricapa, PVC, PVC reforzado.

Según su grosor, cada uno de estos materiales tiene determinada resistencia, vida útil, costo y cualidades térmicas. Actualmente se busca mejorar las propiedades térmicas, alargar la vida útil (existen diversos aditivos para ambos fines) y reducir el impacto ambiental de su uso a través de materiales biodegradables o reciclables.

**Ventilación:** herramientas de simulación tipo CFD han permitido estudiar el comportamiento de los flujos de aire al interior del invernadero. De esta forma se ha mejorado el control de la ventilación, por ejemplo, a través de la automatización de elementos para así satisfacer la renovación de aire requerida por el cultivo, evitando a la vez el exceso de pérdidas en forma de calor.



**Fig. 2.2. Uso de CFD para visualizar vectores de velocidad al interior de invernaderos.**

**Iluminación:** con el fin de satisfacer las necesidades lumínicas de los cultivos, se utilizan distintos tipos de lámparas como: de sodio, incandescentes y fluorescentes. Aquellas que han adquirido gran popularidad últimamente son las lámparas LED, debido a su alta eficiencia y al hecho que no producen calor, lo que permite ubicarlas más cerca de las plantas sin quemarlas.



**Fig. 2.3. Cultivo en invernadero iluminado mediante lámparas LED.**

**Calefacción:** tradicionalmente los combustibles fósiles han sido la fuente de calefacción de los invernaderos. Como ya se ha mencionado, esto constituye una fuente de emisión de  $\text{CO}_2$ , cuyo interés a nivel mundial por reducirlo, ha motivado el uso de otras fuentes de energía alternativas entre las que se mencionan:

- Energía solar para el precalentamiento del agua de calefacción
- Energía geotérmica de aguas termales
- Energía geotérmica del gradiente geotérmico
- Biogás
- Calderas de biomasa
- Energía residual de procesos industriales

### 2.1.3 USO DE INVERNADEROS EN CHILE

El último Censo Nacional Agropecuario y Forestal realizado en Chile el año 2007, es la principal herramienta que aporta información sobre las superficies de cultivos bajo invernadero y sus diferentes usos. La Tabla 2.1 detalla la superficie cultivada con hortalizas en Chile, según sistema de cultivo y región<sup>5</sup>.

**TABLA 2.1**  
**Superficie cultivada con hortalizas según región y sistema de cultivo.**  
(Fuente: elaboración propia en base a los resultados del VII Censo Agropecuario y Forestal; INE, 2007)

| Región                                 | Total<br>[ha] | Al aire libre<br>[ha] | Invernadero<br>[ha] | Invernadero<br>[%] |
|----------------------------------------|---------------|-----------------------|---------------------|--------------------|
| I de Tarapacá                          | 582,84        | 582,30                | 0,54                | 0,09               |
| II de Antofagasta                      | 349,70        | 349,03                | 0,67                | 0,19               |
| III de Atacama                         | 1.651,95      | 1.580,00              | 71,95               | 4,36               |
| IV de Coquimbo                         | 11.400,85     | 11.294,99             | 105,86              | 0,93               |
| V de Valparaíso                        | 10.191,28     | 9.308,81              | 882,47              | 8,66               |
| VI de O'Higgins                        | 13.083,31     | 12.973,48             | 109,82              | 0,84               |
| VII del Maule                          | 11.707,76     | 11.511,72             | 196,02              | 1,67               |
| VIII del Bío-Bío                       | 9.378,36      | 9.351,76              | 26,48               | 0,28               |
| IX de La<br>Araucanía                  | 4.526,29      | 4.488,98              | 37,15               | 0,82               |
| X de Los Lagos                         | 2.274,03      | 2.256,66              | 17,32               | 0,76               |
| XI Aysen                               | 155,44        | 140,02                | 15,41               | 9,91               |
| XII de Magallanes<br>y Antártica       | 83,99         | 64,72                 | 19,26               | 22,93              |
| Región<br>Metropolitana de<br>Santiago | 25.347,98     | 25.291,31             | 56,66               | 0,22               |

|                                 |                  |                  |                 |             |
|---------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------|
| <b>XIV de Los Ríos</b>          | 1.727,53         | 1.717,67         | 9,80            | 0,57        |
| <b>XV de Arica y Parinacota</b> | 3.091,65         | 3.068,17         | 23,48           | 0,76        |
| <b>TOTAL PAÍS</b>               | <b>95.552,96</b> | <b>93.979,62</b> | <b>1.572,89</b> | <b>1,65</b> |

\*Los porcentajes corresponden a la superficie de cultivos bajo invernadero respecto a la superficie total de cultivos en cada región.

Como se verá más adelante, el cultivo de tomate tiene especial relevancia en este trabajo y por lo tanto, a continuación se detallan las superficies de tomate cultivadas bajo invernadero. Se aclara que estos datos corresponden a *tomate de consumo fresco*, ya que en los resultados del Censo, la producción de *tomate industrial\** no está considerada en el grupo de hortalizas, sino como parte de los “cultivos industriales”.

**TABLA 2.2**  
**Superficie cultivada con tomates de consumo fresco, según región y sistema de cultivo.**

(Fuente: elaboración propia en base a los resultados del VII Censo Agropecuario y Forestal; INE, 2007)

| <b>Región</b>             | <b>Total<br/>[ha]</b> | <b>Al aire libre<br/>[ha]</b> | <b>Invernadero<br/>[ha]</b> | <b>Invernadero<br/>[%]</b> |
|---------------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| <b>I de Tarapacá</b>      | -                     | -                             | -                           | -                          |
| <b>II de Antofagasta</b>  | 0,16                  | 0,03                          | 0,13                        | 81,25                      |
| <b>III de Atacama</b>     | 211,94                | 184,70                        | 27,24                       | 12,85                      |
| <b>IV de Coquimbo</b>     | 358,28                | 304,35                        | 53,93                       | 15,05                      |
| <b>V de Valparaíso</b>    | 1.179,44              | 482,55                        | 696,89                      | 59,09                      |
| <b>VI de O'Higgins</b>    | 1.061,69              | 976,01                        | 85,67                       | 8,07                       |
| <b>VII del Maule</b>      | 937,90                | 798,33                        | 139,57                      | 14,88                      |
| <b>VIII del Bío-Bío</b>   | 466,65                | 459,55                        | 7,08                        | 1,52                       |
| <b>IX de La Araucanía</b> | 166,60                | 159,41                        | 7,16                        | 4,30                       |
| <b>X de Los Lagos</b>     | 1,44                  | 0,00                          | 1,44                        | 100,00                     |
| <b>XI Aysen</b>           | 0,23                  | 0,00                          | 0,23                        | 100,00                     |

---

\* Tomate para uso industrial o simplemente “tomate industrial” es aquel que será procesado para usos como sopas, zumos, salsas, conservas y otros.

|                                         |                 |                 |                 |              |
|-----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|
| <b>XII de Magallanes y Antártica</b>    | 0,99            | 0,00            | 0,99            | 100,00       |
| <b>Región Metropolitana de Santiago</b> | 1.079,71        | 1.049,53        | 30,18           | 2,80         |
| <b>XIV de Los Ríos</b>                  | 3,77            | 2,40            | 1,37            | 36,34        |
| <b>XV de Arica y Parinacota</b>         | 840,13          | 840,13          | 0,00            | 0,00         |
| <b>TOTAL PAÍS</b>                       | <b>6.308,93</b> | <b>5.256,99</b> | <b>1.051,88</b> | <b>16,67</b> |

*\*Los porcentajes corresponden a la superficie de cultivos bajo invernadero con respecto a la superficie total del cultivo en la región.*

En base a las tablas anteriores, es posible mencionar los siguientes datos de interés:

- De la superficie total de cultivos hortícolas un **1,65%** se produce bajo invernaderos.
- De la superficie total de cultivos de tomate de consumo fresco bajo invernadero, la quinta región abarca un **66,25%**.
- De la superficie total de cultivos de tomates de consumo fresco, un **16,67%** se produce en invernaderos.
- De la superficie total de invernaderos destinados a cultivos hortícolas, un **67%** corresponden a cultivos de tomate de consumo fresco.

## 2.2 Agricultura en la XII región

De acuerdo a los registros oficiales del VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal del año 2007, que incorpora a todas las explotaciones agrícolas y pecuarias por sobre 0,1 hectáreas y las forestales mayores de 5 hectáreas, el universo total censado alcanza las 301.376 explotaciones.<sup>6</sup>

El principal uso del suelo de las explotaciones situadas en la Zona Austral, corresponde a ganadería ovina, ganadería bovina y actividad forestal en maderas nativas, es decir actividades forestales y pecuarias. La actividad agrícola no predomina como en otras zonas del país, ya que a pesar de que existe en general un

suelo bastante fértil, las condiciones extremas dificultan la producción de cultivos constantes a lo largo del año.

De las 36.439.533 ha que constituyen la superficie asociada a las explotaciones agropecuarias y forestales censadas, 2.123.942 ha corresponden a suelos cultivados, los cuales se subdividen a su vez como: cultivos anuales y permanentes, praderas sembradas permanentes y de rotación, y por último, suelos en barbecho y descanso.

En el caso de la Región de Magallanes, el suelo cultivado corresponde a 37.285 ha, de las cuales solo 700 ha son cultivos anuales y permanentes (menos de un 1,9% del total), 6.039 son praderas sembradas permanentes y de rotación y 30.546 son suelo de barbecho y descanso. Es decir que el suelo cultivado en la región es menos de un 1,8% del total nacional, lo que contrasta notoriamente con regiones como Bío Bío y La Araucanía, cuyas superficies de suelo cultivado son casi diez veces superior y además, están comprendidas en su mayorías por suelos con cultivos anuales y permanentes.

Del 3,73% que aportó al PIB nacional, la actividad silvoagropecuaria el año 2009, la Región de Magallanes aportó un 0,14%, por lo que considerando que sus principales actividades son del sector silvopecuario, se infiere que la actividad agrícola contribuye en un porcentaje ínfimo. Obviamente, las condiciones climáticas extremas, sumado a la distancia que separa a la región del resto de Chile, limitan un desarrollo potente de la actividad agrícola a nivel económico<sup>7</sup>.

### **2.2.1 Cultivo de tomate**

Según los resultados del Censo Agropecuario y Forestal 2007, un total de 95.552,96 ha es la superficie cultivada con hortalizas en el país, de la cual 6.308,93 ha corresponden a cultivos de tomate para consumo fresco. Sumando las 7.277,80 ha de tomate industrial, entonces **13.586,73 ha** es la superficie cultivada total de tomate.

En la Región de Magallanes, de las 83,99 ha de superficie destinadas a cultivos de hortalizas (menos de un 0,09% del total nacional) 0,99 ha corresponden a la superficie cultivada con tomate. La superficie se reparte entre 65 productores y

solo corresponde a tomate de consumo fresco y bajo invernaderos<sup>5</sup>. De la superficie total de cultivo de tomate de consumo fresco a nivel nacional, la Región de Magallanes aporta menos de un 0,016%.

Con estos antecedentes queda en evidencia la escasa producción de tomate que existe en la región, por lo que resulta atractivo evaluar una alternativa viable para su producción en mayor cantidad.

### **2.2.2 Actores e iniciativas en el sector agrícola**

El Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) y el Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP), ambos organismos dependientes del Ministerio de Agricultura, han hecho distintos aportes al desarrollo agrícola de la región. El año 2007 INDAP publicó un “Manual de Agricultura Orgánica para Pequeños productores agrícolas de la XII Región de Magallanes”<sup>8</sup>. Luego, el año 2010, INIA emitió en su boletín n°205 un manual práctico denominado “Cultivo de Hortalizas en Magallanes”<sup>9</sup>, con el fin de mejorar la poca asesoría técnica que poseen los productores, un problema identificado por este organismo.

Durante el año 2012 el Ministerio de Agricultura en Punta Arenas, licitó a un equipo consultor la realización de un proyecto denominado “Diseño y evaluación de invernaderos magallánicos”, todo esto en el marco del programa: “Incorporación de infraestructura básica a productores de la AFC para el establecimiento de las buenas prácticas agrícolas en sus predios”. El objetivo del proyecto consistió en que a partir de las tipologías de invernaderos más utilizadas por los productores de la AFC de Punta Arenas, se recomendaron mejoras en el diseño de invernaderos, tanto en su ámbito agronómico-funcional, como de resistencia a los riesgos climáticos propios de la Patagonia.<sup>10</sup>

Por último, como ya se mencionó en la introducción, entre el año 2013 y 2014 se realizó un proyecto denominado “Eficiencia energética en invernaderos, etapas I y II”. La iniciativa fue financiada por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética en su línea de I+D y la empresa regional Ruiz y Doberti Ltda. La iniciativa fue postulada y

desarrollada por el CERE y el Centro Hortícola de la Universidad de Magallanes, estudiando así el comportamiento higrotérmico en invernaderos con tres cubiertas diferentes (en esto consistía la primera etapa) y luego se estudiaron métodos de calefacción pasiva (segunda etapa). Todo lo anterior se realizó de forma experimental, arrojando resultados útiles para contribuir al alargue de temporadas de cultivo en la región.

### **2.2.3 Invernaderos en la Región de Magallanes**

Una de las razones más importantes para establecer los invernaderos en la Región de Magallanes fue proteger los cultivos de las bajas temperaturas y de los fuertes vientos propios de la Zona Austral. En su construcción se ha extendido el uso de plástico y madera, principalmente por razones socioeconómicas y por estar disponibles y accesibles en el mercado regional.

Uno de los problemas más serios de los invernaderos en Magallanes, es la poca durabilidad de la cubierta de plástico que se rompe por efecto del viento y la radiación solar. Además, cuando los vientos son muy fuertes (particularmente en verano) los invernaderos permanecen cerrados, lo que ocasiona un aumento considerable de la temperatura en su interior y en consecuencia aumenta la evapotranspiración de los cultivos. En las tardes, al bajar la temperatura se genera condensación, lo que produce un exceso de humedad. Esto último resulta perjudicial para el cultivo, ya que se desarrollan enfermedades como hongos, bacterias y daños fisiológicos.<sup>10</sup>

A continuación se describen brevemente algunos de los invernaderos más utilizados en la región.

#### **2.2.3.1 Invernadero de madera tipo Quillotano o lucarna**

Se comenzaron a construir en Puerto Natales alrededor de 1998 a través de una consultora que trajo el prototipo a la zona. Criterios de tipo económicos, fueron la base para iniciar su uso.



**Fig. 2.4. Interior de un invernadero Quillotano; en la parte superior es posible notar la lucarna.**

Es el invernadero más usado en la región. Se construye principalmente a base de maderas regionales como Lengua y Coigüe. Limitados de altura por el viento, sus tantos elementos estructurales generan un sombreamiento excesivo, quitando luminosidad al cultivo.

### **2.2.3.2 Invernadero de estructura metálica a dos aguas**

Diseñado con perfiles de acero liviano (tipo Metalcom), estos invernaderos comenzaron a construirse a partir del año 2010, como una alternativa de mayor vida útil de los invernaderos de madera.



**Fig. 2.5. Interior de un invernadero de estructura metálica a dos aguas.**

En cuanto a sus características de diseño, tiene un ancho de 6 m., una altura de hombro de 1,5 m y una altura de cumbrera de 2,5 m., presentando una resistencia a vientos de 150 km/hr y de 0,5 m de nieve.

### **2.2.3.3 Invernadero túnel de estructura metálica tipo Haygrove**

Es un sistema de túneles de bajo costo que logra cubrir grandes superficies, permitir el paso de tractores en su interior y soportar vientos que en sus versiones estándar pueden alcanzar los 70 km / h.

Los túneles Haygrove son una multi-estructura móvil, posible de montar en multiplicidad de terrenos. Con dimensiones de entre 6 m a 9 m de ancho y entre 3.5 m y 5.5 m de altura.



**Fig. 2.6. Interior de invernadero tipo Haygrove.**

Los primeros invernaderos tipo túnel se comenzaron a establecer en Magallanes alrededor del año 1996, como resultado de un convenio entre Mideplan y la Unión Europea orientado fortalecer el desarrollo productivo de los agricultores.

#### **2.2.3.4 Invernadero tipo túnel de bajo costo**

Construido en base a perfil tubular de acero galvanizado de ½”, se trata de una alternativa de producción de bajo costo, baja altura y reducido aprovechamiento. Está constituido por planchas de policarbonato de 4 mm a modo de envoltente.



**Fig. 2.7. Invernadero tipo túnel de bajo costo.**

### 3 FISIOLÓGÍA DE LOS CULTIVOS

Considerando que los invernaderos tienen como fin permitir el desarrollo de cultivos en su interior, se deben entender entonces, aquellos conceptos biológicos sobre estos últimos, que tienen especial relevancia en el diseño y manejo de estas estructuras.

#### 3.1 ÓRGANOS DE UNA PLANTA Y SUS FUNCIONES

Una planta generalmente está compuesta por hojas, tallo y raíz. Las hojas son responsables de captar la energía solar necesaria en el proceso de fotosíntesis, y a través de sus estomas se realiza el intercambio de gases y la transpiración.

La raíz, además de ser un anclaje de la planta al suelo o al sustrato, absorbe agua y elementos minerales, y también puede almacenar reservas de algún elemento. El tallo contiene los conductos a través de los cuales fluye la savia ascendente y descendente entre los diferentes órganos.

#### 3.2 DESARROLLO, CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO

Los fisiólogos distinguen dos aspectos de la actividad vegetal: el desarrollo y el crecimiento, ambos condicionados por los factores ambientales. El *desarrollo* es una noción cualitativa relativa a los cambios de estado: germinación, sucesión de hojas y entrenudos, floración, etc. El *crecimiento* es una noción cuantitativa, correspondiente a la variación de tamaño y peso de los diversos órganos formados.<sup>11</sup>

El *rendimiento* de un cultivo incluye no sólo los aspectos cuantitativos de la producción, sino que también los cualitativos. Estos últimos son más difíciles de medir, debido a la complejidad de valorar la calidad, cuya repercusión en los resultados económicos de la producción es muy importante en las hortalizas.

#### 3.3 FUNCIONES FISIOLÓGICAS Y CRECIMIENTO

Las principales funciones fisiológicas implicadas en el crecimiento de una planta son: *absorción de agua y elementos minerales por las raíces, transpiración de vapor de agua por las hojas, fotosíntesis y respiración.*<sup>11</sup> La correcta realización de

cada una de estas funciones, depende principalmente de las condiciones del ambiente en que se desarrolla la planta.

### **3.3.1 ABSORCIÓN DE AGUA**

La radiación solar y la temperatura son las principales condiciones ambientales que influyen en la absorción de agua. Las condiciones de la planta (estado hídrico, por ejemplo) y las condiciones del suelo, también son relevantes en este proceso. Este último debe tener parámetros de salinidad, pH y concentración de nutrientes idóneos, un buen drenado, etc.

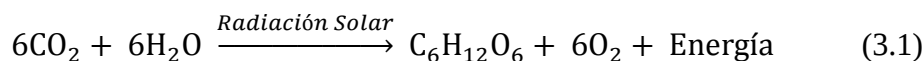
Se calcula que del peso fresco de las plantas en invernadero, aproximadamente un 90% es agua y del restante 10% la mitad es carbono<sup>12</sup>, de ahí la importancia de la función de absorción de agua, que permite mantener el estado hídrico necesario para el crecimiento de la planta.

### **3.3.2 TRANSPIRACIÓN**

La transpiración es la evaporación de agua desde la planta, principalmente a través de las estomas en sus hojas, lo que funciona como mecanismo de regulación de su temperatura. Se relaciona directamente con la radiación solar, ya que esta aporta la energía para evaporar el agua. En invernaderos con calefacción, la energía aportada también contribuye a la transpiración.

### **3.3.3 FOTOSÍNTESIS**

La fotosíntesis es el proceso mediante el cual las plantas, utilizando energía solar, sintetizan compuestos orgánicos a partir de sustancias inorgánicas. La reacción química que ocurre, es básicamente una conversión de dióxido carbono o anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>) y del agua, en hidratos de carbono y oxígeno, lo cual queda descrito en la ecuación 3.1.



Este proceso se puede describir como una conversión de energía solar en energía química. Esta última se almacena en los tejidos de la planta en forma de diferentes compuestos (hidratos de carbono, principalmente ATP y NADPH), los que posteriormente se utilizan para formar aminoácidos, ácidos orgánicos y otros elementos que permitirán su crecimiento.

La fotosíntesis depende de una serie de factores internos y externos. Entre los primeros se considera la estructura de las hojas, disponibilidad de agua, enzimas, entre otros. Los factores externos más relevantes son la radiación solar (cantidad y calidad), la temperatura, humedad y la concentración de CO<sub>2</sub> y oxígeno en el ambiente.

Respecto a la radiación solar global que incide sobre la planta, la fotosíntesis solo emplea una fracción, la cual se conoce como radiación PAR (del inglés Photosynthetic Active Radiation), cuyo rango de longitud de onda está entre los 400 y 700 nm. Esta radiación resulta de mucha importancia en los estudios de invernaderos, ya que su presencia es vital en el crecimiento de los cultivos. En los próximos capítulos se verán más detalles sobre esta materia.

### **3.3.4 RESPIRACIÓN**

La respiración es el proceso esencial de liberación de la energía, que es necesaria para los procesos vitales. Supone una absorción de O<sub>2</sub> y liberación de CO<sub>2</sub>, además de consumir hidratos de carbono de origen fotosintético.

Para que las plantas puedan crecer, la fotosíntesis neta, que es la diferencia entre fotosíntesis (absorción carbono en forma de CO<sub>2</sub>, para convertir en biomasa) y respiración (liberación de energía y CO<sub>2</sub>) debe ser positiva, o en otras palabras, el balance de carbono debe ser positivo.

### **3.4 FASES DEL DESARROLLO**

Como se menciono anteriormente, el desarrollo es una noción cualitativa de la planta; es el cambio ordenado hacia un estado más elevado o complejo de esta. Los intervalos de tiempo entre los distintos estados del desarrollo constituyen las fases del desarrollo.

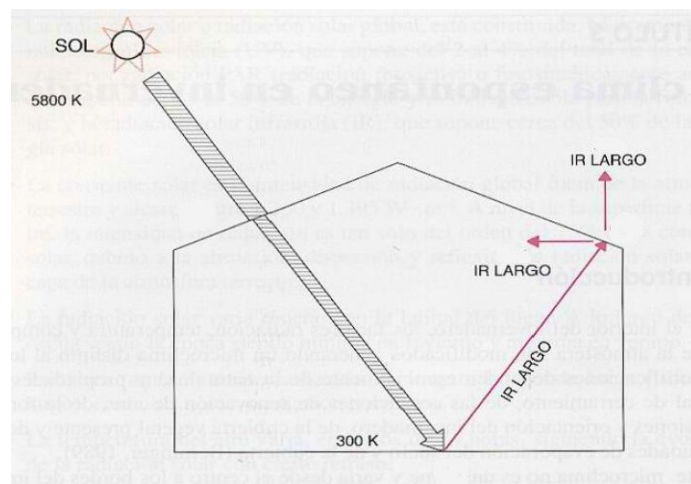
Las fases del desarrollo más importantes en cultivos de invernadero son: germinación y brotación (de bulbos y cormos), la floración y la formación de órganos de reserva.

## 4 COMPORTAMIENTO FÍSICO DE LOS INVERNADEROS

En lo que sigue se presenta una descripción del funcionamiento de un invernadero y de los factores externos e internos que tienen directa relación en su comportamiento físico, lo cual se manifiesta principalmente a través del microclima generado en su interior. Estos contenidos, junto a los del capítulo anterior, constituyen una base teórica simplificada, cuyo conocimiento resulta necesario para abordar casi cualquier aspecto asociado a los invernaderos.

