

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**  
SANTA FE, ARGENTINA

Trabajo Final para optar por el grado académico:

Especialista en Cultivos Intensivos

**“Invernaderos en regiones tropicales y sub-tropicales**  
**Balance de energía, diseño y manejo del ambiente físico”**

Alumno: Ing. Agr. Leandro Federico De Pedro

Director: Dr. Ing. Agr. Carlos Alberto Bouzo

Esperanza, Santa Fe, Argentina

Noviembre 2015

## Índice

Resumen.....	Pag.3
Introducción.....	Pag.3
Desarrollo.....	Pag.4
1. Balance de Radiación.....	Pag.4
2. Balance de Energía.....	Pag.5
3. Balance energético en invernaderos.....	Pag.8
4. Sistemas de climatización en invernaderos.....	Pag.11
4.1. Calefacción.....	Pag.12
4.1.1. Sistemas convectivos.....	Pag.12
4.1.1.1. Generadores de aire caliente de combustión indirecta.....	Pag.12
4.1.1.2. Generadores de aire caliente de combustión directa.....	Pag.13
4.1.1.3. Aerotermos.....	Pag.13
4.1.2. Sistemas radiantes.....	Pag.13
4.1.2.1. Por calentamiento de agua.....	Pag.14
4.1.2.2. Por calentamiento de aire.....	Pag.14
4.1.3. Sistemas conductivos.....	Pag.14
4.1.3.1. Enterrados en el suelo.....	Pag.14
4.1.3.2. Apoyados sobre la superficie.....	Pag.14
4.1.4. Estufas a gas, gasoil y eléctricas.....	Pag.14
4.2. Enfriamiento.....	Pag.15
4.2.1. Ventilación.....	Pag.15
4.2.1.1. Ventilación natural.....	Pag.15
4.2.1.2. Ventilación forzada.....	Pag.17
4.1.2. Evaporación de agua.....	Pag.17
4.1.2.1. Pantallas evaporadoras.....	Pag.17
4.1.2.2. Humidificación del aire por agua a presión.....	Pag.18
4.1.3. Sombreado.....	Pag.18
4.1.3.1. Sistemas fijos o estáticos.....	Pag.18
4.1.3.1.1. Blanqueado.....	Pag.18
4.1.3.1.2. Embarrado.....	Pag.19
4.1.3.1.3. Cortinas fijas.....	Pag.19
4.1.3.2. Sistemas móviles.....	Pag.19
4.1.4. Plásticos fríos.....	Pag.19
4.3. Ahorro energético.....	Pag.20
4.3.1. Pantallas térmicas.....	Pag.20
4.3.2. Paredes dobles.....	Pag.20
4.3.3. Corta vientos.....	Pag.21
4.3.4. Energía solar pasiva.....	Pag.21
4.3.5. Láminas de agua o "Hidro-invernaderos".....	Pag.21
5. Invernaderos en zonas tropicales y sub-tropicales.....	Pag.21
5.1. Diseño de la estructura.....	Pag.23
5.2. Dimensiones.....	Pag.24
5.3. Orientación y forma de la techumbre.....	Pag.25
5.4. Ventilación.....	Pag.26
5.5. Sombreado.....	Pag.28
5.6. Material de cubierta.....	Pag.30
Bibliografía.....	Pag.30

# **Invernaderos en regiones tropicales y sub-tropicales**

## **Balance de energía, diseño y manejo del ambiente físico**

Ing. Agr. Leandro F. De Pedro<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Facultad de la Producción y el Medioambiente (Universidad Nacional de Formosa en convenio con el Gobierno de la Provincia – Instituto Universitario de Formosa, Laguna Blanca).

### ***Resumen***

El cultivo en invernadero requiere del conocimiento y empleo de diferentes técnicas de climatización para hacer viable la producción a lo largo del año. El estudio de los balances de radiación solar y energía, la dinámica de los fluidos y la temperatura de las plantas ofrece una base firme para la toma de decisiones para el diseño y manejo de estas estructuras productivas.

La radiación solar es el principal factor determinante del microclima de un cultivo, condicionando la temperatura del aire y del suelo, el viento, la evapotranspiración y la fotosíntesis. El balance de energía permite la comprensión del sistema y otorga fundamentos para el análisis ante cualquier situación. Indica de qué manera las plantas y el suelo utilizan y distribuyen la radiación neta para el calentamiento del aire, la evapotranspiración y el calentamiento del suelo.

Existen múltiples técnicas para el control del microclima en invernaderos y pueden agruparse como técnicas de calefacción, de enfriamiento y de ahorro energético. El uso de invernaderos avanzó enormemente en regiones de climas tropicales y subtropicales. Se analizaron algunas pautas de diseño, estructura, manejo y climatización necesarias para adaptarlos a la producción intensiva en el norte argentino, haciéndose énfasis en aquellas que sean reproducibles especialmente en el este de Formosa, según las características que toma el sector productivo hortícola en dicha provincia. Se propone un invernadero con las siguientes características: estructura en madera o palma; orientación noroeste-sureste; altura superior a 4,5 m; anchura máxima de 7 m (14 m para el caso de dos naves acopladas); techos simétricos de doble vertiente o con abertura cenital; ángulos de inclinación entre 25-35°; climatización mediante ventilación natural, sombreado con malla en el exterior de la estructura, móvil y separada del techo unos 10-15 cm, utilización de plásticos fríos (o NIR) para la cubierta del mismo.