### 4.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de un invernadero se basa en dos fenómenos. El primero, consiste en un efecto de “abrigo” o “confinamiento” del cultivo (producido las paredes del invernadero), lo que reduce la interacción directa de este con los flujos de aire de la atmósfera externa. De esta forma es posible intervenir la transferencia de calor por convección que se da entre las plantas y el viento, o impedir daños al cultivo por una alta intensidad de este último.



**Figura 4.1. Efecto de la cubierta de un invernadero sobre la radiación solar y la radiación infrarroja emitida desde su interior.**

El segundo fenómeno (Figura 4.1) consiste en que la cubierta traslúcida usada en las paredes del invernadero, al ser altamente transparente a la radiación solar, permite que esta la atraviese, y en consecuencia las plantas, el suelo y otros elementos del interior absorben esta radiación; luego, estos emiten energía en forma de radiación

infrarroja de onda larga, a la cual el material de cubierta es altamente opaco (no transparente), por lo que la absorbe y luego emite una parte hacia el exterior y la otra al interior, lo que eleva la temperatura como consecuencia de la acumulación de energía.

## **4.2 CONDICIONES CLIMÁTICAS**

Las condiciones climáticas locales son determinantes en el microclima generado al interior de un invernadero, por lo que su conocimiento es clave para su diseño, construcción y manejo. Los elementos más importantes del clima para los invernaderos, son: radiación solar, temperaturas, humedad, viento y nubosidad, de los cuales la radiación solar es sin duda el más relevante.

### **4.2.1 RADIACIÓN SOLAR**

La radiación electromagnética emitida por el sol, se conoce como radiación solar y casi toda ella cae en la banda de longitudes de onda de 0.3-3  $\mu\text{m}$ .<sup>13</sup> Casi la mitad de la radiación solar es luz (es decir, cae en el rango visible). El resto corresponde a radiación infrarroja y ultravioleta. Esta última corresponde aproximadamente a un 12% de la radiación solar.

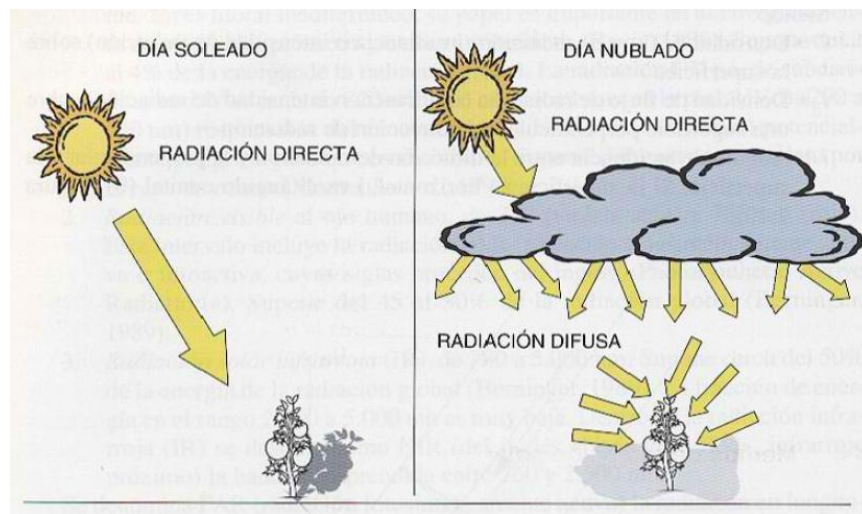
La radiación solar interviene en dos aspectos de los cultivos bajo invernadero: 1) la fotosíntesis y fotomorfogénesis de las plantas, transpiración, apertura de estomas, etc. 2) sobre el balance de energía del invernadero, afectando a las temperaturas del suelo, del aire, de las plantas, y el resto de elementos en su interior.

La energía solar (transportada por las ondas electromagnéticas emitidas por el sol) fuera de la atmósfera terrestre, varía poco, y se denomina constante solar. Al atravesar la atmósfera la radiación es reflejada, absorbida o dispersada en parte, sufriendo modificaciones cuantitativas y cualitativas, lo que genera pérdidas de energía que dependen del espesor de atmósfera atravesada y de sus características (contenido de humedad y gases, nubosidad, etc.).

#### 4.2.1.1 CALIDAD DE LA RADIACIÓN SOLAR

La energía solar que incide sobre una superficie terrestre, se considera que consta de las partes *difusa* y *directa*. La parte de la radiación solar que llega a la Tierra sin ser dispersada ni absorbida por la atmósfera se denomina **radiación solar directa**  $G_D$ . Se supone que la radiación dispersada llega a la superficie terrestre de manera uniforme desde todas direcciones y se denomina **radiación solar difusa**  $G_d$ .<sup>13</sup>

Las proporciones de energía solar directa y difusa, varían según la turbidez y la transparencia de la atmósfera, influidas también por la elevación del sol. En un día soleado y con la atmósfera transparente, la radiación directa pueda alcanzar aproximadamente un 90% de la radiación global. Sin embargo, en un día nublado, la proporción de la radiación directa respecto a la difusa, es prácticamente nulo.



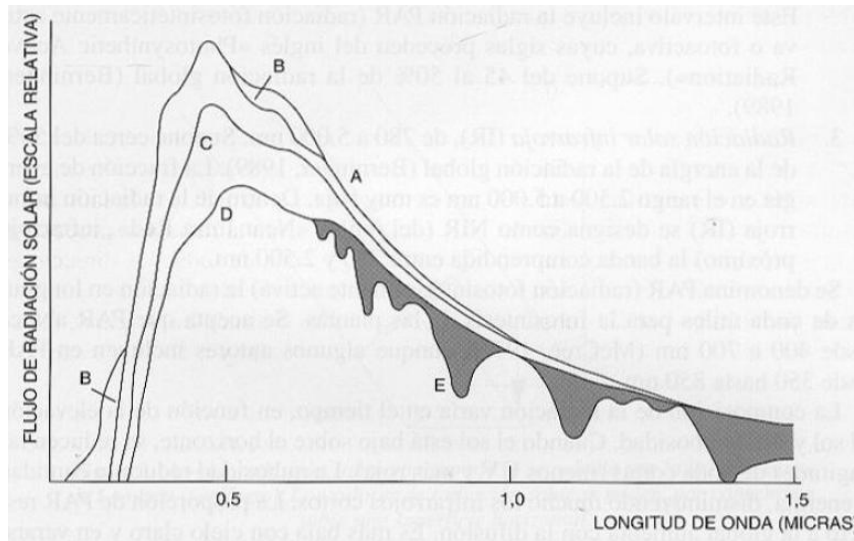
**Fig 4.2. Radiación directa y radiación difusa.**

Cuando la elevación del sol sobre el horizonte es baja, aumenta la proporción de radiación difusa. La figura 4.2 ilustra ambos tipos de radiación, donde se aprecia también, que la sombra de los elementos cuando predomina la radiación directa, es más nítida y definida que cuando predomina la radiación difusa.

La calidad de la radiación solar, se distingue según su longitud de onda. En el límite de la atmósfera terrestre, la radiación solar incluye desde 200 a cerca de 5.000

nm, con un máximo de emisión de 470 nm. Como ya se ha mencionado, al atravesar la atmósfera, esta radiación es atenuada y modificada (Figura 4.3). La mayor parte del flujo de energía solar global (99%) a nivel de superficie terrestre está comprendido entre 300 y 2.500 nm, intervalo del cual se desprenden tres categorías<sup>14</sup>.

1. Radiación ultravioleta (UV): por debajo de 380 nm, es escasa cuando la elevación del sol sobre el horizonte es baja. Supone del 2 al 4% de la energía de la radiación global, y juega un papel importante en el envejecimiento de materiales plásticos y en la morfogénesis.
2. Radiación visible al ojo humano: 380-780 nm, este intervalo incluye la radiación PAR. Supone del 45 al 50% de la radiación global.
3. Radiación solar infraroja (IR): 780-5.000 nm. Supone cerca del 50% de la energía de la radiación global. La fracción sobre los 2.500 nm es prácticamente despreciable.



**Fig 4.3. Procesos sucesivos de reducción del flujo de radiación solar al penetrar la atmósfera terrestre. A) radiación extraterrestre. B) después de la absorción de ozono. C) después de la difusión molecular. D) después de la difusión de aerosoles. E) después de la absorción del vapor de agua y del oxígeno.**

La proporción de radiación PAR respecto a la global aumenta con la difusión; además, la radiación solar difusa mejora el proceso de fotosíntesis en las hojas de las plantas al incidir sobre una mayor superficie de estas. Por este motivo los materiales

de cubierta que dispersan la radiación solar incidente resultan atractivos en el diseño de invernaderos.

#### 4.2.1.2 CANTIDAD DE RADIACIÓN SOLAR

La energía solar que llega a la atmósfera terrestre se llama **irradiancia solar total**  $G_s$  (también llamada **constante solar**), y su valor es:

$$G_s = 1.373 \quad \frac{W}{m^2} \quad (4.1)$$

Esta constante representa la *tasa a la cual la energía solar incide sobre una superficie perpendicular a los rayos del Sol en el borde exterior de la atmósfera, cuando la Tierra se encuentra a su distancia media del Sol.*<sup>13</sup>

A nivel de la superficie terrestre, debido a la absorción y dispersión de radiación por la atmósfera, la intensidad de radiación es menor que la constante solar, debilitándose considerablemente hasta alrededor de  $950 \text{ W/m}^2$  en un día claro, y menos aún en días nublados.<sup>13</sup>

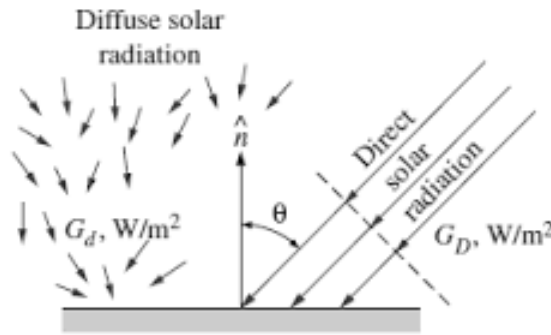


Fig 4.4. Radiación difusa y directa sobre una superficie horizontal.

La energía solar total que incide sobre la unidad de área de una superficie horizontal sobre el piso (Figura 4.4) es:

$$G_{solar} = G_D \cos \theta + G_d \quad \frac{W}{m^2} \quad (4.2)$$

donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia de la radiación solar directa (el ángulo que forma el rayo de sol con la perpendicular a la superficie).

#### **4.2.2 TEMPERATURA**

La temperatura del aire, tiene un evidente efecto en el balance energético del invernadero. La diferencia entre la temperatura del aire externo y aquella que requiere el cultivo, es una cantidad determinante de la demanda energética de calefacción (o refrigeración) del invernadero. Para cada lugar, la temperatura del aire varía con la evolución de la radiación solar, en ciclos de 24 horas y con cambios debidos a las estaciones del año. Las temperaturas medias siguen, con cierto retraso, la evolución de la radiación solar.<sup>14</sup>

La temperatura del suelo también es relevante en el balance energético. Este actúa como un volante de inercia térmico y estacional, calentándose y enfriándose mucho más despacio que el aire circundante.

#### **4.2.3 EL VIENTO**

El viento, desplazamiento principalmente horizontal de una masa de aire, se caracteriza por su velocidad y dirección. La fuerza del viento es básica para calcular la estructura del invernadero. Además, su dirección y magnitud son importantes en la ventilación y también en las pérdidas de energía por convección.

La Región de Magallanes se caracteriza por sus fuertes vientos, los que en ciertos meses alcanzan con frecuencia sobre 100 km/h, por lo que la consideración de este factor resulta de mucha importancia en la construcción de invernaderos en esta zona.

#### **4.2.4 COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA**

##### **4.2.4.1 HUMEDAD**

El vapor de agua es uno de los más importantes contribuyentes de la atmósfera desde el punto de vista de la producción de los cultivos. Los cambios de

estados del agua implican el transporte de grandes cantidades de energía, lo que afecta notablemente a las temperaturas del cultivo y su entorno.<sup>14</sup> La humedad atmosférica y la disponibilidad de agua determinan la tasa a la que las plantas transpiran agua hacia la atmósfera. Normalmente el contenido de vapor de agua del aire se expresa por la humedad relativa (HR).

La humedad del aire, es un factor que además, se debe controlar mucho desde el punto de vista sanitario, ya que un exceso de humedad en el ambiente podría inducir hongos y otras enfermedades que arriesgan tanto la salud de las personas, como la producción bajo invernadero. De hecho una de las principales razones para ventilar los invernaderos, es reducir la cantidad humedad en ambiente interno.

Un concepto importante asociado al análisis de los cultivos, es la **evapotranspiración**, el cual se refiere al agua evaporada desde el suelo y al vapor transpirado por la vegetación, y que contribuye en forma primordial al contenido de agua en el aire del interior del invernadero. La evapotranspiración varía según las condiciones climáticas y la cantidad de agua en el suelo o sustrato.

#### **4.2.4.2 CO<sub>2</sub>**

El CO<sub>2</sub> es de suma importancia en la atmósfera de los invernaderos, ya que constituye uno de los elementos necesarios en la reacción de fotosíntesis. La renovación del aire interior debe considerar mantener niveles de CO<sub>2</sub> que no detengan el proceso de crecimiento de las plantas.

#### **4.2.5 PRECIPITACIONES**

Las precipitaciones se consideran principalmente en el diseño de pendientes, canalones o sistemas de acumulación de agua. La nieve y el granizo son factores relevantes en los cálculos de las cargas estructurales de invernaderos y en el caso de daños a la estructura.

## **4.2.6 OTROS FACTORES**

Otros aspectos como la topografía del lugar o la altitud, influyen bastante sobre la orientación del invernadero o su lugar final de emplazamiento; existen por ejemplo, barreras naturales como cerros, que permiten un efecto cortaviento o que generan sombra sobre el cultivo.

## **4.3 MICROCLIMA DE UN INVERNADERO**

En el interior del invernadero la radiación, la temperatura y la composición de la atmósfera local, son factores intervenidos con el fin de generar un microclima distinto al local. Las diferencias entre ambos microclimas dependen esencialmente de la naturaleza y propiedades del material de cerramiento, de las condiciones de renovación del aire, de la forma, las dimensiones y orientación del invernadero y de las características del cultivo.

### **4.3.1 CONDICIONES GENERALES INTERNAS**

#### **4.3.1.1 TEMPERATURA**

En un invernadero sin calefacción, la principal fuente de calor es la radiación solar, parte de la cual es almacenada en el suelo. Durante la noche la energía procede principalmente del suelo, en forma de radiación infrarroja de onda larga. Estos procesos de transferencia de calor, tienen mucha influencia sobre las temperaturas del aire, del cultivo y del suelo.

En la zona superficial, la temperatura de suelo sigue una evolución similar a la temperatura del aire, de aspecto sinusoidal y retrasada respecto a la del aire. Los valores extremos se amortiguan con la profundidad. El tipo de riego influye en la temperatura del suelo, por la propia temperatura del agua y por su incidencia en la evaporación de agua desde este. El suelo junto con el sustrato en cultivos sin suelo, son el volante de inercia térmica del invernadero. El cultivo tiene poca importancia en relación a la inercia térmica comparado con el suelo<sup>11</sup>.

#### 4.3.1.2 VENTILACIÓN

Los intercambios de aire con el exterior dependen mucho del viento exterior. La **tasa de renovación horaria** (R) se define como el cociente entre el volumen de aire exterior que entra por hora y el volumen total del invernadero. La ventilación de los invernaderos se justifica por tres necesidades: 1) para evitar el calentamiento excesivo de día, 2) para asegurar unos niveles mínimos de CO<sub>2</sub> y 3) para controlar la higrometría.

#### 4.3.1.3 HIGROMETRÍA

Los intercambios de vapor de agua en un invernadero son principalmente un resultado de la transpiración del cultivo, la evaporación de agua desde el suelo y de la condensación del vapor de agua en las diversas superficies del invernadero al enfriarse.

Durante el día, en el invernadero la humedad relativa baja al subir la temperatura, aunque haya aumentado la humedad absoluta (HR) con la transpiración. Al ventilar con aire exterior (más frío y seco) se reduce la HR. De noche, al enfriarse el invernadero, la HR crece pudiendo alcanzar la saturación y entonces se produce condensación sobre las superficies del invernadero. Dependiendo de la pendiente y de las propiedades de la cubierta (como algunas con aditivos antigoteo), esta condensación puede caer o no sobre el cultivo. En una cubierta doble pared, la pared interior está menos fría, lo que retarda la condensación del vapor de agua.

Un hecho importante de mencionar, es que un cultivo desarrollado evapora agua activamente, sombrea el suelo y limita el calentamiento del invernadero de día. Un invernadero sin cultivo y sin riego estará mucho más caliente en un día soleado y las variaciones día/noche de temperatura y HR serán mayores.

#### **4.3.1.4 CONTENIDO DE CO<sub>2</sub>**

La ventilación, la fotosíntesis, la respiración de las plantas y la generación de CO<sub>2</sub> en el suelo (por respiración radicular y descomposición de materia orgánica) influyen en el contenido de CO<sub>2</sub> del aire del invernadero.

De noche, por acumulación de CO<sub>2</sub> liberado por en la respiración de las plantas, su concentración es superior a la del aire exterior. De día, debido a la fotosíntesis, el CO<sub>2</sub> baja respecto al valor normal exterior.

#### **4.3.1.5 GASES POLUCIONANTES**

En la atmósfera del invernadero, pueden existir gases polucionantes como los originados por el empleo de combustibles inadecuados (con exceso de impurezas) o defectuosamente quemados. Defectos en la combustión pueden generar CO (monóxido de carbono), etileno y óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>). Impurezas usuales como el azufre, generan dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

#### **4.3.2 CLIMA ESPONTÁNEO EN UN INVERNADERO**

Se llama “clima espontáneo del invernadero” al que se genera sin intervención humana y energética importante, especialmente sin aporte calórico, ni ventilación forzada ni pulverización de agua.<sup>14</sup> Las variables y constantes físicas que tienen mayor relevancia sobre este clima, se pueden agrupar en un modelo de balance energético como el que se verá más adelante.

Un fenómeno interesante que se puede manifestar en un clima de este tipo, es la “inversión térmica”. Este se da por lo general, cuando en noches de cielo despejado las pérdidas de energía por radiación infrarroja son muy elevadas. Si el material de cubierta es permeable a estas radiaciones (como ocurre con el polietileno normal), en noches sin viento puede ocurrir que la inmovilidad del aire dentro del invernadero haga bajar la temperatura del interior más que la exterior, produciéndose la inversión térmica. En el exterior, aunque existe un proceso similar de enfriamiento, este se compensa con los pequeños movimientos de aire, resultando una temperatura más

alta que en el interior. Este tipo de comportamientos destaca la relevancia de estudiar a fondo aquellos aspectos que influyen en el microclima generado y en aquel que se desea.

### **4.3.3 TRANSMISIVIDAD A LA RADIACIÓN**

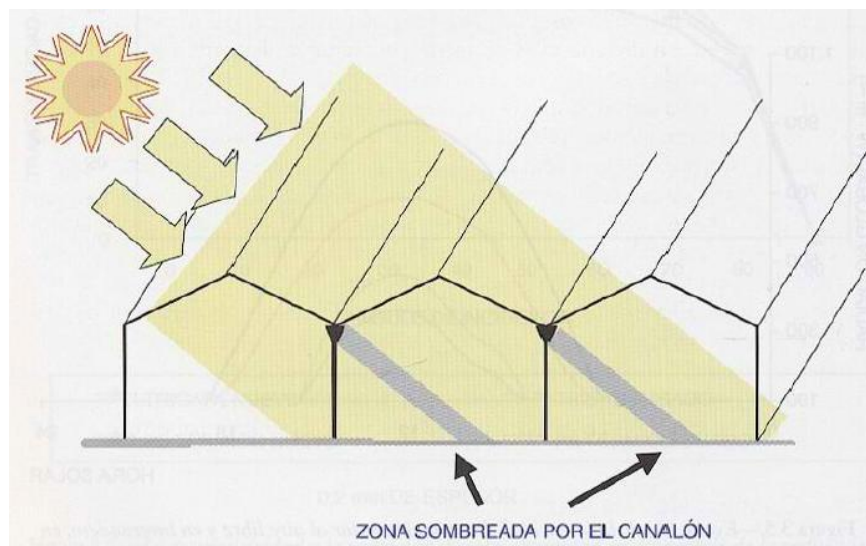
La fracción de radiación global transmitida dentro de un invernadero es designada como “transmisividad global del invernadero”<sup>16</sup>. Este parámetro describe por lo tanto, una parte importante del comportamiento de un invernadero en relación a su interacción con la radiación solar.

A latitudes mayores de 30°, desde el ecuador, la reducción natural de radiación solar es el factor limitante incontrolado más importante para el crecimiento de los cultivos en invernadero, por lo que hay que conseguir la máxima cantidad, duración y uniformidad de radiación posible<sup>17</sup>.

La transmisividad es función, entre otros factores, de las condiciones climáticas (nubosidad principalmente, que determina proporción de radiación difusa y directa), de la posición del sol en el cielo (que depende de la fecha y hora y de la latitud del lugar), de la geometría de la cubierta del invernadero, de su orientación, del material de cerramiento (propiedades, estado de limpieza, condensación de agua en el interior, etc.) y de los elementos estructurales y equipos del invernadero que limitan, al sombrear, la radiación dentro del mismo<sup>16</sup>. La transmisividad a la radiación directa variará en función del ángulo de incidencia, que forman el rayo solar y la perpendicular a la cubierta del invernadero. La transmisividad a radiación difusa en cambio, está poco influenciada por la geometría del invernadero.

La transmisividad global media debe integrarse como valor medio en todo el invernadero, dada la variabilidad a que están sometidos los diversos puntos del invernadero en cuanto a radiación en días despejados, cuando predomina la radiación directa y por ende existen sombras nítidas. En días completamente nublados, la distribución de radiación es más homogénea dentro del invernadero<sup>18</sup>.

Es importante resaltar las notorias diferencias existentes, desde el punto de vista de la transmisividad, entre invernaderos unimodulares y multimodulares (cuyos módulos tengan igual geometría de cubierta) derivadas de los sombreos entre módulos (Figura 4.5) cuando las pendientes de cubierta tienen cierta inclinación, por lo cual los resultados obtenidos en invernaderos de un módulo no son extrapolables a los multimodulares.



**Fig 4.5. Sombreo generado en invernaderos multimodulares debido a la estructura.**

## 5 SELECCIÓN DE CULTIVO: EL TOMATE

La selección de un invernadero y el cálculo de balance energético dependen, entre otras cosas, del tipo de cultivo que se desarrollará en su interior. A continuación, se define entonces este último y sus características relevantes en los cálculos posteriores.

Considerando que el tomate es el principal cultivo hortícola a nivel nacional, tanto por la superficie cultivada, como por la envergadura de los negocios que genera tanto en el ámbito del consumo fresco interno como los derivados de su utilización agroindustrial<sup>15</sup>, sumado al hecho de que en la Región de Magallanes se produce a un nivel muy reducido con respecto al resto de las regiones (como se detalló en el capítulo 2), se resuelve considerarlo como el cultivo de estudio en este trabajo.

### 5.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

*Solanum lycopersicum*, planta comúnmente conocida como tomate, tomatera o jitomate, es una especie de la familia de las solanáceas, originaria de Centro y Sudamérica. Esta puede presentar básicamente dos hábitos de crecimiento: determinado e indeterminado. La planta determinada es más compacta y arbustiva, tiene un crecimiento determinado, por lo general no requiere entutorado ni poda y son ideales para el cultivo en macetas. Además da sus frutos todos a la vez, por lo que la cosecha se realiza en una o dos semanas.

La planta indeterminada se caracteriza por tener un crecimiento desordenado y sin límite. En invernaderos se cultivan por lo general las variedades indeterminadas ya que su crecimiento continuo posibilita la conducción en altura y una cosecha continua al florecer y fructificar en forma regular en cada brazo o eje; esto permite al agricultor definir la producción de tomates según el número de racimos por cada eje y/o por cada planta que se dejan antes de eliminar el brote apical. Las variedades de este tipo dan tomates de manera escalonada durante toda la temporada. Es decir, tienen la fase de crecimiento, floración y fruto a la vez en diferentes partes de la planta.

Dentro de las variedades indeterminadas que se cultivan bajo invernadero, existen diferentes grupos según sus características: variedades larga vida, multiloculares, producción en racimos y cocktail<sup>19</sup>. Si bien estas variedades tienen distintas características en cuanto a su cultivo, post cosecha, calidad, etc., los parámetros de temperatura, humedad, y otros que son importantes para un óptimo crecimiento de la planta, suelen encontrarse en la literatura para la especie en general, sin especificar una variedad en particular, lo que resulta suficiente para los objetivos de este trabajo.

El cultivo de tomate puede desarrollarse en el suelo, o en un sustrato, como ocurre en los cultivos hidropónicos. Estos últimos pueden generar una productividad muy superior al cultivo en suelo, ya que existe un mayor control de los nutrientes que este recibe, entre otras ventajas. Sin embargo, se requiere una inversión inicial superior para adoptar la infraestructura y los equipos necesarios.

En este caso, se considera adecuado estudiar las características del cultivo de tomate en suelo, dado que existe información basada en experiencias satisfactorias de los agricultores de la región.

## **5.2 FENOLOGÍA**

La duración del ciclo del cultivo del tomate está determinada por la variedad y por las condiciones climáticas de la zona en la cual se establece el cultivo. En la región de Magallanes el ciclo de cultivo dura alrededor de cinco meses.

Independiente de la variedad de tomate cultivada, se distinguen cinco etapas en su crecimiento: germinación, crecimiento vegetativo, floración, cuaja y maduración roja. Cada una de estas etapas tiene distintos requerimientos climáticos y nutritivos.

## **5.3 TEMPERATURA**

El tomate requiere de temperaturas relativamente altas para su crecimiento y desarrollo, siendo muy sensible a las heladas. Todas las funciones de la planta están influenciadas por la temperatura. Así por ejemplo, el crecimiento del fruto se ve afectado de manera que, cuando ésta disminuye, baja también la respiración y la

síntesis de almidón. A continuación se presentan dos tablas extraídas de distintas fuentes, las cuales en conjunto permiten describir los requerimientos de temperatura del tomate.

**TABLA 5.1**  
**Requerimientos térmicos del cultivo de tomate según fase de desarrollo.**  
(Fuente: Manual de cultivo de tomate bajo invernadero; INIA, 2005)

| <b>Momento fenológico</b>     | <b>Tipo de requerimiento</b> | <b>Temperatura (C°)</b> |
|-------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| <b>Germinación</b>            | T° Mínima                    | 10                      |
|                               | T° Óptima                    | 20 - 30                 |
|                               | T° Máxima                    | 35                      |
| <b>Crecimiento Vegetativo</b> | T° Mínima Letal              | 0 - 2                   |
|                               | T° Mínima Biológica (base)   | 8 - 10                  |
|                               | T° Máxima Biológica          | 30                      |
| <b>Floración</b>              | T° Óptima del suelo          | 16 - 20                 |
|                               | T° Mínima                    | 14 - 16                 |
|                               | T° Óptima                    | 22 - 28                 |
| <b>Cuaja</b>                  | T° Mínima                    | 12                      |
| <b>Maduración Roja</b>        | T° Óptima                    | 15 - 23                 |

**TABLA 5.2**  
**Valores de temperatura adecuados para el tomate cultivado en invernadero**  
(Fuente: Tesi, 2005)

| <b>Temp. mínima letal</b> | <b>Temp. Mínima Biológica</b> | <b>Temp. Óptima</b> |            | <b>Temp. máxima biológica</b> |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------|------------|-------------------------------|
|                           |                               | <b>Noche</b>        | <b>Día</b> |                               |
| (-2) a 0                  | 8 - 10                        | 13 - 16             | 22 - 26    | 26 - 30                       |

## 5.4 HUMEDAD

Una humedad relativa sobre el 75% favorece la obtención de frutos de mayor tamaño y con menos defectos, sin embargo altas humedades relativas estimulan el desarrollo de hongos y bacterias que pueden causar graves daños al cultivo, por ello se recomienda mantener humedades relativas medias cercanas al 50%<sup>19</sup>.

En la literatura investigada se encontraron humedades relativas recomendadas que varían entre un 50% y un 80% (véase ref. 15, 19, 20 y 21). En este trabajo se fijará un 60% como el valor óptimo, por ser aquel que más se repite y que resulta estar dentro de casi todos los rangos estudiados.

## **5.5 SUELO**

En el caso de cultivar tomate en el suelo, este debe tener a lo menos 1 metro de profundidad si es plano; 70 cm para desarrollo del sistema radicular y a lo menos 30 cm para drenaje, ya que el sistema radicular del tomate es superficial (el 80% de las raíces se encuentran en los primeros 40 cm de suelo).<sup>19</sup>

El tomate se desarrolla tanto en suelos arcillosos como arenosos, comportándose mejor en suelos de textura media con alto contenido de materia orgánica y buen drenaje. Suelos muy arenosos pueden presentar dificultades debido a su escasa capacidad de retención de agua. El pH óptimo está entre 6 a 6.5, pero la planta se desarrolla en el rango de 4,5 a 8,2.

## **5.6 MANEJO**

### **5.6.1 ÉPOCAS DE PLANTACIÓN Y DENSIDAD DE PLANTAS**

Las épocas de plantación están en directa relación con el momento que se quiere vender. Sin embargo, estas fechas determinan algunos manejos del tomate, como densidad de plantación y sistema de conducción. En la figura 5.1, se muestra el desarrollo de cuatro producciones en la provincia de Quillota, observándose que la duración total de cada producción varía según la época del año.

La densidad y distribución de las plantas, se modifican de acuerdo a las características de la variedad, época de cultivo, métodos de conducción y poda, localidad, exposición a la luz, ventilación y arquitectura del invernadero. La densidad de plantación es uno de los factores de la producción más importante ya que afecta directamente los rendimientos: a mayor población dentro de los límites de no competencia entre las plantas los rendimientos son mayores.<sup>19</sup>

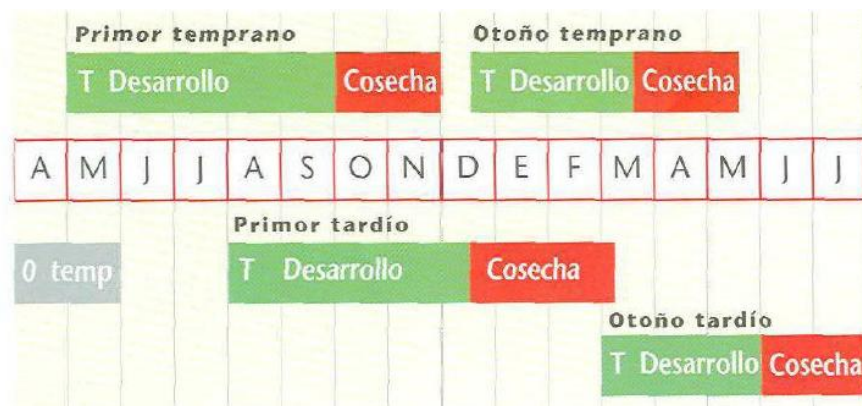


Fig. 5.1. Progresión del cultivo del tomate en invernadero en la provincia de Quillota.

En la región de Magallanes se producen variedades como María Italia, Belle, Fortaleza, Súper Max y Carolina. Por lo general las semillas son germinadas en bandejas y se trasplantan los plantines en la primera quincena de octubre, obteniéndose cosechas desde mediados de febrero. Un marco de plantación común en la región, corresponde a una distancia de 70 cm entre hileras y 40 cm sobre hilera, lo que corresponde a cerca de 30 a 35 mil plantas por hectárea.<sup>21</sup>

## 5.6.2 CONDUCCIÓN Y PODA DE LAS PLANTAS

Para aprovechar el potencial productivo de la planta y el volumen disponible del invernadero, las plantas se conducen de manera vertical mediante técnicas como el *entutorado*, y se podan para evitar una vegetación exuberante. Esto permite mejorar los rendimientos y el control sobre la plantación. Las plantas usualmente son suspendidas de un alambre situado aproximadamente a una altura de dos metros.

## 5.7 RENDIMIENTO

En cuanto a rendimientos, el promedio nacional de tomate para consumo fresco cultivado al aire libre es de 40 ton / ha. Sin embargo, un rendimiento normal debería superar las 55-60 ton/ha y uno bueno debería ser sobre las 80 ton/ha.

Un rendimiento normal de tomate en invernadero debería ser de 100 ton /ha y un rendimiento bueno debería superar las 120 ton/ha.<sup>15</sup>

## **6 SELECCIÓN DE INVERNADERO**

Los alargues de temporada de cultivo que se buscan generar para la región, exigen mejoras en el diseño de invernaderos y la incorporación de fuentes de calefacción pasivas y activas. Dado que los estudios existentes en cuanto al comportamiento térmico de los invernaderos actualmente utilizados en la región es escaso, se considera pertinente considerar un modelo con similares características a los de uso común en la zona.

### **6.1 CRITERIOS**

Analizar el comportamiento térmico de un invernadero exige definir una locación específica de emplazamiento. Dentro de la Región de Magallanes, se considera la ciudad de Punta Arenas como el lugar de evaluación. Esto se debe principalmente a que en esta ciudad existe el mayor registro de mediciones climáticas y atmosféricas, aspecto fundamental para los cálculos futuros.

Con respecto al invernadero en sí, se observa que los invernaderos con cubierta de policarbonato y estructura de perfiles Metalcon (de acero galvanizado) son ampliamente utilizados. Esto se debe a que estos invernaderos han respondido satisfactoriamente a las condiciones climáticas (particularmente a las cargas de nieve y a la presión del viento); además, son relativamente sencillos de construir, por lo que son montados por los mismos agricultores. Por otro lado, estos están hechos en base a materiales que están disponibles en la zona, factor importante, ya que por su posición geográfica, la región no tiene la variedad de materiales de construcción que se pueden encontrar en el resto del país; además, la inversión requerida está al alcance de diversos agricultores de la zona, cuyo capital se caracteriza por no ser elevado, dado que la agricultura no es una actividad tan rentable como en otras regiones del país.

Por último, se menciona que el proyecto “Eficiencia Energética en Invernaderos”<sup>23</sup> ejecutado por el CERE en la región de Magallanes, estudió el comportamiento de distintos invernaderos, cuyas cubiertas eran de polietileno, polietileno doble capa y policarbonato. Entre los resultados obtenidos, se mostró que

los invernaderos de una capa de polietileno de 0,2 mm, (film ampliamente utilizado en la región), generaron una inversión térmica durante la mayoría de las noches bajo estudio, por lo que se descarta su uso en esta evaluación.

En cambio, el invernadero de policarbonato alveolar de 4 mm, logró durante la noche temperaturas por lo general superiores a las del exterior, en un rango entre 1,8 y 4,6 °C, que en promedio, durante todo el periodo de análisis fue de 2,7 °C, siendo de esta manera el mejor material de cobertura probado.

En base a los antecedentes presentados, se decide determinar la demanda energética de un invernadero con cubierta de policarbonato alveolar de 4 mm y estructura Metalcon.

## 6.2 ESPECIFICACIONES

### 6.2.1 MATERIAL DE CUBIERTA

El material de cubierta considerado es policarbonato alveolar de 4 mm, el cual se encuentra dentro de los llamados plásticos rígidos. Las planchas de este tipo, son incombustibles y están protegidas con un filtro UV, lo que alarga su vida útil; además, son altamente resistentes a los impactos como granizos.

La tabla 6.1 detalla algunas características ópticas y térmicas para policarbonato alveolar de 4 mm, las cuales serán utilizadas en el balance energético.

**TABLA 6.1**

**Absortividad ( $\alpha$ ), emisividad ( $\epsilon$ ), transmisividad ( $\tau$ ) y reflectividad ( $\delta$ ) para diferentes tipos de radiación; coeficiente de pérdidas de calor (U) del policarbonato alveolar de 4 mm de espesor.**

(Fuente: “Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos”, IDAE, 2008)

| Radiación solar<br>300-2.500 nm |        |               | Radiación visible<br>380-760 nm |               |          | Radiación IR media y larga<br>2.500-40.000 nm |               |          | U                    |
|---------------------------------|--------|---------------|---------------------------------|---------------|----------|-----------------------------------------------|---------------|----------|----------------------|
| $\alpha=\epsilon$               | $\tau$ | $\Delta$      | $\alpha=\epsilon$               | T             | $\Delta$ | $\alpha=\epsilon$                             | T             | $\delta$ | W/m <sup>2</sup> ·°C |
| 0,08-<br>0,11                   | 0,78   | 0,14-<br>0,15 | 0,06-<br>0,10                   | 0,75-<br>0,79 | 0,15     | 0,89-<br>0,98                                 | 0,02-<br>0,03 | 0,09     | 3,5                  |

## 6.2.2 DIMENSIONES

En la región es común el uso de invernaderos tipo moncapilla de policarbonato de 60, 120 y 240 m<sup>2</sup> de superficie. Este último tamaño será evaluado, ya que permite una mayor cantidad de plantas en su interior, lo que genera una producción más grande que se esperaría que hiciera más rentable alguna alternativa futura de calefacción.

La condensación de vapor de agua en la cara interior de la cubierta plástica necesita una pendiente mínima de cubierta (ángulo de 20° a 25°) para que la gota resale y no gotee sobre el cultivo. La nieve resbala sobre la cubierta si el ángulo es igual o mayor a 26,5°, equivalente a una pendiente 1:2. Por lo tanto, considera un invernadero unimodular tipo capilla cuyas dimensiones se resumen a continuación:

**TABLA 6.2**  
**Dimensiones de invernadero bajo análisis.**  
(Fuente: Elaboración propia.)

|                                         |     |
|-----------------------------------------|-----|
| <b>Superficie suelo (m<sup>2</sup>)</b> | 240 |
| <b>Ancho (m)</b>                        | 6   |
| <b>Largo (m)</b>                        | 40  |
| <b>Altura hombro (m)</b>                | 2,4 |
| <b>Altura cumbrera (m)</b>              | 3,9 |
| <b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>          | 756 |

## 7 BALANCE ENERGÉTICO EN INVERNADEROS

Existen diversos modelos simplificados de balance energético en invernaderos, los cuales difieren según la consideración u omisión de los términos que representan los intercambios de energía y masa, y también, según los criterios y las formulaciones utilizadas en la estimación de cada término. En base al análisis de los datos climatológicos disponibles, que son determinantes para el uso de un modelo u otro, se consideró apropiado combinar las formulaciones de distintos modelos estudiados, entre ellos algunos de tipo dinámico, como el GDGCM (Gembloux Dynamic Greenhouse Climatic Model) y otros de tipo estacionario.

### 7.1 INTERCAMBIOS DE ENERGÍA Y MASA

Desde el punto de vista termodinámico, un invernadero se puede considerar un *sistema abierto*, ya que existe un intercambio de masa y energía a través de sus fronteras, constituidas por las paredes y ventanas de material traslúcido, que delimitan lo que denominamos un *volumen de control*. Los intercambios de calor en un invernadero se dan a través de los tres mecanismos fundamentales: conducción, radiación y convección (con y sin cambio de fase).

Los distintos modelos físicos que existen en la literatura, se basan en las leyes de conservación de la energía y masa en un sistema. Las ecuaciones 7.1 y 7.2 representan respectivamente, los balances de masa y energía en un volumen de control, expresados en forma de razones<sup>24</sup>.

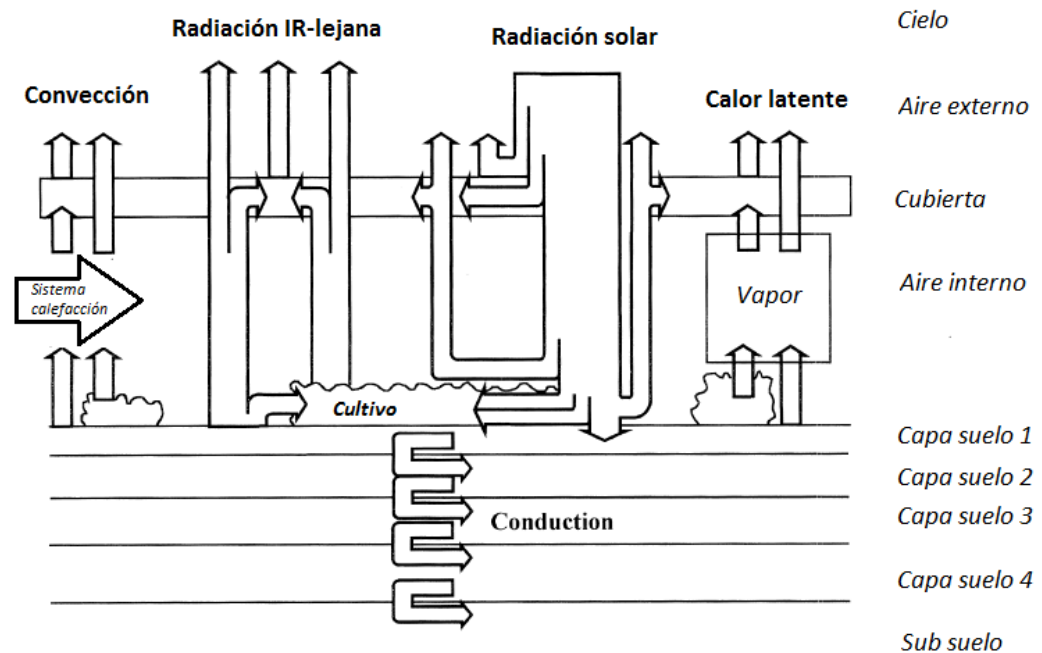
$$\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sal} = \frac{dm_{vc}}{dt} \quad (7.1)$$

$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = \frac{dE_{vc}}{dt} \quad (7.2)$$

### 7.2 MODELO GDGCM

El modelo GDGCM (Gembloux Dynamic Greenhouse Climate Model), es utilizado continuamente para simular y predecir el comportamiento dinámico del clima en un invernadero. Si bien no se pretende desarrollar este modelo, si resulta útil

para comprender y visualizar los principales intercambios de energía y masa que existen en un invernadero, como se ve en la Figura 7.1.



**Fig. 7.1. Diagrama del modelo GDGCM.**

El GDGCM es un modelo unidimensional que consta de 7 capas internas (cubierta, aire interno, cultivo y 4 capas de suelo) y 3 capas externas (cielo, aire externo y sub suelo) que constituyen las condiciones de borde. En él se describen matemáticamente las pérdidas y ganancias por radiación solar e infrarroja, conducción, convección y calor latente, entre cada una de las capas. Ya que este modelo ha sido utilizado satisfactoriamente en la predicción del microclima de invernaderos, sus ecuaciones serán el punto de partida de análisis del balance energético.

El modelo original consta de ocho ecuaciones diferenciales; siete son el balance de energía en cada capa y una es un balance de masa de vapor. La resolución de este sistema de ecuaciones permite conocer las variables más representativas del microclima generado en el invernadero, entre ellas la temperatura del aire, la cual puede ser modificada a través de la calefacción. Cabe mencionar que existen

diferencias entre el planteamiento que cada autor aplica al modelo en general o a los sub modelos de este; además, como se mencionó, el modelo considera 4 capas de suelo, cada una con cierto espesor, densidad y conductividad térmica. Si por simplicidad las cuatro capas de suelo se consideraran como una sola capa, delimitada por la superficie del suelo y el subsuelo, entonces tenemos cuatro ecuaciones de balance de energía en cada capa.

#### Balance cubierta

$$q_{(i,c)}^{conv} + q_{(s,c)}^{IR} + q_{(v,c)}^{IR} + q_{(i,c)}^{lat} + q_{(c)}^{solar} - q_{(c,e)}^{conv} - q_{(c,cielo)}^{IR} = \frac{A_c}{A_{gr}} C'_c \frac{dT_c}{dt} \quad (7.3)$$

#### Balance aire

$$q_{calef} + q_{(s,i)}^{conv} + q_{(v,i)}^{conv} - q_{(i,e)}^{vent} - q_{(i,c)}^{conv} = \rho_i C_i \frac{V}{A_{gr}} \frac{dT_i}{dt} \quad (7.4)$$

#### Balance cultivo

$$q_{(v)}^{solar} + q_{(s,v)}^{IR} - q_{(v,i)}^{lat} - q_{(v,c)}^{IR} - q_{(v,cielo)}^{IR} - q_{(v,i)}^{conv} = m'_v C_v \frac{dT_v}{dt} \quad (7.5)$$

#### Balance suelo

$$q_{(s)}^{solar} - q_{(s,i)}^{conv} - q_{(s,c)}^{IR} - q_{(s,cielo)}^{IR} - q_{(s,v)}^{IR} - q_{(s,i)}^{lat} - q_{(s,ss)}^{cond} = \rho_s \delta_s C_s \frac{dT_s}{dt} \quad (7.6)$$

Los términos del lado izquierdo de cada ecuación (que se detallarán más adelante) expresan las ganancias y pérdidas de calor en cada capa. Los términos del lado derecho corresponden a la variación instantánea de energía térmica en las capas, relacionada directamente con la variación instantánea de su temperatura.

### 7.3 MODELO ESTACIONARIO

Las principales condiciones externas que inciden en el microclima interno del invernadero (radiación solar, viento, temperatura y humedad del aire), se pueden considerar relativamente constantes durante ciertos intervalos de tiempo. Bajo estas condiciones el sistema está aproximadamente en estado estacionario, y por lo tanto, en cada capa la energía que entra es igual a la que sale.

Para encontrar la demanda en calefacción, se considerarán condiciones estacionarias durante intervalos de una hora. Esto significa que para cada hora de funcionamiento del invernadero, se determinará cuanta energía se requiere en calefacción para mantener la temperatura interior en su valor de consigna, bajo condiciones climáticas constantes. Lo anterior se hará para un día característico de cada mes del año en Punta Arenas.

## **7.4 DATOS METEOROLÓGICOS**

Las condiciones meteorológicas de la zona en que se ubica el invernadero son las variables de entrada para resolver los balances de energía. La información sobre estas se extrajo del documento “Resumen Meteorológico año 2015, Estación Jorge C. Schythe”<sup>24</sup>. La estación meteorológica mencionada se ubica en la ciudad de Punta Arenas, específicamente a 53°08’S; 70°53’O; 6 msnm. Todos los datos corresponden al año 2015.

Los datos utilizados corresponden a temperatura, humedad relativa, radiación solar global, velocidad del viento y factor de nubosidad. Algunos de estos datos no se encuentran registrados cada una hora o incluso de algunos no hay registros, por lo que tuvieron que ser estimados de forma razonable.