### ***Introducción***

El cultivo en invernadero permite la obtención de primicias, la producción fuera de estación y el cultivo de ciertas especies vegetales donde, por cuestiones climáticas, resulta prácticamente imposible cultivarlas a campo, gracias a que se cuenta con un ambiente más o menos controlado. En muchas regiones productivas, su uso a lo largo del año requiere del conocimiento y empleo de diferentes técnicas de climatización para hacer viable esta producción controlada. Estudiar y comprender el balance energético de un invernadero permite interpretar como afectan los elementos del clima al ambiente interior que rodea a los cultivos bajo estas estructuras de producción en cada situación en particular. En este trabajo se presenta una introducción al balance energético en invernaderos, seguido de una breve descripción de los sistemas de climatización más comunes. Por último se proponen algunas adecuaciones para el diseño y

manejo de invernaderos para zonas de clima sub-tropical, en particular para el este de Formosa, provincia localizada al norte de la Argentina (Región NEA).

### ***Desarrollo***

En el estudio del comportamiento térmico de los invernaderos, es sumamente importante considerar el funcionamiento del microclima que se desarrolla dentro del mismo. Además el entendimiento de los factores que influyen en él, ofrece una base firme para la toma de decisiones que se relacionen con el diseño y manejo de estas estructuras productivas. Entre las aplicaciones específicas de la microclimatología en el manejo de los invernaderos está la determinación de la necesidad de la ventilación, el control de la temperatura y la humedad interna, y la composición de la atmósfera que rodea a los cultivos en su interior; conocer los flujos de radiación solar y de energía dentro del invernadero; predecir la temperatura y humedad del suelo; estimar la evaporación y la evapotranspiración de las plantas; determinar la actividad fotosintética y el intercambio de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) entre las plantas y la atmósfera; proteger a los cultivos de temperaturas extremas (adaptado de Ayra, 1988; citado por Jaramillo, 2005).

Relacionar los balances de radiación solar, balances de energía, balances hídricos, la dinámica de los fluidos y la temperatura de las plantas es la base de los estudios más recientes sobre el tema.

Es por ello que se presenta a continuación un breve análisis sobre los balances de radiación y energía vinculados a invernaderos y sus respectivos componentes.

#### ***1. Balance de radiación***

La radiación solar es el principal factor que determina el microclima de un cultivo. Su energía condiciona la temperatura del aire y del suelo, el movimiento del viento, la evapotranspiración y la fotosíntesis. De tal manera, la intensidad de la radiación, el grado de interceptación y la eficiencia en el uso de la energía radiante, son factores determinantes en la tasa de crecimiento de las plantas (Jaramillo, 1999).

La radiación solar es el proceso de transmisión de la energía del sol en el espacio, realizada por medio de ondas electromagnéticas, medida en micras ( $\mu$ ). Esta radiación es una emisión de ondas cortas con longitudes de onda que fluctúan entre  $0.2\mu$  y  $3.0\mu$ , y constituyen el 99% de la energía irradiada. Las longitudes de onda mayores a  $3.0\mu$  se consideran como de onda larga y corresponden a las irradiadas por la tierra según Heuvel dop *et al.* (1986; citado por Goyal & Ramírez, 2008).

Al ingresar a la atmósfera, la radiación electromagnética proveniente del sol, sufre procesos de reflexión, dispersión, absorción y/o transmisión. Según Bonhommer (1993; citado por Jaramillo, 1999) la absorción y dispersión selectiva de la radiación en la atmósfera, modifica la intensidad del flujo radiante y la calidad del espectro que incide en la superficie terrestre, dependiendo la magnitud de este fenómeno de la masa relativa de la capa gaseosa por la que atraviesa.

De esta manera se puede diferenciar a la *radiación difusa* como aquella dispersada y redistribuida a otras regiones del cielo antes de salir a la atmósfera o alcanzar la superficie terrestre, de la *radiación directa* (la que produce el brillo solar) que no sufre modificaciones en su dirección al pasar por la atmósfera. La suma de las cantidades de radiación difusa y directa se denomina *radiación global* (1), siendo estas dos radiaciones de onda corta (Becker & Weingarten, 1991; citados por Jaramillo, 1999).

$$R_g = R_D + R_d \quad (1)$$

En donde:

$R_g$ , radiación global;  $R_D$ , radiación directa;  $R_d$ , radiación difusa.