### **7.4.1 Temperatura exterior ( $T_e$ )**

Para cada día del año 2015 se cuenta con la temperatura medida a las 8:00, 14:00 y 19:00 hrs, y además, se tienen las máximas y las mínimas con el registro horario de estas. Ya que no se cuenta con la temperatura a cada hora del día, se construyeron curvas de variación de la temperatura a partir de los datos existentes, permitiendo asignar un valor en cada hora. Si bien estas aproximaciones pueden afectar notablemente los cálculos, se considera que esta opción es mejor que por ejemplo, asignar un valor constante al ciclo diurno y otro al nocturno. Además, este problema se puede solucionar en un futuro con el solo hecho de contar con un registro más completo de los datos, lo que no es parte de los objetivos de este trabajo.

En cuanto a la construcción de las curvas, se sabe que durante el día la temperatura tiende a seguir una curva similar a la de radiación solar, con cierta forma parabólica y teniendo un máximo cerca de las horas de mayor radiación; durante la noche la temperatura tiende a decaer de forma más o menos lineal hasta un valor mínimo, previo a que comience a incidir la radiación solar. Aunque existen días en que los valores máximos y mínimos de temperatura se dan en horas totalmente alejadas de la tendencia descrita (debido a los múltiples factores de los que esta depende), se descartaron los valores máximos y mínimos considerados atípicos, y luego, para cada mes se obtuvieron las medias de temperatura máxima, mínima y de las horas señaladas previamente, con las que se generaron las curvas deseadas.

A continuación se presenta un resumen de las temperaturas medias mensuales con las que se generaron las gráficas (estas últimas se adjuntan en el apéndice A).

**TABLA 7.1**  
**Temperatura (°C).**

(Fuente: “Resumen meteorológico año 2015, Estación Jorge C. Schythe”)

| Mes        | Temperatura [°C] |       |       |      |      |
|------------|------------------|-------|-------|------|------|
|            | 8:00             | 14:00 | 19:00 | Máx. | Mín. |
| Enero      | 10,4             | 13,4  | 13,1  | 16,2 | 5,6  |
| Febrero    | 9,8              | 13,0  | 12,5  | 15,6 | 6,1  |
| Marzo      | 8,5              | 11,8  | 10,3  | 13,7 | 5,9  |
| Abril      | 5,4              | 9,6   | 7,5   | 10,7 | 2,6  |
| Mayo       | 4,3              | 6,4   | 4,7   | 7,2  | 1,5  |
| Junio      | 2,0              | 4,1   | 2,8   | 5,2  | 0,1  |
| Julio      | 1,1              | 3,6   | 2,0   | 4,7  | -1,0 |
| Agosto     | 2,1              | 4,7   | 3,1   | 6,0  | -0,2 |
| Septiembre | 3,2              | 6,7   | 5,0   | 8,3  | 0,5  |
| Octubre    | 5,6              | 9,4   | 8,0   | 11,0 | 2,4  |
| Noviembre  | 8,3              | 11,1  | 9,6   | 12,3 | 4,0  |
| Diciembre  | 9,2              | 12,4  | 11,1  | 14,0 | 4,1  |

#### 7.4.2 Humedad relativa exterior ( $HR_e$ )

En el caso de la humedad relativa se tienen registros a las mismas horas que se tienen para la temperatura, y también se cuenta con las máximas y mínimas. Se sabe que la humedad relativa depende de la temperatura, y varía de forma inversa a esta;

además, según gráficas estudiadas<sup>14</sup> de humedad relativa ambiente versus temperatura ambiente, el comportamiento de estas es casi simétricamente opuesto, por lo que se realizó el mismo procedimiento para obtener las curvas de humedad relativa que el realizado para obtener las de temperatura, considerando que el instante en que una es máxima, la otra es mínima y viceversa.

A continuación se presenta un resumen de las humedades relativas mensuales con las que se generaron las gráficas (véase apéndice A).

**TABLA 7.2**  
**Humedad relativa (%).**

(Fuente: “Resumen meteorológico año 2015, Estación Jorge C. Schythe”)

| Mes               | Humedad Relativa [%] |       |       |      |      |
|-------------------|----------------------|-------|-------|------|------|
|                   | 8:00                 | 14:00 | 19:00 | Máx. | Mín. |
| <b>Enero</b>      | 72,7                 | 58,2  | 60,3  | 86,1 | 48,8 |
| <b>Febrero</b>    | 73,3                 | 60,6  | 66,7  | 85,7 | 54,8 |
| <b>Marzo</b>      | 79,3                 | 67,6  | 71,1  | 89,5 | 58,5 |
| <b>Abril</b>      | 83,2                 | 68,8  | 76,3  | 90,5 | 63,6 |
| <b>Mayo</b>       | 81,4                 | 75,9  | 83,3  | 88,8 | 71,0 |
| <b>Junio</b>      | 81,4                 | 75,4  | 79,4  | 89,0 | 68,9 |
| <b>Julio</b>      | 84,8                 | 73,7  | 80,9  | 90,2 | 69,8 |
| <b>Agosto</b>     | 82,7                 | 76,3  | 78,8  | 90,4 | 68,5 |
| <b>Septiembre</b> | 77,6                 | 67,4  | 73,2  | 85,9 | 61,0 |
| <b>Octubre</b>    | 78,5                 | 63,0  | 66,9  | 88,8 | 55,7 |
| <b>Noviembre</b>  | 73,3                 | 62,9  | 66,4  | 87,6 | 57,8 |
| <b>Diciembre</b>  | 73,7                 | 59,8  | 63,1  | 89,1 | 52,7 |

### 7.4.3 Radiación solar global ( $R_s$ )

Se cuenta con valores del flujo de radiación solar global horizontal para intervalos de dos horas. Los datos originales están expresados en “Ly/h”. La unidad Ly (langley) equivale a 1 caloría/cm<sup>2</sup>, por lo que haciendo una conversión de unidades se genera la siguiente tabla con la radiación medida en W/m<sup>2</sup>.

**TABLA 7.3**  
**Radiación solar global ( $\text{w/m}^2$ ).**

(Fuente: “Resumen meteorológico año 2015, Estación Jorge C. Schythe”)

| Horas | Ene    | Feb    | Mar    | Abr    | May   | Jun   | Jul    | Ago    | Sep    | Oct    | Nov    | Dic    |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 00-02 | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 02-04 | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 04-06 | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 69,78  |
| 06-08 | 209,34 | 69,78  | 69,78  | 0      | 0     | 0     | 0      | 0      | 139,56 | 209,34 | 209,34 | 279,12 |
| 08-10 | 348,9  | 279,12 | 139,56 | 69,78  | 69,78 | 0     | 0      | 139,56 | 279,12 | 418,68 | 348,9  | 418,68 |
| 10-12 | 488,46 | 348,9  | 279,12 | 139,56 | 69,78 | 69,78 | 69,78  | 209,34 | 418,68 | 488,46 | 418,68 | 558,24 |
| 12-14 | 628,02 | 488,46 | 348,9  | 279,12 | 139,6 | 69,78 | 139,56 | 209,34 | 418,68 | 488,46 | 418,68 | 628,02 |
| 14-16 | 558,24 | 488,46 | 348,9  | 279,12 | 69,78 | 69,78 | 69,78  | 139,56 | 348,9  | 418,68 | 418,68 | 628,02 |
| 16-18 | 418,68 | 348,9  | 209,34 | 139,56 | 0     | 0     | 69,78  | 69,78  | 139,56 | 209,34 | 279,12 | 418,68 |
| 18-20 | 209,34 | 139,56 | 69,78  | 69,78  | 0     | 0     | 0      | 0      | 69,78  | 69,78  | 139,56 | 209,34 |
| 20-22 | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 69,78  | 69,78  |
| 22-24 | 0      | 0      | 0      | 0      | 0     | 0     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |

#### 7.4.4 Viento exterior ( $U_e$ )

El promedio de velocidad del viento para el año 2015, medido a una altura de 10 m.s.n.s. fue de 7.1 m/s, valor equivalente a 25.6 km/h. Se cuenta con el registro del viento promedio en m/s para cada hora de cada mes del año.

**TABLA 7.4**  
**Viento promedio diario (m/s).**

(Fuente: “Resumen meteorológico año 2015, Estación Jorge C. Schythe”)

| Hora  | ene | Feb | Mar | Abr | may | Jun | jul | ago | sep | Oct | nov | dic |
|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0-1   | 5,8 | 6,4 | 4,8 | 5,9 | 4,7 | 5,8 | 5,0 | 5,8 | 6,7 | 5,3 | 6,1 | 5,1 |
| 1-2   | 5,8 | 6,7 | 5,1 | 5,8 | 5,0 | 5,9 | 5,1 | 5,9 | 7,8 | 5,8 | 6,9 | 5,7 |
| 2-3   | 6,0 | 6,9 | 5,9 | 6,1 | 5,2 | 5,9 | 5,1 | 6,3 | 8,2 | 6,3 | 7,2 | 5,9 |
| 3-4   | 6,1 | 7,1 | 6,0 | 5,9 | 5,2 | 6,1 | 5,5 | 6,7 | 8,2 | 6,2 | 7,6 | 6,5 |
| 4-5   | 6,1 | 7,5 | 6,2 | 6,3 | 5,4 | 6,3 | 5,3 | 7,0 | 8,0 | 6,3 | 7,9 | 6,5 |
| 5-6   | 6,5 | 7,7 | 6,4 | 6,6 | 5,5 | 6,6 | 5,7 | 7,0 | 8,6 | 6,3 | 8,6 | 6,7 |
| 6-7   | 6,6 | 7,8 | 6,5 | 6,4 | 5,6 | 6,4 | 5,7 | 6,9 | 8,2 | 6,5 | 8,9 | 7,2 |
| 7-8   | 6,7 | 7,9 | 7,0 | 6,9 | 5,8 | 6,5 | 6,1 | 6,9 | 8,3 | 6,7 | 8,9 | 6,8 |
| 8-9   | 6,9 | 8,2 | 7,2 | 7,0 | 5,9 | 6,6 | 6,2 | 7,0 | 8,3 | 6,6 | 9,0 | 7,2 |
| 9-10  | 7,0 | 8,3 | 7,5 | 7,4 | 5,9 | 6,6 | 6,0 | 7,0 | 8,5 | 6,3 | 9,0 | 7,4 |
| 10-11 | 7,0 | 8,6 | 7,6 | 7,4 | 5,9 | 6,9 | 5,8 | 7,0 | 8,5 | 6,4 | 9,1 | 7,3 |
| 11-12 | 6,9 | 8,6 | 8,1 | 7,2 | 5,7 | 7,2 | 5,7 | 7,1 | 8,3 | 6,6 | 9,3 | 7,3 |
| 12-13 | 6,9 | 9,0 | 8,4 | 7,3 | 5,6 | 7,3 | 5,8 | 7,1 | 8,4 | 6,8 | 9,5 | 7,5 |
| 13-14 | 6,9 | 8,9 | 8,4 | 7,5 | 5,7 | 7,4 | 5,6 | 7,2 | 8,6 | 6,9 | 9,5 | 7,5 |
| 14-15 | 7,2 | 9,0 | 8,0 | 7,5 | 5,5 | 7,4 | 6,0 | 7,3 | 8,3 | 7,1 | 9,5 | 7,5 |
| 15-16 | 7,5 | 9,2 | 8,0 | 7,5 | 5,8 | 7,5 | 5,9 | 7,3 | 8,4 | 7,1 | 9,5 | 7,5 |
| 16-17 | 7,5 | 9,2 | 8,2 | 7,7 | 5,8 | 7,6 | 5,9 | 7,3 | 8,4 | 7,2 | 9,5 | 7,5 |
| 17-18 | 7,7 | 8,8 | 8,5 | 7,8 | 5,7 | 7,6 | 5,9 | 7,3 | 8,4 | 7,2 | 9,5 | 7,5 |
| 18-19 | 7,8 | 8,8 | 8,6 | 7,8 | 5,5 | 7,6 | 5,9 | 7,2 | 8,3 | 7,2 | 9,5 | 7,5 |
| 19-20 | 7,6 | 8,9 | 8,6 | 7,6 | 5,3 | 7,7 | 5,9 | 6,7 | 8,3 | 7,2 | 9,4 | 7,5 |
| 20-21 | 7,7 | 9,1 | 8,6 | 7,3 | 5,2 | 7,6 | 5,9 | 6,7 | 8,4 | 7,4 | 9,4 | 7,4 |
| 21-22 | 7,7 | 9,0 | 8,6 | 7,5 | 5,0 | 7,5 | 5,9 | 6,8 | 8,4 | 7,4 | 9,4 | 7,3 |
| 22-23 | 7,7 | 9,1 | 8,6 | 7,5 | 4,7 | 7,5 | 5,7 | 6,8 | 8,4 | 7,4 | 9,4 | 7,4 |
| 23-0  | 7,5 | 9,0 | 8,5 | 7,5 | 4,6 | 7,6 | 5,4 | 6,8 | 8,3 | 7,4 | 9,2 | 7,4 |

### 7.4.5 Nubosidad (C)

La nubosidad corresponde a la fracción de cielo cubierto con nubes y se expresa en octas u octavos de la bóveda celeste. Básicamente esta última se divide en 8 partes, y se determinan cuantas están cubiertas con nubes. Este factor se utiliza para determinar la *Temperatura del cielo*, parámetro necesario para estimar los intercambios de calor por radiación infrarroja en la cubierta del invernadero.

Cabe mencionar, que se cuenta con tres registros diarios a determinadas horas, lo que puede ser insuficiente para estimar correctamente las pérdidas por radiación infrarroja a cada hora. A continuación se resumen los valores medios de nubosidad mensuales.

**TABLA 7.5**  
**Nubosidad (-).**  
(Fuente: “Resumen meteorológico año 2015, Estación Jorge C. Schythe”)

| Meses      | Octavos |
|------------|---------|
| Enero      | 5,7     |
| Febrero    | 5,9     |
| Marzo      | 5,1     |
| Abril      | 5,6     |
| Mayo       | 6,4     |
| Junio      | 6,3     |
| Julio      | 5,7     |
| Agosto     | 6,2     |
| Septiembre | 5,6     |
| Octubre    | 5,2     |
| Noviembre  | 6,0     |
| Diciembre  | 5,9     |

## 7.5 RESOLUCIÓN DEL MODELO ESTACIONARIO

A continuación se describen los términos que componen las ecuaciones 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6, explicando su significado físico, las expresiones matemáticas que los modelan y los supuestos asociados en cada uno de estos. Luego se explica la resolución del balance estacionario que permite calcular la demanda de energía en calefacción.

### 7.5.1 Flujos de radiación solar

Para modelar los flujos de radiación solar se requieren dos datos medidos: *radiación solar directa* y *radiación solar difusa*. En este caso se cuenta solo con

mediciones de radiación solar global horizontal, sin el detalle del aporte de las componentes directas y difusas. Para obtener estas cantidades, se hace uso del Explorador Solar para Autoconsumo<sup>25</sup>, herramienta web que entrega información del recurso solar a partir de un modelo computacional que incorpora las condiciones atmosféricas de los distintos lugares de Chile. Los datos generados para el año 2015 en Punta Arenas, entregan los porcentajes de las componentes directa y difusa de la radiación solar global mensual, los cuales se muestran en la Tabla 7.6. Estos porcentajes se aplican sobre la radiación global horizontal medida, estimando así la radiación directa y difusa.

**TABLA 7.6**  
**Componentes directa y difusa de la Radiación Solar Global mensual (%).**

(Fuente: “Explorador Solar para Autoconsumo, web:  
<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>”)

|            | Radiación Solar (%) |        |
|------------|---------------------|--------|
|            | Directa             | Difusa |
| <b>ENE</b> | 67,47               | 32,53  |
| <b>FEB</b> | 70,53               | 29,47  |
| <b>MAR</b> | 71,71               | 28,29  |
| <b>ABR</b> | 66,27               | 33,73  |
| <b>MAY</b> | 64,00               | 36,00  |
| <b>JUN</b> | 61,90               | 38,10  |
| <b>JUL</b> | 62,96               | 37,04  |
| <b>AGO</b> | 65,22               | 34,78  |
| <b>SEP</b> | 70,47               | 29,53  |
| <b>OCT</b> | 70,25               | 29,75  |
| <b>NOV</b> | 67,37               | 32,63  |
| <b>DIC</b> | 68,63               | 31,37  |

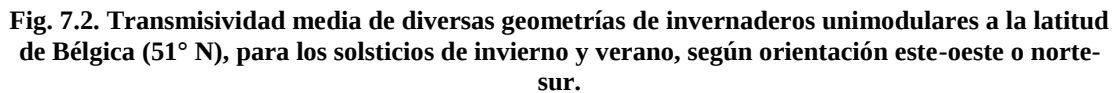
La densidad de flujo de radiación solar que entra al invernadero  $q_{Sint}$ , se puede calcular como<sup>26</sup>:

$$q_{Sint} = \tau_{sfr}(\tau_{sc,dir}q_{Sdir} + \tau_{sc,dif}q_{Sdif}) \quad (7.7)$$

donde  $q_{sdir}$  y  $q_{sdif}$  son las densidades de flujo de radiación solar directa y difusa respectivamente,  $\tau_{sfr}$  es la transmitancia del marco o estructura del invernadero, lo que representa la atenuación de radiación solar por efecto del sombreamiento que generan los componentes estructurales,  $\tau_{sc,dir}$  y  $\tau_{sc,dif}$  son las transmitancias de la cubierta a la radiación directa y difusa, respectivamente.

$\tau_{sfr}$  y  $\tau_{sc,dif}$  se pueden considerar aproximadamente constantes (en este caso se usó 0.85 y 0.78 para el primer y segundo parámetro<sup>26</sup>, respectivamente), sin embargo,  $\tau_{sc,dir}$  varía a lo largo del día según el ángulo de incidencia entre la radiación solar directa y la normal a la superficie de cubierta. Este último término no se tiene con exactitud para el policarbonato, pero si se tienen datos experimentales de la transmisividad global media a la radiación directa para distintas configuraciones geométricas de invernaderos de plástico evaluados en la latitud 51° N, lo que se aprecia en la gráfica de la Figura 7.1 (ref. 14 y 27).

Dada la similitud entre la latitud mencionada y la de Punta Arenas, se opta por reemplazar  $\tau_{sc,dir}$  (parámetro variable) por la transmisividad global media  $\tau_{sgm}$ , parámetro que será constante para el día representativo de cada mes. Esto se justifica además, con el fin de simplificar los cálculos, considerando el carácter estimativo que tiene el balance de energía en el invernadero.


$$q_{sint} = \tau_{sgM} q_{sdir} + \tau_{sfr} \tau_{sc,dif} q_{sdif} \quad (7.8)$$

53

**TABLA 7.7**  
**Valores adoptados de Transmisividad global media  $\tau_{sgM}$  (-).**  
(Fuente: elaboración propia)

| Meses    | $\tau_{sgM}$ |
|----------|--------------|
| DIC      | 0,63         |
| NOV-ENE  | 0,60         |
| OCT-FEB  | 0,57         |
| SEPT-MAR | 0,54         |
| AGO-ABR  | 0,52         |
| JUL-MAY  | 0,49         |
| JUN      | 0,46         |

### 7.5.1.1 Flujo de radiación solar absorbido por la cubierta

El flujo de radiación solar que incide sobre la cubierta del invernadero es absorbido, reflejado y transmitido por esta. De la densidad de flujo transmitida hacia el interior ( $q_{sint}$ ), una fracción se refleja sobre el cultivo y el suelo, incidiendo otra vez en la cubierta. Tomando en cuenta una sola reflexión sobre el cultivo y el suelo, la densidad de flujo de radiación solar absorbida por la cubierta  $q_{S(c)}$  es<sup>26</sup>:

$$q_{S(c)} = \alpha_{Sc,dir}q_{sdir} + \alpha_{Sc,dif}q_{sdif} + p_v\rho_{sv}\alpha_{Sc,dif}q_{sint} + (1 - p_v)\rho_{ss}\alpha_{Sc,dif}q_{sint} \quad (7.9)$$

donde  $\alpha_{Sc,dir}$  y  $\alpha_{Sc,dif}$  son las absorptividades a la radiación solar directa y difusa respectivamente,  $p_v$  es la fracción del suelo del invernadero cubierta por el cultivo,  $\rho_{sv}$  y  $\rho_{ss}$  son las reflectividades a la radiación solar del cultivo y del suelo respectivamente. El valor de la absorptividad del policarbonato se tiene para el flujo global de radiación solar, por lo que la ecuación 7.9 se transforma en:

$$q_{S(c)} = \alpha_{Sc}(q_{sdir} + q_{sdif}) + p_v\rho_{sv}\alpha_{Sc}q_{sint} + (1 - p_v)\rho_{ss}\alpha_{Sc}q_{sint} \quad (7.10)$$

la absorptividad ( $\alpha_{Sc}$ ) del policarbonato alveolar de 4 mm a la radiación solar tiene un valor igual a 0.1 según la Tabla 6.1. Considerando un suelo cubierto con un *mulching* (cubierta blanca usualmente usada para aumentar la radiación PAR sobre el cultivo y para disminuir la evaporación desde el suelo), la reflectividad  $\rho_{ss}$  es igual a 0.8.

Se establece que todas las propiedades relativas al cultivo se consideran cuando este ha alcanzado su mayor cobertura sobre el suelo. En estas condiciones, la fracción del suelo cubierto por la vegetación  $p_v$  se puede asumir<sup>26</sup> igual a 0.9 [-] y la reflectividad del cultivo  $\rho_{sv}$  igual a 0.22 [-].

### 7.5.1.2 Flujo de radiación solar absorbido por el cultivo

La absorptividad del cultivo  $\alpha_{sv}$  depende de su fase de desarrollo y se obtiene mediante la ecuación<sup>26</sup>:

$$\alpha_{sv} = 1 - \tau_{sv} - \rho_{sv} \quad (7.11)$$

donde  $\tau_{sv}$  es la transmisividad del cultivo a la radiación solar y se calcula como:

$$\tau_{sv} = ((1 - \rho_{sv}))e^{-k_v LAI} \quad (7.12)$$

$k_v$  es el coeficiente de atenuación del cultivo fijado en 0.6093 [-]<sup>26</sup> y LAI es el “leaf área index” o índice de área foliar, cuyo valor es 4 [m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>] para un cultivo desarrollado.

Con los parámetros anteriores ya definidos y considerando una reflexión sobre el suelo, la densidad de flujo de radiación solar absorbida por el cultivo  $q_{s(v)}$  se expresa como:

$$q_{s(v)} = p_v(1 + \tau_{sv}\rho_{ss})\alpha_{sv}q_{sint} \quad (7.13)$$

### 7.5.1.3 Flujo de radiación solar absorbido por el suelo

Parte de la radiación solar transmitida a través de la cubierta alcanza el suelo directamente, mientras que otra lo hace al atravesar el cultivo. La densidad de flujo de radiación solar absorbido por el suelo  $q_{s(s)}$  se expresa como:

$$q_{s(s)} = ((1 - p_v) + p_v\tau_{sv})\alpha_{ss}q_{sint} \quad (7.14)$$

donde  $\alpha_{ss}$  es la absorptividad del suelo a la radiación solar.

## 7.5.2 Flujos de transferencia de calor por convección

### 7.5.2.1 Convección entre la cubierta y el aire externo

Existen distintas expresiones empíricas para los coeficientes de convección según varios autores. En este caso, para el coeficiente de calor por convección exterior  $h_{ce}$  se considera la siguiente expresión planteada por De Halleux (1989), válida para invernaderos de gran escala<sup>29</sup>

$$h_{ce} = 5.96U^{0.8}L^{-0.2} \quad (7.15)$$

donde  $U$  es la velocidad del viento característica, considerada en este caso como la velocidad del viento exterior medido a 10 m de altura, y  $L$  es el largo característico de la superficie que se puede considerar igual al largo de inclinación del techo<sup>30</sup>. Por lo tanto, la densidad de flujo por convección entre la cubierta y el aire externo  $q_{(c,e)}^{conv}$  se calcula como:

$$q_{(c,e)}^{conv} = h_{ce}(T_c - T_e) \quad (7.16)$$

### 7.5.2.2 Convección entre el aire interno y la cubierta

El coeficiente de calor por convección interior  $h_i$  se considera según la siguiente expresión empírica planteada por De Halleux (1989), válida para invernaderos de gran escala<sup>29</sup>

$$h_{ci} = 1.86\Delta T^{0.33} \quad (7.17)$$

donde  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura característica entre la cubierta y el aire interior. La densidad de flujo de calor por convección entre la cubierta y el aire interno  $q_{(i,c)}^{conv}$  se puede expresar como:

$$q_{(i,c)}^{conv} = h_{ci}(T_i - T_c) \quad (7.18)$$

### 7.5.2.3 Convección entre el aire interno y el suelo

El valor medio diario del flujo de calor por convección entre el aire interno y el suelo es del orden<sup>29</sup> de  $10 \text{ W/m}^2$ . Según Lamrani *et al.* (2001), el coeficiente

transferencia de calor por convección entre el suelo y el aire, considerando un suelo calefaccionado (situación muy probable para mantener este en las temperaturas adecuadas para un cultivo) es<sup>31</sup>:

$$h_{cs} = 5.2\Delta T^{0.33} \quad (7.19)$$

La densidad de flujo de calor por convección entre el suelo y el aire interno  $q_{(s,i)}^{conv}$  se puede expresar como:

$$q_{(s,i)}^{conv} = h_{cs}(T_s - T_i) \quad (7.20)$$

Para calcular este término se consideraron aquellos valores de temperatura recomendados para el suelo o sustrato de cultivos hortícolas<sup>14</sup>. Durante el día se fijó un valor de 14 °C y durante la noche 16 °C.

#### **7.5.2.4 Convección entre el aire interno y el cultivo**

El análisis de la transferencia de calor entre el cultivo y sus alrededores, se vuelve un poco más compleja debido a su forma y los fenómenos asociados a sus necesidades biológicas. En este caso se omitirá utilizar una expresión directa de este (derivada por lo general de números adimensionales) y se estimará simplemente por despeje del balance estacionario de energía del cultivo, estimando algunas temperaturas necesarias.

#### **7.5.3 Transferencia de calor por radiación infrarroja**

En las expresiones siguientes se ha despreciado el efecto de la condensación en el interior de la cubierta, bajo el supuesto que la temperatura es homogénea en todo el aire interior y que sus valores de consigna son superiores a la temperatura de punto de rocío. En estricto rigor, la temperatura del aire adyacente a la cubierta tiene su misma temperatura y, debido a las bajas temperaturas de esta (principalmente en la noche), la condensación es común. La formación de gotas o de una película de agua en la cubierta, afecta las propiedades radiativas de esta, sin embargo, por simplicidad sus efectos en forma directa serán omitidos, como lo hacen muchos modelos.

Después de obtener los resultados de la demanda de calefacción, se considerará un factor que tome en cuenta el efecto de la condensación.

### 7.5.3.1 Intercambio de radiación infrarroja cubierta-cielo

Un cálculo simplificado del flujo neto de calor intercambiado por radiación infrarroja entre la cubierta y el cielo  $q_{(c,cielo)}^{IR}$ , se realiza considerando a este último como un cuerpo negro que emite energía a una temperatura ficticia equivalente llamada *temperatura efectiva del cielo*,  $T_{cielo}$ .<sup>13</sup> La ecuación que modela este intercambio es la siguiente<sup>28</sup>:

$$q_{c-cielo}^{rad} = \varepsilon_c \sigma (T_c^4 - T_{cielo}^4) \quad (7.21)$$

donde  $\varepsilon_c$  es la emisividad de la cubierta y  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$  es la constante de Stefan-Boltzmann.  $T_{cielo}$  se calcula mediante:

$$T_{cielo} = p_{cl} T_e + (1 - p_{cl}) 0.0552 T_e^{1.5} \quad (7.22)$$

donde  $p_{cl}$  es el factor de nubosidad, que varía entre 0 y 1, y  $T_e$  es la temperatura exterior en °K. Con cielo totalmente nublado la temperatura del cielo equivale a la temperatura exterior del aire; con cielo totalmente despejado equivale a la temperatura para cielo despejado planteada por Swinbank<sup>29</sup>.

### 7.5.3.2 Intercambio de radiación infrarroja cultivo-cubierta

El flujo de calor neto intercambiado por radiación infrarroja entre el cultivo y la cubierta  $q_{(v,c)}^{IR}$  se expresa como<sup>29</sup>:

$$q_{(v,c)}^{IR} = p_v \sigma \frac{\varepsilon_v \varepsilon_{ci}}{(1 - \rho_v \rho_{ci})} (T_v^4 - T_c^4) \quad (7.23)$$

donde  $\varepsilon_v$  es la emisividad del cultivo,  $\varepsilon_{ci}$  es la emisividad de la cara interna de la cubierta, que será considerada igual a  $\varepsilon_c$ .  $\rho_v$  es la reflectividad del cultivo a la radiación infrarroja y  $\rho_{ci}$  es la reflectividad de la cara interna de la cubierta a la radiación infrarroja, en los cálculos considerada igual a  $\rho_c$ . Para estimar este flujo de calor neto, se consideró que la temperatura del cultivo es igual a la del aire. Esto se

debe a que en la práctica, los modelos tienen dificultades para predecir con exactitud esta temperatura, en parte por las grandes diferencias que pueden existir entre un lugar del cultivo y otro. Sin embargo, en distintos experimentos<sup>32</sup> se aprecia que la temperatura del cultivo es cercana a la del aire, y debido al carácter estimativo de los cálculos, se asumirá en este punto que son iguales para así dimensionar la magnitud de este flujo.

### 7.5.3.3 Intercambio de radiación infrarroja suelo-cubierta

El flujo neto de calor intercambiado por radiación entre el suelo y la cubierta  $q_{(s,c)}^{IR}$ , se puede calcular como<sup>29</sup>:

$$q_{(s,c)}^{IR} = (1 - p_v) \sigma \frac{\varepsilon_s \varepsilon_{ci}}{(1 - \rho_s \rho_{ci})} (T_s^4 - T_c^4) \quad (7.24)$$

donde  $\varepsilon_s$  es la emisividad del suelo,  $\rho_s$  es la reflectividad del suelo a la radiación infrarroja.

### 7.5.3.4 Intercambios de radiación infrarroja suelo-cielo y vegetación-cielo

Considerando la cubierta de policarbonato como totalmente opaca a la radiación infrarroja (no la transmite), entonces el intercambio de radiación infrarroja entre la superficie del suelo y el cielo  $q_{(s,cielo)}^{IR}$ , y intercambio de radiación infrarroja entre la superficie del cultivo y el cielo  $q_{(v,cielo)}^{IR}$  se pueden considerar nulos. Lo anterior se justifica en la Tabla 6.1, donde se aprecia que la transmisividad del policarbonato está entre 0,02 y 0,03, por lo que se considera despreciable en este análisis.

### 7.5.3.5 Intercambio de radiación infrarroja entre suelo y cultivo

La siguiente expresión permite calcular la transferencia neta de calor por radiación entre el suelo y el cultivo  $q_{(s,v)}^{IR}$

$$q_{(s,v)}^{IR} = \frac{p_v \sigma (T_s^4 - T_v^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1\right)} \quad (7.25)$$

#### 7.5.4 Calor latente consumido por evapotranspiración

El flujo de calor latente consumido en el proceso de evapotranspiración ( $Q_{ET}$ ) en un cultivo de tomate bajo invernadero, se puede calcular según la expresión propuesta por Jolliet y Bailey (1992):

$$Q_{ET} = S_{gr} * (0,2R_{sol} + 5,5DPV_i + 5,3u_i) \quad (7.26)$$

$Q_{ET}$  en W,  $S_{gr}$  es la superficie del invernadero,  $R_{sol}$  es la radiación solar absorbida por el cultivo y por el suelo ( $q_{sv} + q_{ss}$ ),  $u_i$  es la velocidad del aire al interior del invernadero y  $DPV_i$  (kPa) es el déficit de presión de vapor al interior del invernadero que se calcula según:

$$DPV_i = e_s(t_i) - e_i \quad (7.27)$$

$e_s(t_i)$  es la presión parcial de vapor en saturación en kPa, a la temperatura  $t_i$ , la que se calcula como<sup>22</sup>:

$$e_s(t_i) = 6,1078e^{\frac{17,269t_i}{t_i+237,3}} \quad (7.28)$$

donde  $t_i$  es la temperatura del aire interior en °C.  $e_i$  es la presión parcial de vapor del aire interior, calculada según:

$$e_i = \frac{HR_i \cdot e_s(t_i)}{100} \quad (7.29)$$

donde  $HR_i$  es la humedad relativa porcentual del aire interior. Para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo, se consideró la HR igual a un 60%, valor óptimo para el cultivo del tomate fijado en la sección 5.4.

La evapotranspiración se compone de la transpiración de vapor desde el cultivo  $q_{(v,i)}^{lat}$  y la evaporación de agua desde el suelo  $q_{(s,i)}^{lat}$ . Este último término será considerado despreciable, ya que el mulching que cubre el suelo disminuirá la

evaporación y por lo tanto la evapotranspiración será atribuida al cultivo en su totalidad.

Para  $u_i$  se fijaron valores para régimen con y sin ventilación. En el caso de no haber ventilación, la velocidad del aire al interior del invernadero es 0.3 m/s y con ventilación, la velocidad es un 10% de la magnitud del viento exterior.

El flujo másico de vapor de agua (kg/s) asociado al proceso de evapotranspiración  $m_{v,ET}$ , se calcula como:

$$m_{v,ET} = \frac{Q_{ET}}{\lambda_{fg}} 10^{-3} \quad (7.30)$$

donde  $\lambda_{fg}$  es el calor latente de vaporización (kJ/kg) y se calcula según:

$$\lambda_{fg} = 2500,78 - 2,3601 * T_i \quad (7.31)$$

### 7.5.5 Flujos de calor sensible y latente por ventilación

La pérdida o ganancia total de energía debido al proceso de ventilación, se representa por  $q_{(i,e)}^{vent}$ . La ventilación y las infiltraciones de aire generan la entrada y salida de una mezcla de aire seco y vapor de agua. Tanto el aire seco y el vapor de agua serán considerados gases ideales y transparentes a la radiación solar e infrarroja. El flujo másico del aire seco es el mismo en la entrada que en la salida, lo que se puede representar de la siguiente forma:

$$\dot{m}_{ent} = \dot{m}_{sal} = \dot{m}_a \quad (7.32)$$

donde  $\dot{m}_{ent}$  es el flujo másico de entrada, igual al flujo másico de salida  $\dot{m}_{sal}$  y por lo tanto ambos se representan como un flujo másico único de aire seco  $\dot{m}_a$ . La diferencia de temperaturas entre el aire seco de entrada y de salida, supone una pérdida o ganancia de calor sensible que se representa mediante la siguiente ecuación:

$$q_{sens}^{vent} = \dot{m}_a C_p (T_i - T_e) \quad (7.33)$$

esta ecuación representa la variación de entalpía asociada al flujo de aire seco, donde  $T_i$  es la temperatura del aire interior,  $T_e$  es la temperatura del aire exterior,  $C_p$  es el

calor específico del aire a 25 °C (1,005 kJ/kg°K). El flujo másico de aire seco se puede calcular como:

$$\dot{m}_a = \rho_a \dot{V}_a \quad (7.34)$$

donde  $\rho_a$  representa la densidad del aire seco, y  $\dot{V}$  el flujo volumétrico de aire seco. Ambas se calculan como sigue

$$\rho_a = \frac{(P - P_{v,e})}{R_a T_e} \quad (7.35)$$

con P igual a la presión total del aire de entrada en kPa,  $P_{v,e}$  es la presión parcial del vapor de entrada,  $R_a$  la constante universal de los gases (0,287 kJ/kg°K) y  $T_e$  la temperatura absoluta del aire exterior. En el caso del flujo volumétrico

$$\dot{V} = \frac{V_{gr} R}{3600} \quad (7.36)$$

con  $V_{gr}$  volumen del invernadero y R el número de renovaciones de volumen de aire por hora.

En el caso del vapor de agua, considerando un estado estacionario del sistema, se tiene el siguiente balance de masa:

$$\dot{m}_a w_e + \dot{m}_{v,ET} = \dot{m}_a w_i + \dot{m}_{v,cond} \quad (7.37)$$

esta ecuación expresa que la masa de vapor contenida en el aire de entrada, más el vapor generado por el proceso de evapotranspiración, es igual a la masa de vapor contenida en el aire de salida más la masa de vapor condensada en las distintas superficies del invernadero, principalmente en las paredes.

Considerando que no ocurre condensación, el último término se desprecia. Además, si se considera que el vapor liberado por evapotranspiración está a una temperatura idéntica a la del aire interior, y luego se evacua todo (para así no saturar el ambiente), la energía asociada a este no produce un cambio energético en el el aire. Por lo tanto, la energía ganada o perdida debido a los flujos de vapor, se reduce a

calcular la diferencia de energía asociada a la masa de vapor que ingresa y luego sale del invernadero por ventilación. Esto se puede representar de la siguiente forma:

$$q_{lat}^{vent} = \dot{m}_a \omega_e (h_{ve,2} - h_{ve,1}) \quad (7.38)$$

con  $\omega_e$  humedad específica exterior se calcula como:

$$\omega_e = \frac{0.622 \Phi_e P_{g,e}}{P_e - \Phi_e P_{g,e}} \quad (7.39)$$

con  $P_{g,e}$  igual a la presión parcial de vapor en saturación del aire exterior, calculada según la Ec. 7.27, y  $\Phi_e$  igual a la humedad relativa exterior. La entalpía del vapor de agua  $h_v$  se puede considerar igual a la entalpía del vapor saturado a la misma temperatura, supuesto válido en el rango de temperaturas entre -10 y 50 °C, típico en las aplicaciones de acondicionamiento de aire<sup>33</sup>.

$$h_v(T) \cong h_g(T) \quad (7.40)$$

La entalpía del vapor saturado se aproxima como sigue

$$h_g(T) \cong 2500,9 + 1.82 \cdot T \quad (7.41)$$

Con T en °C y  $h_g$  en kJ/kg.

### 7.5.6 Flujo de calor por conducción a través del suelo

El flujo de calor por conducción  $q_{(s,ss)}^{cond}$  a través de una capa de suelo se calcula según la siguiente expresión

$$q_{(s,ss)}^{cond} = k_s \frac{(T_s - T_{ss})}{l} \quad (7.42)$$

donde  $k_s$  es la conductividad del suelo (W/m°K),  $T_s$  es la temperatura de la superficie del suelo,  $T_{ss}$  es la temperatura del subsuelo a la profundidad l, donde se estima que la temperatura se mantiene aproximadamente constante.

En la estimación de las pérdidas por conducción, la temperatura del subsuelo se tomó a partir de una referencia experimental<sup>34</sup>, en la que se midió durante 4 meses la

temperatura del suelo a una profundidad de 15 cm, en un invernadero de policarbonato con un cultivo y suelo húmedo. La temperatura a esta profundidad osciló alrededor de los 8 °C y por lo tanto se supone este valor como temperatura del subsuelo, considerando las condiciones del invernadero.

## 7.6 Estimación de la demanda energética

Si en cada una de las ecuaciones de balance de energía (ec. 7.3-7.6) se hace cero el término de la derecha, ya que se considera el sistema en estado estacionario y, se toman en cuenta los supuestos mencionados en las expresiones anteriores, entonces al reordenar los balances estos se pueden expresar como:

### Balance aire

$$q_{calef} = q_{(i,e)}^{vent} + q_{(i,c)}^{conv} - q_{(s,i)}^{conv} - q_{(v,i)}^{conv} \quad (7.43)$$

### Balance cubierta

$$q_{(i,c)}^{conv} = q_{(c,e)}^{conv} + q_{(c,cielo)}^{IR} - q_{(s,c)}^{IR} - q_{(v,c)}^{IR} - q_{(c)}^{solar} \quad (7.44)$$

### Balance cultivo

$$q_{(v,i)}^{conv} = q_{(v)}^{solar} + q_{(s,v)}^{IR} - q_{(v,i)}^{lat} - q_{(v,c)}^{IR} \quad (7.45)$$

En el caso del balance de energía en el suelo, se consideran dos situaciones. Una es aquella mencionada previamente, donde las temperaturas de la superficie del suelo son valores de consigna, para cumplir con las temperaturas de suelo recomendadas en cultivos hortícolas como el tomate (sobre 14 C°). Esto se refleja en la ecuación 7.46 donde en el balance del suelo se añade un flujo de calor de calefacción para lograr la temperatura deseada, con la que se calculan directamente todos los flujos.

### Balance suelo calefaccionado

$$q_{(s,i)}^{conv} = q_{(s)}^{solar} - q_{(s,c)}^{IR} - q_{(s,v)}^{IR} - q_{(s,ss)}^{cond} + q_{(s)}^{calef} \quad (7.46)$$

La segunda situación considera un estado estacionario entre los términos del balance de energía del suelo, sin calefacción, y por lo tanto, con  $T_s$  igual a la temperatura de equilibrio en estado estacionario.

### Balance suelo no calefaccionado

$$q_{(s,i)}^{conv} = q_{(s)}^{solar} - q_{(s,c)}^{IR} - q_{(s,v)}^{IR} - q_{(s,ss)}^{cond} \quad (7.47)$$

Reemplazando las ecuaciones 7.45 y 7.44 en la ecuación 7.43, se tiene la siguiente expresión para flujo de calor de calefacción, donde  $q_{(s,i)}^{conv}$  se considera con un suelo calefaccionado y se calcula directamente con las temperaturas de consigna.

$$\begin{aligned} q_{calef1} = & q_{(c,e)}^{conv} + q_{(c,cielo)}^{IR} - q_{(c)}^{solar} - q_{(s,c)}^{IR} - q_{(v)}^{solar} - q_{(s,v)}^{IR} + q_{(v,i)}^{lat} \\ & - q_{(s,i)}^{conv} + q_{(i,e)}^{vent} \end{aligned} \quad (7.48)$$

Despejando la ecuación 7.46 se calcula el flujo de calor de calefacción  $q_{(s)}^{calef}$  necesario en el suelo. En el caso del suelo sin calefaccionar, el flujo de calor de calefacción del aire se calcula como

$$\begin{aligned} q_{calef2} = & q_{(c,e)}^{conv} + q_{(c,cielo)}^{IR} - q_{(c)}^{solar} - q_{(v)}^{solar} + q_{(v,i)}^{lat} - q_{(s)}^{solar} + q_{(s,ss)}^{cond} \\ & + q_{(i,e)}^{vent} \end{aligned} \quad (7.49)$$

La resolución de la demanda de calefacción se realiza calculando en primer lugar la temperatura de cubierta en equilibrio durante el estado estacionario. Para esto se despeja  $T_c$  en el balance de energía estacionario en la cubierta, considerando la temperatura del cultivo y del suelo iguales a la temperatura del aire interior. Luego se pueden calcular todos los flujos restantes y reemplazar en la ecuación 7.48 o 7.49 según sea el caso. La demanda energética en calefacción se obtiene para diferentes condiciones de evaluación.

## 7.7 Principales parámetros

La tabla 7.8 resume los principales valores de los parámetros adoptados en el cálculo de la demanda energética.

**TABLA 7.8**  
**Valores de los principales parámetros adoptados en el balance de energía.**

| Características del suelo                          |              |              |  |
|----------------------------------------------------|--------------|--------------|--|
| Conductividad térmica [W/m°K]                      | 2            |              |  |
| Espesor capa [m]                                   | 0,15         |              |  |
| Temperatura subsuelo [°C]*                         | 8            |              |  |
| Reflectividad a la radiación solar [-]             | 0,8          |              |  |
| Emisividad a la radiación infrarroja [-]           | 0,4          |              |  |
| Características constructivas                      |              |              |  |
| Latitud [°]                                        | 53,08 S      |              |  |
| Largo del invernadero [m]                          | 40           |              |  |
| Ancho del invernadero [m]                          | 6            |              |  |
| Emisividad de la cubierta a la rad. IR [-]         | 0,9          |              |  |
| Transmisividad de la cubierta a la rad. IR [-]     | 0            |              |  |
| Transmisividad global media*                       | junio        | diciembre    |  |
| a la radiación directa [-]                         | 0,46         | 0,63         |  |
| Transmisividad de la cubierta a la rad. Difusa [-] | 0,78         |              |  |
| Transmisividad de la estructura [-]                | 0,85         |              |  |
| Características del cultivo                        |              |              |  |
| Reflectividad a la radiación solar [-]             | 0,8          |              |  |
| Emisividad a la rad. IR [-]                        | 0,95         |              |  |
| LAI [m²/m²]                                        | 4            |              |  |
| Características del aire                           |              |              |  |
| Renovaciones por hora [h⁻¹]*                       | s/rad. solar | c/rad. solar |  |
| (en condiciones estándar)                          | 3            | 10           |  |

## 8 RESULTADOS

### 8.1 Demanda energética en calefacción bajo condiciones estándar

Se consideran como condiciones estándar: geometría del invernadero simétrica con inclinación de techo de  $26,5^\circ$ , factor de nubosidad de cada hora igual al promedio mensual correspondiente, temperaturas y humedades según curvas estimadas, suelo sin sistema de calefacción, tasa de renovaciones de aire según parámetros de la tabla 8.1. Con estas condiciones, se calculó la demanda energética en calefacción, necesaria para mantener la temperatura del aire al interior del invernadero en  $24^\circ\text{C}$  durante las horas diurnas y en  $16^\circ\text{C}$  durante las horas nocturnas. A continuación se resumen los resultados obtenidos:

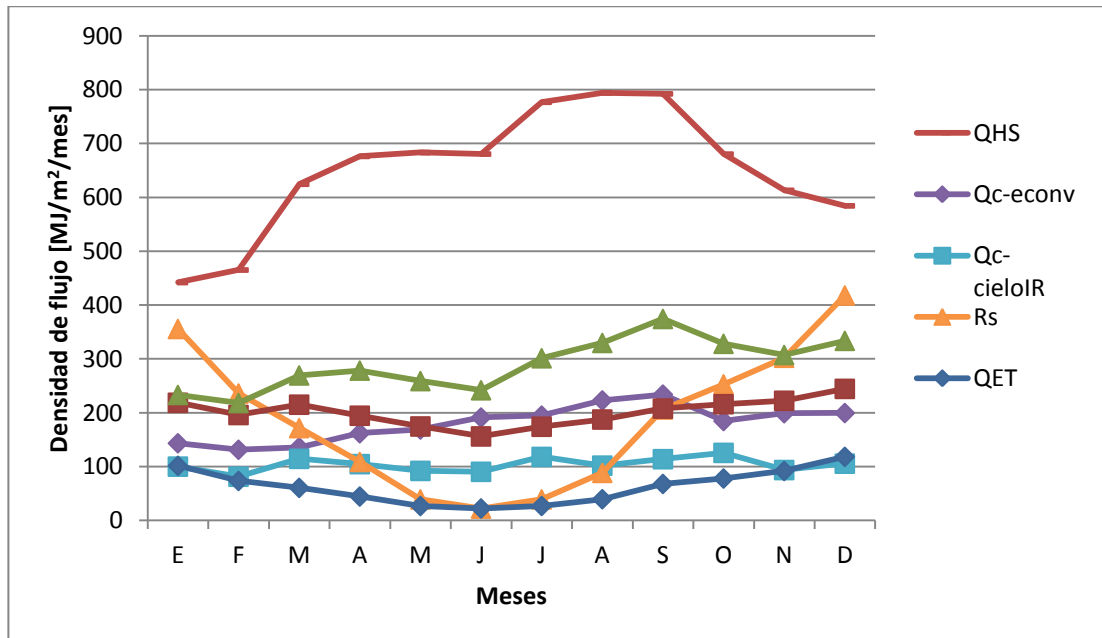
**TABLA 8.1**  
**Demanda de energía mensual en calefacción y energía asociada a los flujos de calor del balance energético en condiciones estándar [MJ/m<sup>2</sup>/mes].**

| Mes              | $Q_{HS}$      | $Q_{c-e}^{conv}$ | $Q_{c-cielo}^{IR}$ | $R_s$         | $Q_{ET}$     | $Q_{s-ss}^{cond}$ | $Q_{i-e}^{vent}$ |
|------------------|---------------|------------------|--------------------|---------------|--------------|-------------------|------------------|
| E                | 442,0         | 143,6            | 100,2              | 355,8         | 101,8        | 218,8             | 233,4            |
| F                | 465,3         | 131,6            | 81,6               | 236,0         | 73,7         | 196,1             | 218,3            |
| M                | 624,6         | 136,0            | 114,7              | 171,9         | 60,9         | 215,3             | 269,6            |
| A                | 676,3         | 162,2            | 104,9              | 109,0         | 44,8         | 194,8             | 278,6            |
| M                | 683,3         | 169,3            | 92,3               | 39,4          | 27,1         | 174,8             | 259,1            |
| J                | 680,5         | 191,4            | 90,7               | 22,4          | 22,5         | 156,4             | 242,0            |
| J                | 776,8         | 195,0            | 118,3              | 39,5          | 27,2         | 174,3             | 301,5            |
| A                | 793,9         | 223,2            | 102,1              | 88,7          | 39,7         | 187,7             | 329,9            |
| S                | 792,3         | 233,9            | 114,1              | 206,3         | 68,1         | 208,1             | 374,4            |
| O                | 680,4         | 184,9            | 125,8              | 252,9         | 78,2         | 216,1             | 328,3            |
| N                | 613,2         | 199,4            | 93,9               | 302,4         | 92,1         | 222,6             | 307,5            |
| D                | 584,4         | 199,8            | 105,8              | 418,0         | 118,4        | 244,6             | 333,8            |
| <b>Total año</b> | <b>7812,9</b> | <b>2170,3</b>    | <b>1244,5</b>      | <b>2242,2</b> | <b>754,6</b> | <b>2409,4</b>     | <b>3476,3</b>    |

La demanda energética anual en calefacción  $Q_{HS}$ , es de  $7.812,9 \text{ [MJ/m}^2\text{]}$ , es decir que considerando la superficie del invernadero de  $240 \text{ [m}^2\text{]}$ , la energía requerida en un año bajo las condiciones propuestas es de aproximadamente  $1.875.096 \text{ MJ}$ . En la tabla se puede apreciar los flujos de energía por cada  $\text{m}^2$  de superficie del

invernadero: la energía disipada a través de la cubierta por la convección exterior  $Q_{c-e}^{conv}$ , la energía neta intercambiada por radiación infrarroja entre la cubierta y el cielo  $Q_{c-cielo}^{IR}$ .  $R_s$  es la suma de la energía solar absorbida por el cultivo, el suelo y la cubierta,  $Q_{ET}$  es la energía consumida en el proceso de evapotranspiración,  $Q_{s-ss}^{cond}$  son las pérdidas por conducción a través del suelo y  $Q_{i-e}^{vent}$  es la energía asociada a la renovación del aire. Los datos anteriores también se pueden ilustrar en la siguiente gráfica.

**GRÁFICO 8.1**  
**Densidad de los principales flujos de energía del balance de energía bajo condiciones estándar.**



Cabe mencionar que la mayor demanda energética ocurre en agosto. Si bien se esperaría que fuera en los meses de junio o julio, que tienen temperaturas más bajas, hay que aclarar que durante los meses con menos horas de radiación solar, el invernadero estará más horas a la temperatura de consigna nocturna, lo que reduce su demanda energética respecto al régimen diario.

La energía aportada por la calefacción y la radiación solar, es disipada a través de los distintos flujos descritos en la tabla y en la gráfica, que entonces representan

las pérdidas en el balance de energía. A continuación se detalla la distribución de estas pérdidas, considerando los resultados para el total año.

**TABLA 8.2**  
**Distribución porcentual de las pérdidas de energía en el invernadero bajo condiciones estándar.**

|   | $Q_{c-e}^{conv}$ | $Q_{c-cielo}^{IR}$ | $Q_{ET}$ | $Q_{s-ss}^{cond}$ | $Q_{i-e}^{vent}$ |
|---|------------------|--------------------|----------|-------------------|------------------|
| % | 21,58            | 12,38              | 7,50     | 23,96             | 34,57            |

En la tabla 8.2 se aprecia que las pérdidas de energía por ventilación representan un 34,57% de las pérdidas totales. La suma de las pérdidas por convección exterior y radiación infrarroja entre la cubierta y el cielo, igual a un 33.96%, representa las pérdidas a través de la cubierta.

## 8.2 Demanda energética en calefacción para suelo calefaccionado

En este caso la temperatura de la superficie del suelo se fija en valores de 14 °C en la noche y 16 C° en el día. La demanda requerida para calefacción del suelo no está incluida en la demanda de la tabla 8.3.

**TABLA 8.3**  
**Demanda de energía mensual en calefacción y energía asociada a los flujos de calor del balance energético en suelo calefaccionado [MJ/m<sup>2</sup>/mes].**

| Mes              | Q <sub>HS</sub> | Q <sub>c-e</sub> <sup>conv</sup> | Q <sub>c-cielo</sub> <sup>IR</sup> | Rs             | Q <sub>ET</sub> | Q <sub>s-ss</sub> <sup>cond</sup> | Q <sub>i-e</sub> <sup>vent</sup> |
|------------------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| <b>E</b>         | 404,72          | 143,65                           | 100,25                             | 355,82         | 101,80          | 255,94                            | 233,40                           |
| <b>F</b>         | 429,72          | 131,61                           | 81,57                              | 235,99         | 73,67           | 231,17                            | 218,31                           |
| <b>M</b>         | 583,09          | 136,00                           | 114,74                             | 171,86         | 60,87           | 255,94                            | 269,57                           |
| <b>A</b>         | 629,16          | 162,20                           | 104,92                             | 108,96         | 44,77           | 241,92                            | 278,57                           |
| <b>M</b>         | 621,93          | 169,27                           | 92,34                              | 39,36          | 27,15           | 238,08                            | 259,08                           |
| <b>J</b>         | 615,08          | 191,39                           | 90,66                              | 22,40          | 22,48           | 224,64                            | 242,02                           |
| <b>J</b>         | 714,87          | 194,95                           | 118,28                             | 39,47          | 27,21           | 238,08                            | 301,47                           |
| <b>A</b>         | 738,61          | 223,16                           | 102,10                             | 88,66          | 39,74           | 244,03                            | 329,89                           |
| <b>S</b>         | 751,79          | 233,95                           | 114,09                             | 206,33         | 68,11           | 247,68                            | 374,40                           |
| <b>O</b>         | 640,07          | 184,93                           | 125,78                             | 252,93         | 78,22           | 255,94                            | 328,30                           |
| <b>N</b>         | 580,91          | 199,41                           | 93,91                              | 302,37         | 92,15           | 253,44                            | 307,53                           |
| <b>D</b>         | 558,92          | 199,78                           | 105,82                             | 418,04         | 118,43          | 267,84                            | 333,78                           |
| <b>Total año</b> | <b>7268,88</b>  | <b>2170,30</b>                   | <b>1244,47</b>                     | <b>2242,20</b> | <b>754,60</b>   | <b>2954,69</b>                    | <b>3476,31</b>                   |

Al ser las temperaturas del suelo más altas en comparación con aquellas logradas en condiciones estándar, se genera una disminución de la demanda de energía en calefacción directa a través del aire. Sin embargo, la energía suministrada al suelo más la suministrada al aire resulta ser superior. La energía total disipada por conducción a través del suelo, es mayor en el caso con calefacción, ya que la diferencia de temperatura entre la superficie del suelo y el subsuelo es mayor. En la tabla 8.4 se compara la demanda en calefacción del aire y del suelo, con respecto a la demanda en calefacción bajo condiciones estándar.

**TABLA 8.4**  
**Demanda de energía mensual en calefacción en condiciones estándar y con**  
**suelo calefaccionado. [MJ]/m<sup>2</sup>/mes].**

| Mes              | C/calefacción de suelo |                |                | Cond. Estándar |
|------------------|------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                  | $Q_{HS,ccalef}$        | $Q_{HS,SUELO}$ | $Q_{HStotal}$  | $Q_{HS}$       |
| E                | 404,72                 | 71,20          | 475,91         | 442,04         |
| F                | 429,72                 | 67,65          | 497,37         | 465,26         |
| M                | 583,09                 | 78,88          | 661,97         | 624,59         |
| A                | 629,16                 | 91,38          | 720,54         | 676,28         |
| M                | 621,93                 | 122,25         | 744,18         | 683,28         |
| J                | 615,08                 | 131,71         | 746,80         | 680,51         |
| J                | 714,87                 | 123,29         | 838,16         | 776,75         |
| A                | 738,61                 | 108,98         | 847,59         | 793,94         |
| S                | 751,79                 | 76,93          | 828,72         | 792,27         |
| O                | 640,07                 | 76,87          | 716,94         | 680,43         |
| N                | 580,91                 | 59,68          | 640,59         | 613,18         |
| D                | 558,92                 | 44,78          | 603,71         | 584,37         |
| <b>Total año</b> | <b>7268,88</b>         | <b>1053,60</b> | <b>8322,48</b> | <b>7812,90</b> |

La reducción de la demanda anual en calefacción a través del aire en el caso de suelo calefaccionado, respecto al suelo en condiciones estándar, es de un 6,96%. La energía total requerida en calefacción (calefacción de aire más calefacción de suelo) aumenta en un 6.52%, en el caso de suelo calefaccionado a las temperaturas deseadas, respecto a las condiciones estándar..

Aún cuando la demanda energética total, es superior en el caso de suelo calefaccionado, esta opción es necesario considerarla ya que se debe buscar establecer las temperaturas adecuadas del sustrato. La ventaja del suelo es que es un medio con alta inercia térmica, que podría almacenar energía térmica durante el día, y además, lo importante sería comparar la eficiencia de una posible alternativa de calefacción a través del suelo, ya que podría traducirse finalmente en pérdidas menores de energía.

### 8.3 Demanda energética en calefacción bajo condiciones de cielo despejado en las noches

Como se mencionó previamente, el factor de nubosidad tiene mediciones muy escasas, lo que podría alterar notablemente los resultados respecto a la realidad. Considerando las experiencias realizadas con invernaderos en Magallanes<sup>23</sup>, en los que se evidenció que hubo una inversión térmica en los invernaderos durante la mayoría de las noches, se asume entonces que los intercambios por radiación infrarroja desde la cubierta al cielo son importantes. La condición de la atmósfera es clave en este fenómeno, y las noches despejadas lo facilitan. Por esta razón, se evalúa la demanda energética considerando un cielo despejado (factor de nubosidad igual a cero) durante todas las noches, con el fin de comparar su variación.

**TABLA 8.5**  
**Demanda de energía mensual en calefacción para días en condiciones estándar y noches con cielo despejado. [MJ/m<sup>2</sup>/mes].**

| Mes              | Q <sub>HS</sub> | Q <sub>c-e</sub> <sup>conv</sup> | Q <sub>c-cielo</sub> <sup>IR</sup> | Rs             | Q <sub>ET</sub> | Q <sub>s-ss</sub> <sup>cond</sup> | Q <sub>i-e</sub> <sup>vent</sup> |
|------------------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| E                | 458,64          | 103,90                           | 156,59                             | 355,82         | 101,80          | 218,78                            | 233,40                           |
| F                | 479,40          | 92,53                            | 134,79                             | 235,99         | 73,67           | 196,09                            | 218,31                           |
| M                | 639,49          | 100,56                           | 165,09                             | 171,86         | 60,87           | 215,27                            | 269,57                           |
| A                | 696,49          | 116,69                           | 170,64                             | 108,96         | 44,77           | 194,77                            | 278,57                           |
| M                | 719,32          | 101,79                           | 195,86                             | 39,36          | 27,15           | 174,81                            | 259,08                           |
| J                | 715,20          | 112,54                           | 204,21                             | 22,40          | 22,48           | 156,36                            | 242,02                           |
| J                | 808,15          | 133,99                           | 210,65                             | 39,47          | 27,21           | 174,30                            | 301,47                           |
| A                | 821,79          | 161,41                           | 191,70                             | 88,66          | 39,74           | 187,71                            | 329,89                           |
| S                | 807,90          | 193,64                           | 170,03                             | 206,33         | 68,11           | 208,05                            | 374,40                           |
| O                | 696,49          | 148,88                           | 177,89                             | 252,93         | 78,22           | 216,13                            | 328,30                           |
| N                | 626,33          | 165,02                           | 141,45                             | 302,37         | 92,15           | 222,55                            | 307,53                           |
| D                | 595,37          | 175,37                           | 141,23                             | 418,04         | 118,43          | 244,60                            | 333,78                           |
| <b>Total año</b> | <b>8064,59</b>  | <b>1606,31</b>                   | <b>2060,14</b>                     | <b>2242,20</b> | <b>754,60</b>   | <b>2409,43</b>                    | <b>3476,31</b>                   |

En este caso, las pérdidas por radiación infrarroja entre la cubierta y el cielo aumentan, mientras las pérdidas por convección exterior disminuyen. La suma de

estas corresponde a las pérdidas a través de la cubierta, y son las que hacen la diferencia en la demanda energética con respecto a las condiciones estándar.

Cabe mencionar que la mayoría de las temperaturas de cubierta obtenidas durante la noche, son levemente inferiores a la temperatura del aire exterior, lo que implica que bajo esa condición, el aire exterior cede energía a la cubierta a través de la convección, y por lo tanto, las pérdidas a través de la cubierta se atribuyen exclusivamente a la radiación.

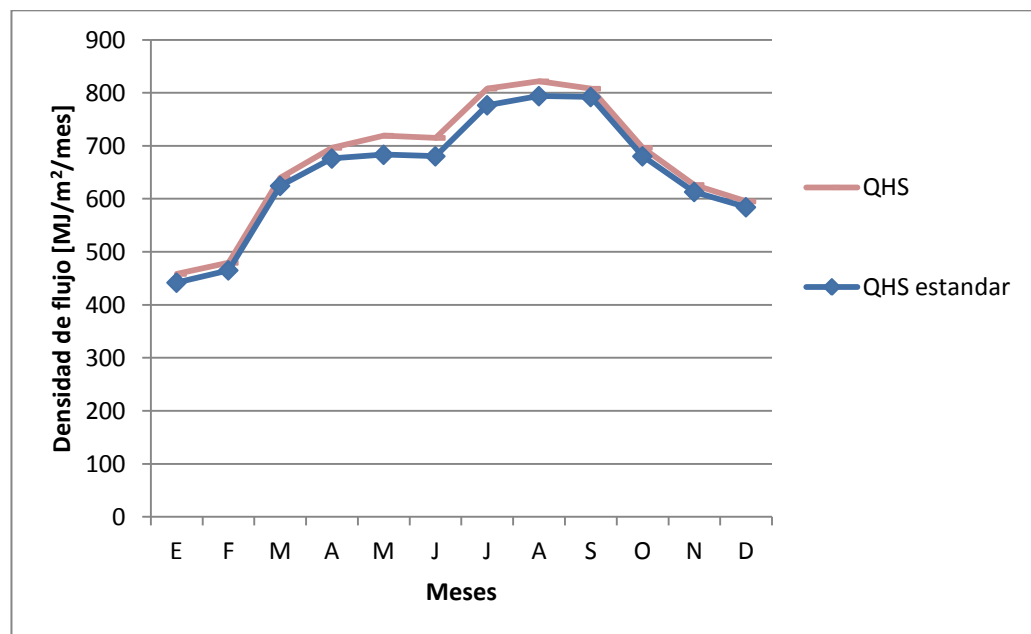
**TABLA 8.6**  
**Demanda de energía mensual en calefacción para días en condiciones estándar y noches con cielo despejado. [MJ/m<sup>2</sup>/mes].**

| Mes              | Q <sub>HS,cs</sub> | Q <sub>HS</sub> estandar | Dif. %      |
|------------------|--------------------|--------------------------|-------------|
| E                | 458,64             | 442,04                   | 3,75        |
| F                | 479,40             | 465,26                   | 3,04        |
| M                | 639,49             | 624,59                   | 2,39        |
| A                | 696,49             | 676,28                   | 2,99        |
| M                | 719,32             | 683,28                   | 5,28        |
| J                | 715,20             | 680,51                   | 5,10        |
| J                | 808,15             | 776,75                   | 4,04        |
| A                | 821,79             | 793,94                   | 3,51        |
| S                | 807,90             | 792,27                   | 1,97        |
| O                | 696,49             | 680,43                   | 2,36        |
| N                | 626,33             | 613,18                   | 2,14        |
| D                | 595,37             | 584,37                   | 1,88        |
| <b>Total año</b> | <b>8064,59</b>     | <b>7812,90</b>           | <b>3,22</b> |

El aumento de la energía en calefacción, se corresponde con el aumento de las pérdidas a través de la cubierta. La siguiente gráfica compara la demanda de energía en calefacción entre el invernadero en condiciones estándar y aquel con noches con cielo despejado.

**GRÁFICO 8.2**

**Demanda de energía mensual en calefacción para días en condiciones estándar y otros con noches despejadas**



La distribución de las pérdidas de energía bajo condiciones de cielo despejado en las noches, se aprecia a continuación.

**TABLA 8.7**

**Distribución porcentual de las pérdidas de energía en el invernadero bajo condiciones de cielo despejado en las noches.**

|   | $Q_{c-e}^{conv}$ | $Q_{c-cielo}^{IR}$ | $Q_{ET}$ | $Q_{s-ss}^{cond}$ | $Q_{i-e}^{vent}$ |
|---|------------------|--------------------|----------|-------------------|------------------|
| % | 15,58            | 19,99              | 7,32     | 23,38             | 33,73            |

Bajo condiciones de cielo despejado en las noches, la mayoría de las pérdidas de energía a través de la cubierta se deben al intercambio de radiación infrarroja.

#### **8.4 Demanda energética en calefacción considerando geometría asimétrica como medida de eficiencia energética**

En la figura 7.2, se aprecia que existe una geometría asimétrica de un invernadero cuya transmisividad global media es superior a la del invernadero de condiciones estándar. Esta estructura, cuyos ángulos de inclinación de la cubierta son

de 25° y 65°, está diseñada para una latitud similar a la de Punta Arenas y por lo tanto resultaría conveniente evaluar su comportamiento en este lugar. La tabla 8.8 resume los resultados de la demanda en calefacción obtenida al suponer el uso de esta geometría y en la tabla 8.9 se comparan los resultados obtenidos con la geometría asimétrica y aquellos bajo condiciones estándar.

**TABLA 8.8**  
**Demanda de energía mensual en calefacción para estructura asimétrica.**  
**[MJ]/m<sup>2</sup>/mes].**

| Mes              | Q <sub>HS</sub> | Q <sub>c-e</sub> <sup>conv</sup> | Q <sub>c-cielo</sub> <sup>IR</sup> | Rs             | Q <sub>ET</sub> | Q <sub>s-ss</sub> <sup>cond</sup> | Q <sub>i-e</sub> <sup>vent</sup> |
|------------------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| E                | 404,85          | 145,03                           | 100,55                             | 409,22         | 116,31          | 218,78                            | 233,40                           |
| F                | 435,69          | 132,63                           | 81,75                              | 278,26         | 85,17           | 196,09                            | 218,31                           |
| M                | 599,94          | 136,93                           | 114,93                             | 207,24         | 70,49           | 215,27                            | 269,57                           |
| A                | 660,24          | 162,77                           | 105,04                             | 131,94         | 51,02           | 194,77                            | 278,57                           |
| M                | 676,99          | 169,40                           | 92,37                              | 48,23          | 29,56           | 174,81                            | 259,08                           |
| J                | 676,99          | 191,71                           | 90,72                              | 27,75          | 23,94           | 156,36                            | 242,02                           |
| J                | 770,59          | 195,10                           | 118,32                             | 48,19          | 29,58           | 174,30                            | 301,47                           |
| A                | 781,27          | 223,74                           | 102,22                             | 107,02         | 44,73           | 187,71                            | 329,89                           |
| S                | 763,10          | 234,94                           | 114,27                             | 248,00         | 79,44           | 208,05                            | 374,40                           |
| O                | 648,87          | 185,99                           | 126,01                             | 298,04         | 90,48           | 216,13                            | 328,30                           |
| N                | 581,40          | 200,44                           | 94,09                              | 347,69         | 104,47          | 222,55                            | 307,53                           |
| D                | 545,59          | 201,09                           | 106,10                             | 473,48         | 133,50          | 244,60                            | 333,78                           |
| <b>Total año</b> | <b>7545,50</b>  | <b>2179,77</b>                   | <b>1246,37</b>                     | <b>2625,07</b> | <b>858,69</b>   | <b>2409,43</b>                    | <b>3476,31</b>                   |

**TABLA 8.9**  
**Demanda de energía mensual en calefacción para estructura asimétrica.**  
**[MJ]/m<sup>2</sup>/mes].**

| Mes | Q <sub>HS, ASIM</sub> | Q <sub>HS ESTANDAR</sub> | Dif. % |
|-----|-----------------------|--------------------------|--------|
| E   | 404,85                | 442,04                   | 8,41   |
| F   | 435,69                | 465,26                   | 6,36   |
| M   | 599,94                | 624,59                   | 3,95   |
| A   | 660,24                | 676,28                   | 2,37   |
| M   | 676,99                | 683,28                   | 0,92   |
| J   | 676,99                | 680,51                   | 0,52   |
| J   | 770,59                | 776,75                   | 0,79   |
| A   | 781,27                | 793,94                   | 1,60   |

|           |                |                |             |
|-----------|----------------|----------------|-------------|
| S         | 763,10         | 792,27         | 3,68        |
| O         | 648,87         | 680,43         | 4,64        |
| N         | 581,40         | 613,18         | 5,18        |
| D         | 545,59         | 584,37         | 6,64        |
| Total año | <b>7545,50</b> | <b>7812,90</b> | <b>3,42</b> |

Los resultados muestran que existe un 3,42% de disminución en la demanda de energía anual en calefacción gracias a la nueva geometría. Durante los meses de mayor radiación, este porcentaje es incluso mayor, y puede llegar a un 8,41% en enero.

Cabe mencionar que para considerar en más detalle los efectos del cambio de geometría, deberían compararse las pérdidas por radiación infrarroja entre una geometría y otra, ya que esto podría afectar negativamente a la eficiencia energética.

La gráfica 8.3 ilustra los resultados de la demanda de energía en calefacción a lo largo de los meses del año evaluado.

**GRÁFICO 8.3**

**Demanda de energía mensual en calefacción para invernadero en condiciones estándar (simétrico) y estructura asimétrica.**



La tabla 8.10 muestra la distribución porcentual de las pérdidas de energía.

**TABLA 8.10**  
**Distribución porcentual de las pérdidas de energía en el invernadero con geometría asimétrica.**

|   | $Q_{c-e}^{conv}$ | $Q_{c-cielo}^{IR}$ | $Q_{ET}$ | $Q_{s-ss}^{cond}$ | $Q_{i-e}^{vent}$ |
|---|------------------|--------------------|----------|-------------------|------------------|
| % | 21,43            | 12,25              | 8,44     | 23,69             | 34,18            |

Se aprecia que la distribución de las pérdidas no tiene diferencias significativas con respecto al caso bajo condiciones estándar. La evapotranspiración aumentó cerca de un 1%, debido a la mayor radiación solar absorbida por el cultivo.

## 8.5 Demanda energética mensual considerando ventilación lateral y cenital

Bajo condiciones estándar se considera una tasa de renovaciones fija para el ciclo diurno y otra para el ciclo nocturna. La tasa de renovaciones para el ciclo nocturno ( $3 \text{ ren}^{-h}$ ) se fija en base a referencias de las infiltraciones en invernaderos con cubiertas plásticas rígidas<sup>22</sup> y en el caso diurno la tasa de renovaciones ( $10 \text{ ren}^{-h}$ ) se fija en base a un mínimo que garantiza que no exista aire saturado. Mantener una tasa de renovaciones fija implica tener un sistema de automatización y control, lo que no es frecuente en invernaderos domésticos, por ejemplo. Normalmente, la ventilación se realiza abriendo las ventanas en cierta posición, y por lo tanto el flujo volumétrico de aire que circula por el invernadero depende de factores como el ángulo de la abertura, el viento, la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior, la superficie de ventilación, entre otros.

Para estimar la tasa de renovación de aire lograda hora a hora bajo cierta configuración de las ventanas y según las condiciones climáticas, se utiliza la siguiente expresión<sup>22</sup>, que considera los efectos combinados de la diferencia de temperatura y del viento (Boulard et al., 1997):

$$G = C_d \cdot \sqrt{2g \frac{h_{12} \Delta T}{T_e \left( \frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} \right)} + \left( \frac{S_1 + S_2}{2} \right)^2 \cdot C_v \cdot v^2} \quad (8.1)$$

donde G es el caudal en m<sup>3</sup>/s que entra y sale del invernadero, C<sub>d</sub> es el coeficiente de caída de presión en la ventana, g es la aceleración de gravedad en m/s<sup>2</sup>, h<sub>12</sub> es la distancia vertical entre el punto medio de las ventanas laterales y las cenitales, C<sub>v</sub> es el coeficiente adimensional del efecto eólico, v es la velocidad del viento en m/s, S<sub>1</sub> es la superficie efectiva de ventilación lateral y S<sub>2</sub> la superficie efectiva de ventilación cenital en m<sup>2</sup>, T<sub>e</sub> es la temperatura exterior en °K.

Las renovaciones por hora se obtienen mediante

$$R = 3600 \frac{G}{V_{inv}} \quad (8.2)$$

Las renovaciones por hora obtenidas varían entre 10 y 20, por lo que no se alejan considerablemente del valor fijado en condiciones estándar. Se debe mencionar que se considero una superficie de ventilación similar a la observada en los invernaderos de la zona, y una apertura de 10 cm en cada ventana. Con las renovaciones de aire obtenidas a partir de una configuración de ventilación que supone una situación más realista (en contraste con las condiciones de ventilación estándar, que son constantes), se obtuvieron los siguientes resultados de los flujos de calor en el invernadero.

**TABLA 8.11**  
**Demanda de energía mensual en calefacción según renovaciones de aire**  
**generadas por ventilación natural al configurar ventanas laterales y**  
**cenitales. [MJ/m<sup>2</sup>/mes].**

| Mes              | Q <sub>HS</sub> | Q <sub>c-e<sup>conv</sup></sub> | Q <sub>c-cielo<sup>IR</sup></sub> | Rs             | Q <sub>ET</sub> | Q <sub>s-ss<sup>cond</sup></sub> | Q <sub>i-e<sup>vent</sup></sub> |
|------------------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|
| E                | 551,77          | 143,65                          | 100,25                            | 355,82         | 101,80          | 218,78                           | 343,13                          |
| F                | 626,09          | 131,61                          | 81,57                             | 235,99         | 73,67           | 196,09                           | 379,14                          |
| M                | 787,63          | 136,00                          | 114,74                            | 171,86         | 60,87           | 215,27                           | 432,61                          |
| A                | 818,97          | 162,20                          | 104,92                            | 108,96         | 44,77           | 194,77                           | 421,26                          |
| M                | 743,41          | 169,27                          | 92,34                             | 39,36          | 27,15           | 174,81                           | 319,22                          |
| J                | 772,39          | 191,39                          | 90,66                             | 22,40          | 22,48           | 156,36                           | 333,90                          |
| J                | 853,55          | 194,95                          | 118,28                            | 39,47          | 27,21           | 174,30                           | 378,27                          |
| A                | 945,11          | 223,16                          | 102,10                            | 88,66          | 39,74           | 187,71                           | 481,06                          |
| S                | 1058,44         | 233,95                          | 114,09                            | 206,33         | 68,11           | 208,05                           | 640,56                          |
| O                | 944,20          | 184,93                          | 125,78                            | 252,93         | 78,22           | 216,13                           | 592,07                          |
| N                | 965,74          | 199,41                          | 93,91                             | 302,37         | 92,15           | 222,55                           | 660,10                          |
| D                | 821,80          | 199,78                          | 105,82                            | 418,04         | 118,43          | 244,60                           | 571,21                          |
| <b>Total año</b> | <b>9889,11</b>  | <b>2170,30</b>                  | <b>1244,47</b>                    | <b>2242,20</b> | <b>754,60</b>   | <b>2409,43</b>                   | <b>5552,52</b>                  |

La tabla 8.12 muestra la distribución porcentual de las pérdidas de energía.

**TABLA 8.12**  
**Distribución porcentual de las pérdidas de energía en invernadero con**  
**ventilación natural a través de ventanas cenitales y laterales.**

|          | Q <sub>c-e<sup>conv</sup></sub> | Q <sub>c-cielo<sup>IR</sup></sub> | Q <sub>ET</sub> | Q <sub>s-ss<sup>cond</sup></sub> | Q <sub>i-e<sup>vent</sup></sub> |
|----------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------|----------------------------------|---------------------------------|
| <b>%</b> | 17,89                           | 10,26                             | 6,22            | 19,86                            | 45,77                           |

Los resultados muestran que casi la mitad de las pérdidas de energía corresponden a la renovación de aire, exactamente un 45,77%, valor aproximadamente un 10% superior al obtenido bajo condiciones estándar.

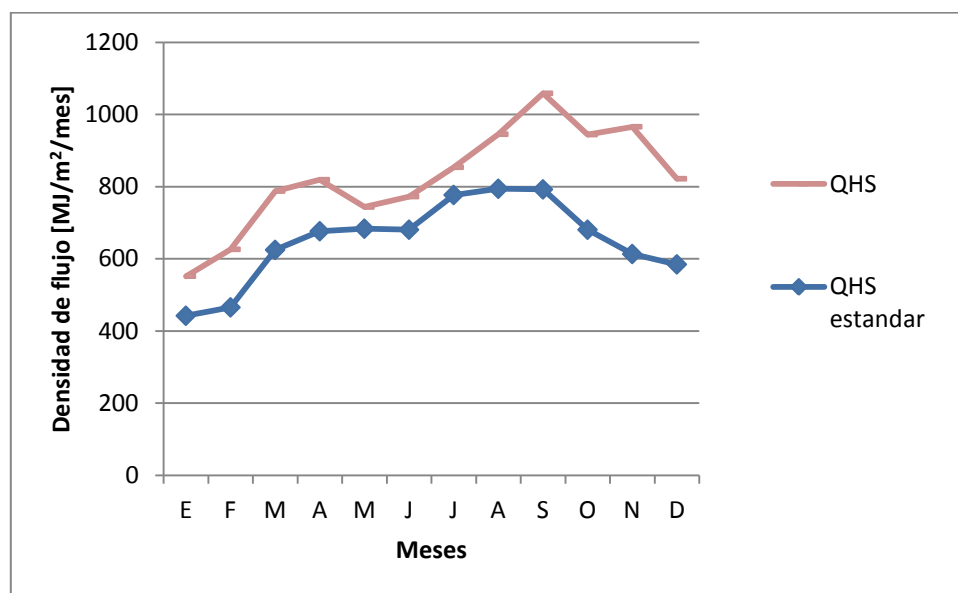
La siguiente tabla compara la demanda energética obtenida con la configuración de las ventanas, con aquella obtenida bajo condiciones estándar:

**TABLA 8.13**  
**Demanda de energía mensual obtenida con ventilación cenital y lateral en comparación con la obtenida bajo condiciones estándar [MJ/m<sup>2</sup>/mes].**

| Mes              | Q <sub>HS</sub> | Q <sub>HS</sub> estandar | Dif. %       |
|------------------|-----------------|--------------------------|--------------|
| E                | 551,77          | 442,04                   | 24,82        |
| F                | 626,09          | 465,26                   | 34,57        |
| M                | 787,63          | 624,59                   | 26,10        |
| A                | 818,97          | 676,28                   | 21,10        |
| M                | 743,41          | 683,28                   | 8,80         |
| J                | 772,39          | 680,51                   | 13,50        |
| J                | 853,55          | 776,75                   | 9,89         |
| A                | 945,11          | 793,94                   | 19,04        |
| S                | 1058,44         | 792,27                   | 33,60        |
| O                | 944,20          | 680,43                   | 38,77        |
| N                | 965,74          | 613,18                   | 57,50        |
| D                | 821,80          | 584,37                   | 40,63        |
| <b>Total año</b> | <b>9889,11</b>  | <b>7812,90</b>           | <b>26,57</b> |

La siguiente gráfica ilustra los datos de la tabla 8.13.

**GRÁFICO 8.4**  
**Demanda de energía mensual en calefacción para invernadero con configuración de ventilación determinada.**



El cambio en la configuración de la ventilación incrementó la demanda de energía total en calefacción en un 26,57%, diferencia superior a las obtenidas con cualquier cambio de condiciones en los puntos anteriores. Estas diferencias ilustran que la ventilación sería un punto crítico en la eficiencia energética de un invernadero, ya que en este caso se busco configurar las ventanas de modo que la tasa de renovaciones fuera similar a la obtenida en las condiciones estándar, y aún así, la diferencia en la demanda energética fue importante, por lo tanto, deben buscarse mecanismos de control de modo que la tasa de renovaciones se ajuste a los parámetros de control deseados (humedad, temperatura y CO<sub>2</sub>).

## **8.6 Demanda energética mensual considerando mejora en la hermeticidad**

La tasa de renovaciones de aire por infiltración (3 ren/h), fijada en las condiciones estándar, es característica de construcciones deficientemente herméticas. Los invernaderos de cubiertas rígidas como el policarbonato, puestas sobre perfiles de madera o matalcon, pueden generar infiltraciones importantes, debido a la gran cantidad de planchas que se usan (a diferencia del polietileno por ejemplo, que se puede extender en una mayor superficie) y a las perforaciones. A continuación se muestran los resultados obtenidos al calcular la demanda de energía en calefacción considerando que la hermeticidad de la estructura ha sido mejorada, alcanzando una tasa de renovaciones de aire por infiltración de 0,3 ren/h.

La tabla 8.14 muestra los principales flujos de calor en el balance energético, mientras la tabla 8.15 compara la demanda energética del invernadero hermético con aquella obtenida bajo condiciones estándar.

**TABLA 8.14**  
**Demanda de energía mensual en calefacción al mejorar la hermeticidad,**  
**fijando la tasa de renovaciones de aire por infiltración en 0,3 ren/h.**  
**[MJ/m<sup>2</sup>/mes].**

| Mes              | Q <sub>HS</sub> | Q <sub>c-e</sub> <sup>conv</sup> | Q <sub>c-cielo</sub> <sup>IR</sup> | Rs             | Q <sub>ET</sub> | Q <sub>s-ss</sub> <sup>cond</sup> | Q <sub>i-e</sub> <sup>vent</sup> |
|------------------|-----------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| E                | 417,54          | 143,65                           | 100,25                             | 355,82         | 101,80          | 218,78                            | 208,89                           |
| F                | 445,18          | 131,61                           | 81,57                              | 235,99         | 73,67           | 196,09                            | 198,23                           |
| M                | 596,81          | 136,00                           | 114,74                             | 171,86         | 60,87           | 215,27                            | 241,79                           |
| A                | 630,87          | 162,20                           | 104,92                             | 108,96         | 44,77           | 194,77                            | 233,16                           |
| M                | 614,58          | 169,27                           | 92,34                              | 39,36          | 27,15           | 174,81                            | 190,38                           |
| J                | 595,70          | 191,39                           | 90,66                              | 22,40          | 22,48           | 156,36                            | 157,21                           |
| J                | 695,14          | 194,95                           | 118,28                             | 39,47          | 27,21           | 174,30                            | 219,86                           |
| A                | 724,52          | 223,16                           | 102,10                             | 88,66          | 39,74           | 187,71                            | 260,47                           |
| S                | 747,85          | 233,95                           | 114,09                             | 206,33         | 68,11           | 208,05                            | 329,97                           |
| O                | 642,02          | 184,93                           | 125,78                             | 252,93         | 78,22           | 216,13                            | 289,89                           |
| N                | 585,80          | 199,41                           | 93,91                              | 302,37         | 92,15           | 222,55                            | 280,16                           |
| D                | 565,63          | 199,78                           | 105,82                             | 418,04         | 118,43          | 244,60                            | 315,04                           |
| <b>Total año</b> | <b>7261,63</b>  | <b>2170,30</b>                   | <b>1244,47</b>                     | <b>2242,20</b> | <b>754,60</b>   | <b>2409,43</b>                    | <b>2925,03</b>                   |

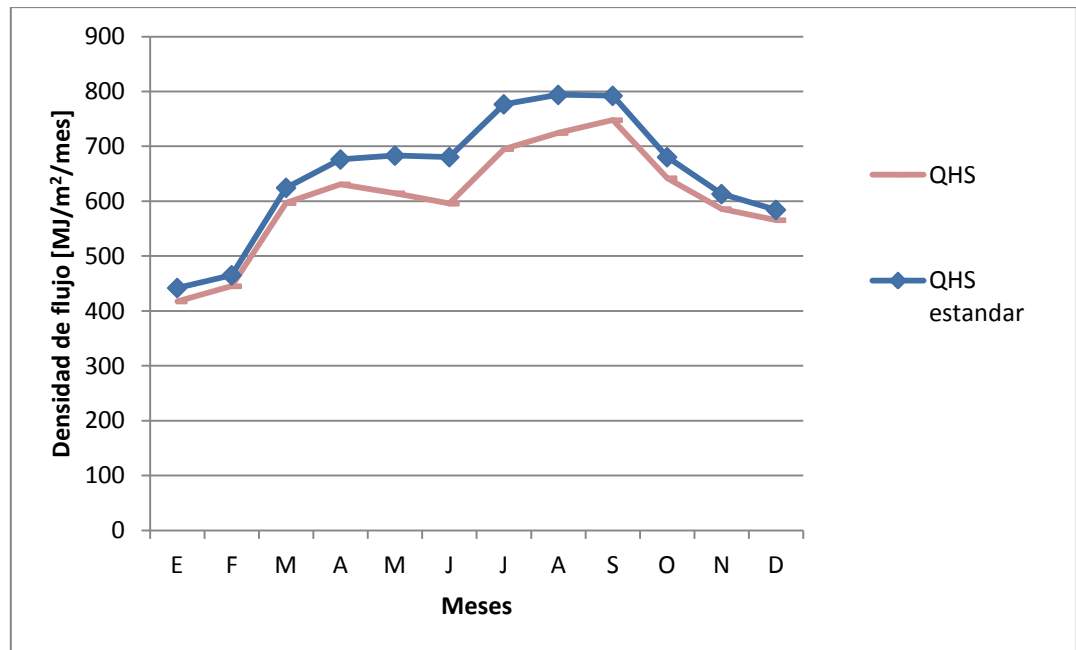
**TABLA 8.15**  
**Demanda de energía mensual obtenida con ventilación cenital y lateral en**  
**comparación con la obtenida bajo condiciones estándar [MJ/m<sup>2</sup>/mes].**

| Mes              | Q <sub>HS</sub> | Q <sub>HS</sub> estándar | Dif. %      |
|------------------|-----------------|--------------------------|-------------|
| E                | 417,54          | 442,04                   | 5,54        |
| F                | 445,18          | 465,26                   | 4,32        |
| M                | 596,81          | 624,59                   | 4,45        |
| A                | 630,87          | 676,28                   | 6,71        |
| M                | 614,58          | 683,28                   | 10,05       |
| J                | 595,70          | 680,51                   | 12,46       |
| J                | 695,14          | 776,75                   | 10,51       |
| A                | 724,52          | 793,94                   | 8,74        |
| S                | 747,85          | 792,27                   | 5,61        |
| O                | 642,02          | 680,43                   | 5,64        |
| N                | 585,80          | 613,18                   | 4,47        |
| D                | 565,63          | 584,37                   | 3,21        |
| <b>Total año</b> | <b>7261,63</b>  | <b>7812,90</b>           | <b>7,06</b> |

Al mejorar la hermeticidad del invernadero la demanda de energía total en calefacción disminuyó en un 7,06% y, por lo tanto, se considera que resulta muy importante buscar la hermeticidad de la estructura, lo que puede implicar la propuesta de un nuevo material de cubierta o de nuevos perfiles.

**GRÁFICO 8.5**

**Demanda de energía mensual en calefacción para invernadero con hermeticidad mejorada.**



## 8.7 Cálculo de la potencia necesaria para calefacción

Para estimar la potencia necesaria en calefacción se considera las condiciones climáticas más desfavorables para la calefacción y la refrigeración (en caso de ser necesaria), estas son:

|                                           |          |
|-------------------------------------------|----------|
| Temperatura mínima absoluta del año 2015: | - 9,2 °C |
| Segunda mínima absoluta del año 2015:     | - 5,0 °C |
| Mínima de la media de las mínimas:        | -1,0 °C  |
| Mínima temperatura media mensual:         | 1,7 °C   |
| Máxima absoluta del año:                  | 24,5 °C  |

**TABLA 8.16**  
**Balances de energía en los intervalos con condiciones climáticas extremas.**

| $T_e$<br>[°C] | $T_i$<br>[°C] | $Rn$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $q_{c-e}^{conv}$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $q_{c-sky}^{IR}$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $q^{ET}$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $q^{vent}$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $q^{cond}$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $q_{HS}$<br>[W/m <sup>2</sup> ] | $Q_{HS}$<br>[kW] |
|---------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------|
| -9,2          | 0,0           | 0,0                         | -13,3                                   | 85,7                                    | 2,9                             | 32,5                              | -34,5                             | 73,3                            | 17,6             |
| -9,2          | 10,0          | 0,0                         | 53,8                                    | 94,7                                    | 4,3                             | 67,7                              | 7,9                               | 228,4                           | 54,8             |
| -9,2          | 16,0          | 0,0                         | 97,7                                    | 100,7                                   | 5,6                             | 88,9                              | 45,2                              | 338,0                           | 81,1             |
| -5,0          | 0,0           | 0,0                         | -37,9                                   | 82,5                                    | 2,9                             | 17,4                              | -34,3                             | 30,6                            | 7,3              |
| -5,0          | 10,0          | 0,0                         | 26,0                                    | 91,3                                    | 4,3                             | 52,1                              | 8,1                               | 181,9                           | 43,7             |
| -5,0          | 16,0          | 0,0                         | 68,5                                    | 97,4                                    | 5,6                             | 72,9                              | 45,5                              | 289,8                           | 69,6             |
| -1,0          | 0,0           | 0,0                         | -59,2                                   | 78,9                                    | 2,9                             | 3,4                               | -34,0                             | -7,9                            | -1,9             |
| -1,0          | 10,0          | 0,0                         | 0,8                                     | 87,6                                    | 4,3                             | 37,6                              | 8,4                               | 138,7                           | 33,3             |
| -1,0          | 16,0          | 0,0                         | 41,6                                    | 93,5                                    | 5,6                             | 58,2                              | 45,7                              | 244,6                           | 58,7             |
| 1,7           | 16,0          | 0,0                         | 24,3                                    | 90,6                                    | 5,6                             | 48,5                              | 46,0                              | 215,0                           | 51,6             |
| 1,7           | 24,0          | 0,0                         | 81,8                                    | 99,4                                    | 8,2                             | 75,6                              | 87,6                              | 352,5                           | 84,6             |
| 24,5          | 24,0          | 349,9                       | 38,3                                    | 13,2                                    | 87,1                            | -5,2                              | 60,9                              | -155,6                          | -37,4            |
| 24,5          | 24,0          | 349,9                       | 38,3                                    | 13,2                                    | 87,1                            | -5,2                              | 60,9                              | -155,6                          | -37,4            |
| 24,5          | 28,0          | 349,9                       | 54,8                                    | 19,0                                    | 88,8                            | 36,5                              | 88,4                              | -62,4                           | -15,0            |
| 24,5          | 30,0          | 349,9                       | 62,9                                    | 21,8                                    | 89,8                            | 114,8                             | 102,7                             | 42,1                            | 10,1             |

En los intervalos que se debe calefaccionar, se consideró un viento exterior de 9,5 m/s, factor de nubosidad 0, radiación solar igual a cero y 3 renovaciones por hora. En los intervalos que se debe refrigerar, se consideró un viento exterior de 4,6 m/s, factor nubosidad igual a uno, las renovaciones de aire fueron 10 o 20, y una radiación solar de 628 w/m<sup>2</sup>.

## 9 CONCLUSIONES

Este trabajo permitió estimar la demanda energética y conocer la distribución de las pérdidas de calor de un invernadero simétrico de policarbonato, ubicado teóricamente en la ciudad de Punta Arenas. Los resultados obtenidos se considera que son razonables, según la comparación del orden de magnitud de la demanda energética obtenida con la de otros invernaderos estudiados, de similares características tanto estructurales como de ubicación. Los análisis realizados demuestran la utilidad de realizar modelaciones con el fin de evaluar el comportamiento de los invernaderos.

Se estima que en un futuro sería conveniente para la Región de Magallanes, lograr la realización de una simulación dinámica del microclima en un invernadero, por ejemplo, de tipo GDGCM, contrastada y validada experimentalmente. Esto permitiría estudiar de forma computacional, nuevas medidas de eficiencia energética y controlar de mejor manera algunas variables. Una ventaja que existe para hacer esto, es que existen diversos estudios realizados en latitudes similares a la de Punta Arenas, lo que resulta de gran ayuda en la recopilación de información. Para concretar una modelación de este tipo, sería necesario mejorar la medición de variables como la nubosidad, o la temperatura del subsuelo.

Antes de llegar a realizar una modelación dinámica, sería beneficioso lograr algunos experimentos más sencillos y que contribuyan luego a plantear los sub modelos utilizados en las simulaciones dinámicas. Por ejemplo, la medición de la transmisividad global media en un invernadero, contrastada con un software que permita calcularla, o la evaluación de un modelo de cálculo de la evapotranspiración dentro de un invernadero, ya que este término en particular resulta difícil de medir y calcular.

En cuanto a los resultados obtenidos, se sugiere enfocar esfuerzos en mejorar la hermeticidad de los invernaderos y el control de la ventilación. Dadas las condiciones de la zona, se genera un salto térmico grande entre el aire exterior e interior en un invernadero con calefacción, lo que sumado a la magnitud de los vientos puede

generar tasas de ventilación bastante altas, lo que de no ser controlado, generaría muchas pérdidas.

## 10 REFERENCIAS

[1] A. Alpi, F. Tognoni.

“Cultivo en invernadero”, 3ra edición, Madrid. (1991).

[2] Enoch H.Z.; Enoch Y.

The history and geography of the greenhouse. En: Ecosystems of the world, Greenhouse Ecosystems. Capítulo I, 1-15. (1999).

[3] Billie S. Britz,

Environmental Provisions for Plants in Seventeenth-Century Northern Europe Journal of the Society of Architectural Historians Vol. 33, No. 2, pp. 133-144. (May, 1974).

[4] P. Muñoz, A. Antón y J. Montero.

“Estructuras de invernaderos: Tipología y materiales”. En: Tecnología de invernaderos. Junta de Andalucía. Almería. España. (1998).

[5] INE “Superficie cultivada con hortalizas, año agrícola 2006/2007, por sistema de cultivo, según región, provincia y especie” [en línea] Chile, <<http://www.censoagropecuario.cl/noticias/07/11/13112007.html>>. Desglose del área de cultivos de tomate para consumo fresco en Chile y en la Región de Magallanes.

[6] INE “Número y superficie de las explotaciones censadas por tipo, según región, provincia y comuna” [en línea] Chile, <<http://www.censoagropecuario.cl/noticias/07/11/13112007.html>>.

[7] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) del Ministerio de Agricultura, Chile.

“Panorama de la Agricultura Chilena” (2012). Descripción general del sector silvoagropecuario del país.

[8] INDAP, Ministerio de Agricultura, Chile.

“Manual de Agricultura Orgánica para pequeños agricultores de la XII Región de Magallanes” (2007). [9] “Manual Práctico Cultivo de Hortalizas en Magallanes” (2010). INIA, Ministerio de Agricultura, Punta Arenas, Chile.

[10] Subiabre, José L., Yaguello, Julio, Irribarra, Alfredo, Mimica, Fernando. “Informe técnico n°1, Diseño y evaluación de invernaderos magallánicos” [en línea] Ministerio de Agricultura, Chile (2012) <[http://transparencia.minagri.gob.cl/descargas/2013/derecho\\_informacion\\_publica/registro\\_de\\_respuestas\\_de\\_solicitudes/Carta163\(05.04.2013\).pdf](http://transparencia.minagri.gob.cl/descargas/2013/derecho_informacion_publica/registro_de_respuestas_de_solicitudes/Carta163(05.04.2013).pdf)>

[11] Berninger, E.

“Cultures florales de serre en zone méditerranéenne française: Eléments climatiques et physiologiques”. Ed. INRA, PHM-Revue Horticole. Paris. (1989).

[12] Levanon, D., Motro, B., y Marchain, U.

“Organic materials degradation for CO<sub>2</sub> enrichment of greenhouse crops”. En: Carbon dioxide enrichment of greenhouse crops. Vol. 1 Enoc, H.C., Kimball, B.A. (Ed). CRC Press. Boca Ratón. USA. 123-145

[13] Yunus A.Cengel, Afshin J. Ghajar.

“Transferencia de calor y masa”. Fundamentos y aplicaciones. Cuarta edición.

[14] Nicolás Castilla.

“Invernaderos de Plástico”. Tecnología y manejo. Ediciones mundi-prensa, España. (2005).

- [15] Víctor Escalona C., Pablo Alvarado V., Hernán Monardes M., Claudio Urbina Z. y Alejandra Martín B.  
“Manual de cultivo de tomate”. Nodo hortícola, VI región, (2009).
- [16] Zabeltitz, C. V.  
“Greenhouse Structures” (1999). En: Greenhouse ecosystems. Stanhill, Enoch (Ed.). Elsevier. Amsterdam:17-79.
- [17] Giacomelli, G., Ting, K.C  
“Horticultural and engineering considerations for the design of integrated greenhouse production systems”, (1999). Acta Horticulturæ, 481:475-481.
- [18] Baille, A.  
“Energy Cycle”, (1999). En: Greenhouse ecosystems. Stanhill, G., Enoch, H.Z. (Eds.). Elsevier. Amsterdam: 266-285.
- [19] Escaff, Gil, Ferreyra, Estay, Bruna, Maldonado y Barrera. “Cultivo del Tomate bajo invernadero”. Boletín INIA Manual del cultivo del tomate, Chile. (2005).
- [20] Tesi, R. “Medios de protección para la hortofruticultura y el viverismo”. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. (2001).
- [21] Obando N. y McLeod B.  
Manual práctico: Cultivo de hortalizas en Magallanes. INIA, Punta Arenas, Chile, (2010).
- [22] Valera, D., Molina, F. y Álvarez, A.  
“Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos”. Universidad de Almería con la colaboración del Departamento de Biomasa del CENER para el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). España, (2008).

[23] Cárcamo Z., Fernández N., Gallardo G., Gallardo G., Tureuna T., Vidal G. e Yagello D.

“Eficiencia Energética en Invernaderos”, Informe final 1 proyecto eficiencia energética invernaderos en Magallanes, Chile. (2014).

[24] Butorovic, N.

Resumen meteorológico año 2015 Estación “Jorge C. Schythe”. Anales Instituto Patagonia Chile, (2016). Vol. 44(1):1-10.

[25] Explorador Solar para Autoconsumo. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile. <<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>>.

[26] Pieters, J. G. y Deltour, M.

“Modelling Solar Energy input in greenhouses”. Departament of Agricultural Engineering, Ghent University, (1999).

[27] Christian Von Zabeltitz.

“Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates”, Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control. (2010).

[28] Pieters, J. G. y Deltour, M.

“Performances of Greenhouses with the Presence of Condensation on Cladding Materials”. Departament of Agricultural Engineering, University of Ghent, (1996).

[29] Roy, J. C., Boulard, T., Kittas, C. y Wang, S.

“Convective and Ventilation Transfers in Greenhouses”, Part 1: the Greenhouse considered as a Perfectly Stirred Tank. (2002).

[30] Suhardiyanto, H. y Romdhonah, Y.

“Determination of Convective Coefficient at the Outside Cover of a Monitor

Greenhouse in Indonesia”. Department of Agricultural Engineering, Bogor Agricultural University, (2008).

[31] Serir, L., Benmoussa, H. y Bournet, P.E.

Numerical analysis of the influence of soil air convective heat transfer coefficient on the global indoor climate model of a plastic tunnel greenhouse

[32] S. H. Sengar, S. Kothari

Thermal modeling and performance evaluation of arch shape greenhouse for nursery raising. (2008)

[33] Yunus A. Cengel, Michael A. Boles

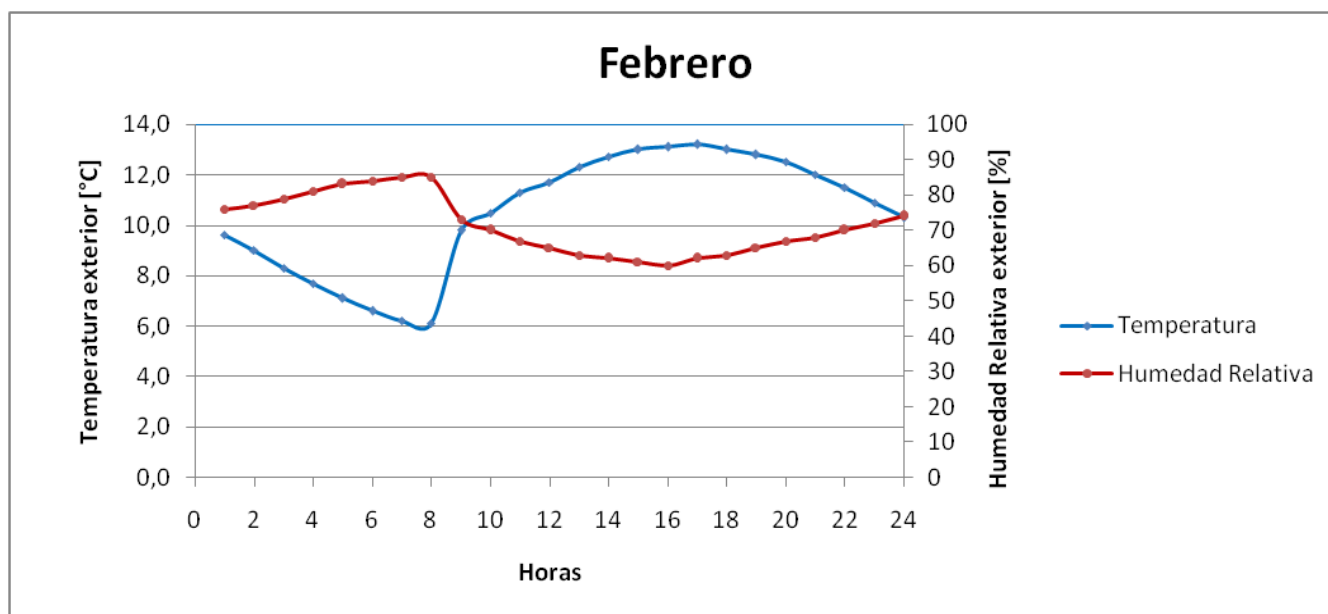
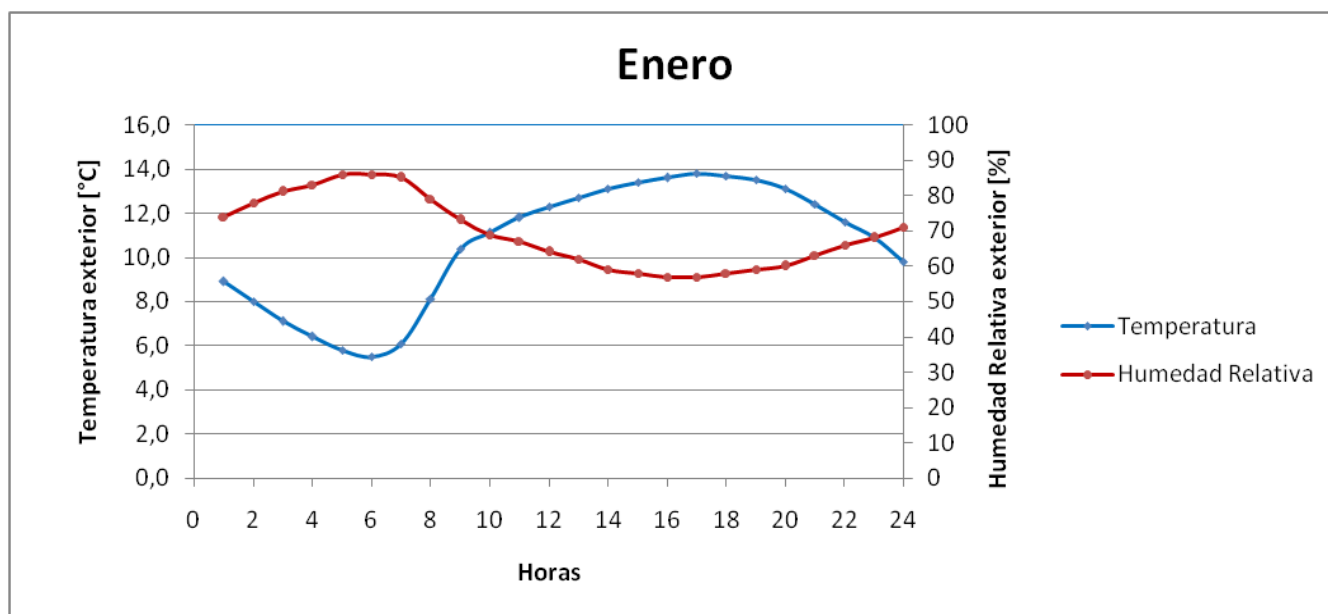
“Termodinámica”, sexta edición.

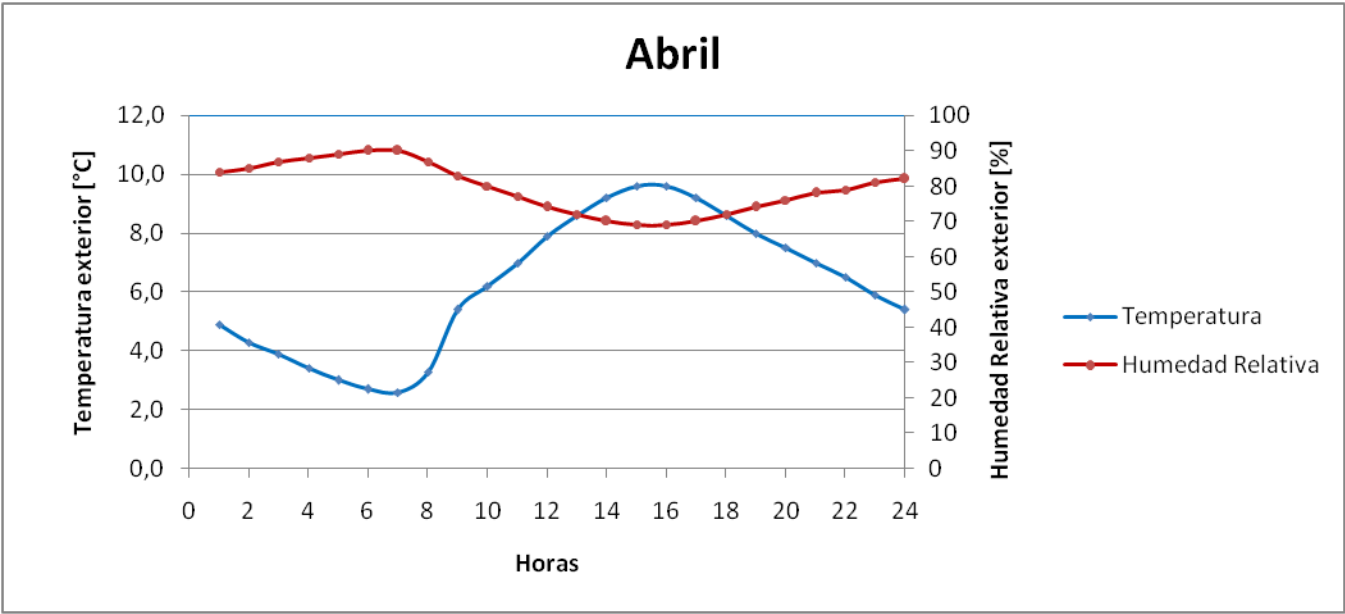
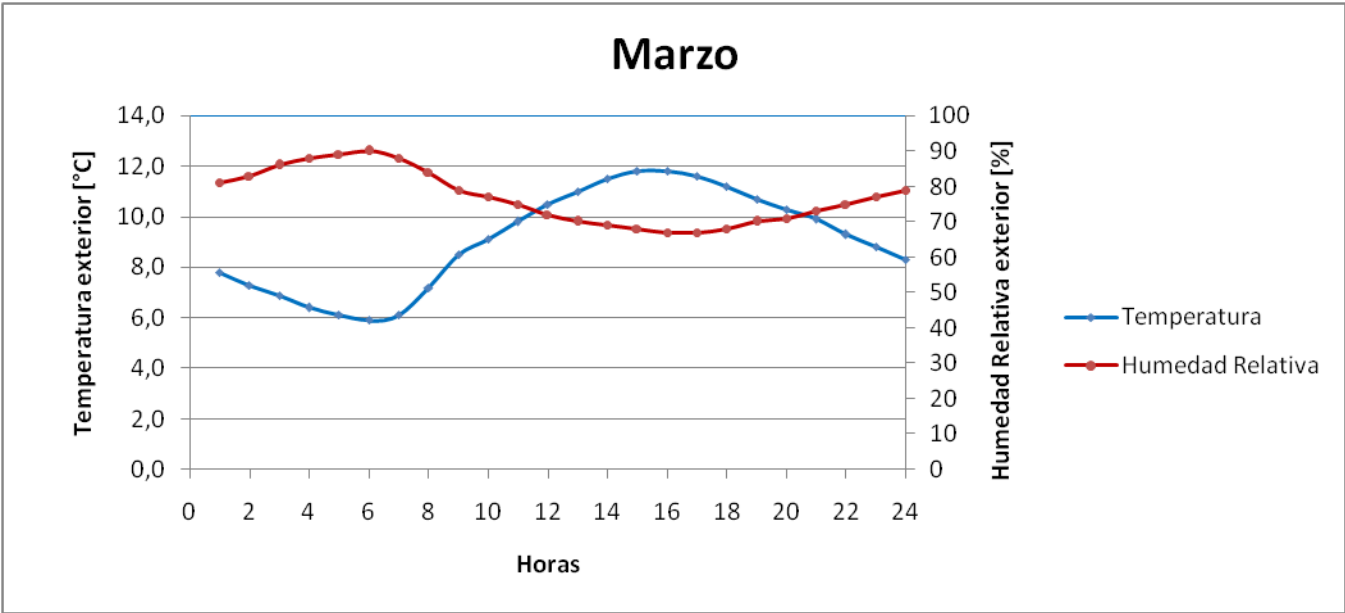
[34] Cárcamo Z., Fernández N., Gallardo G., Gallardo G., Tureuna T., Vidal G. e Yagello D.

“Eficiencia Energética en Invernaderos”, Informe final 2 proyecto eficiencia energética invernaderos en Magallanes, Chile. (2014).

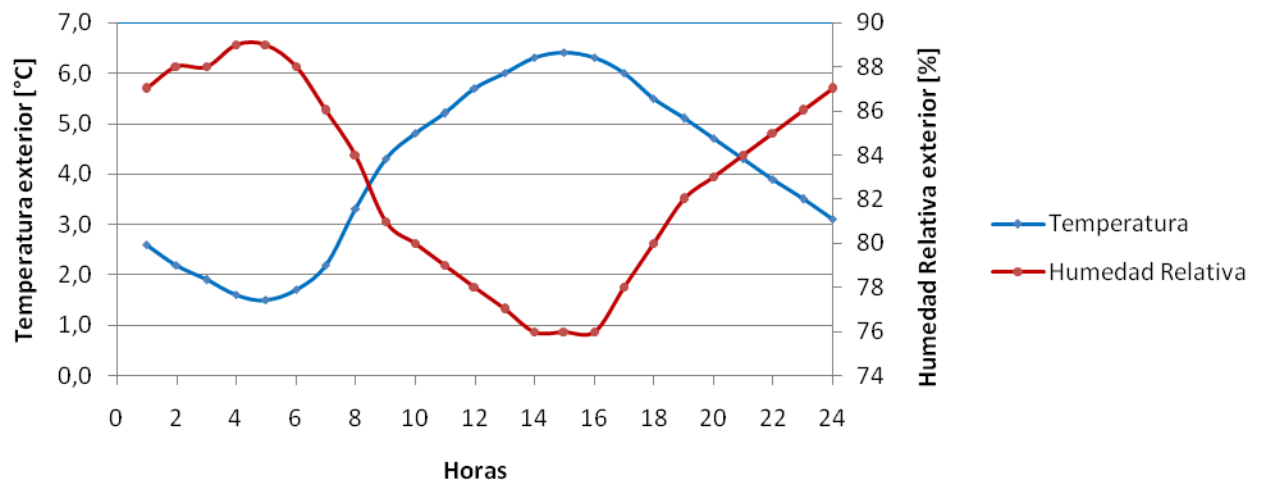


## ANEXO A

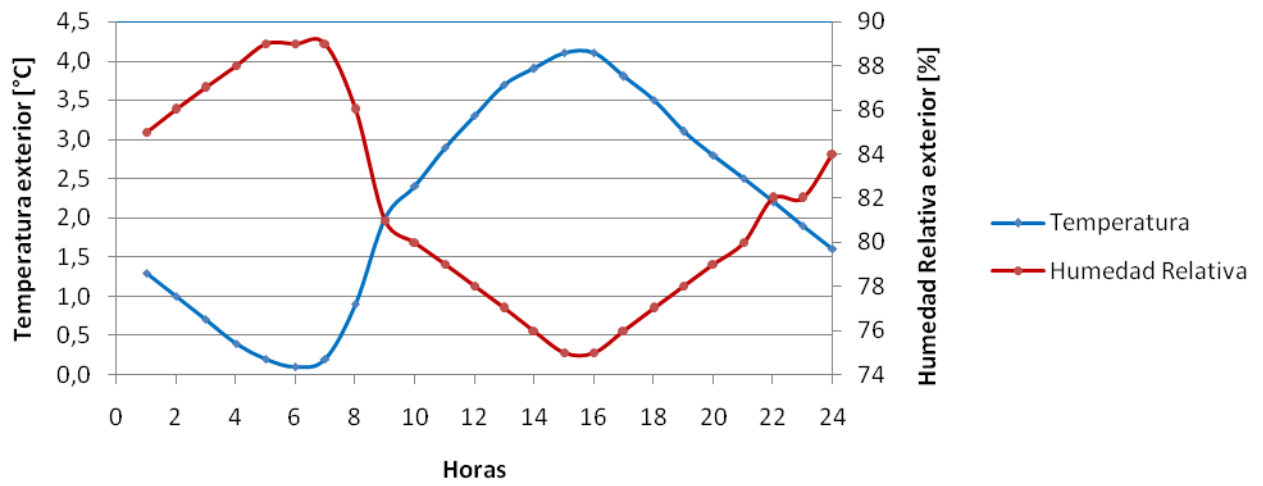




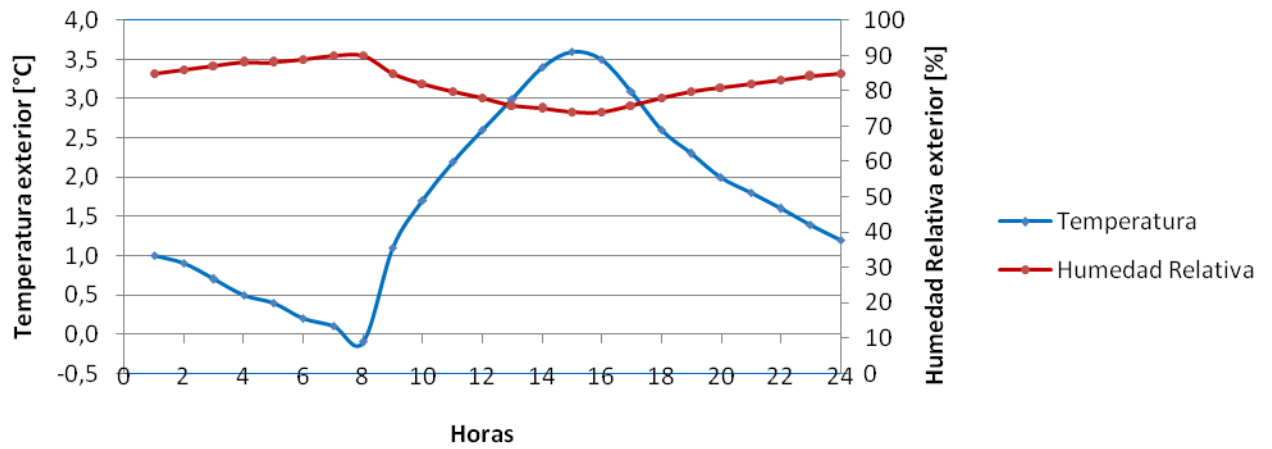
## Mayo



## Junio



## Julio



## Agosto