El *balance de radiación*, representado a través de la radiación neta ( $R_n$ ) está determinado a su vez por los balances de radiación de onda corta y onda larga. En ambos casos la magnitud se determina por la relación entre las radiaciones que ingresan y egresan. Se expresa en Joule por metro cuadrado por segundo ( $J.m^{-2}.seg^{-1}$ ), y se lo puede representar como:

$$R_n = R_c + R_l \quad (2)$$

En donde:

$R_n$ , radiación neta;  $R_c$ , balance de radiación de onda corta;  $R_l$ , balance de radiación de onda larga.

Un desarrollo del balance expresado en la ecuación (2) una vez simplificado puede expresarse mediante la siguiente ecuación planteada por Jaramillo y Dos Santos (1980):

$$R_n = (1 - \alpha).(KD \downarrow + Kd \downarrow) + (L \uparrow - L \downarrow) \quad (3)$$

En donde:

$R_n$ , radiación neta;  $\alpha$ , albedo (porción de la radiación de onda corta reflejada por la superficie);  $KD \downarrow$ , radiación directa de onda corta que entra a la superficie;  $Kd \downarrow$ , radiación difusa de onda corta que entra a la superficie;  $L \uparrow$ , radiación de onda larga (mayor de 3000nm) emitida por la superficie;  $L \downarrow$ , radiación de onda larga que llega a la superficie.

## 2. Balance de energía

La radiación neta es un término de balance energético y representa la diferencia entre la radiación solar entrante y la saliente, tanto de onda corta como de onda larga. El balance de energía dentro de cualquier agroecosistema permite conocer de qué manera las plantas y el suelo utilizan y distribuyen la radiación neta entre sus diferentes componentes.

Existen diversos modelos que, de manera simplificada, representan el balance conjunto de radiación y energía como Walker (1965), Walker *et al.* (1976), Kindelan (1980), Arinze *et al.* (1984), Boulard & Baille (1987) y Baille (1996) (citados por Valera *et al.*, 2008). A continuación se presenta el modelo utilizado por Jaramillo (2005) y Rosenberg (1974) (citados por Ramírez & Jamarillo, 2009):

$$R_n = \lambda E + H + G + P + M \quad (4)$$

En donde:

$R_n$ , radiación neta;  $\lambda E$ , flujo de calor latente empleado en evaporar agua ( $\lambda$ , calor latente de evaporación;  $E$  es la cantidad de agua evaporada);  $H$ , flujo de calor sensible, utilizado en calentar el aire;  $G$ , flujo de calor en el suelo;  $P$ , fotosíntesis;  $M$ , otros intercambios de energía (actividad metabólica y almacenamiento de calor en los tejidos de la planta).

Desde ahora la expresión  $\lambda E$  será reemplazada por  $L$  (flujo de calor latente para evaporación del agua).

Algunos autores como Torres (1995; citado por Goyal & Ramírez, 2008) expresan otros componentes dentro del balance energético:

$$R_n = L + H + G + M + Fe + Fs \quad (5)$$

En donde:

$Fe$ , es el flujo de entrada horizontal de calor (hacia el cultivo) y  $Fs$ , es el flujo de salida de calor (del cultivo hacia afuera).

Vale aclarar que los valores de  $P$ ;  $M$ ;  $Fe$  y  $Fs$  son muy bajos con relación a los otros y algunos se compensan, por lo que pueden omitirse. Además, los términos  $Fe$  y  $Fs$ , de alguna manera son considerados en el término de calor sensible ( $H$ ). Por lo tanto, simplificando la ecuación (5) y distribuyendo todos los términos en un miembro, el balance queda expresado de la siguiente manera:

$$R_n - L - H - G = 0 \quad (6)$$

El balance de energía así planteado es útil para establecer la proporción de la radiación neta ( $R_n$ ) que se emplea en el calentamiento del aire como flujo de calor sensible ( $H$ ), en la evapotranspiración expresado como flujo de calor latente ( $L$ ) y en el calentamiento del suelo a través de la componente de flujo de calor del suelo ( $G$ ). Así, cualquier modificación que afecte al microclima en estudio, afectará el balance de energía (Oleason *et al.*, 2004; Kjølgaard *et al.*, 1994; Wang & Davinson, 2007; citados por Ramírez & Jaramillo, 2009). Por otra parte, la importancia de este balance simplificado desde el punto de vista tecnológico, es que permite comprender el efecto de la realización de modificaciones técnicas que afecten a los términos del mismo y su manifestación por ejemplo sobre la temperatura de un invernadero.

Expresando la ecuación (3) en términos de balance de radiación y energía de un cultivo, se obtiene que:

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot R_c + \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot (T_a + 273)^4 - \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot (T_c + 273)^4 - \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_s + 273)^4 \quad (7)$$

En donde:

$R_n$ , radiación neta en ( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ );  $\alpha$ , albedo del suelo (valor de tabla);  $R_c$ , balance de radiación de onda corta ( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ );  $\varepsilon_a$ , emisividad del aire (0.98);  $\sigma$ , constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ );  $T_a$ , temperatura del aire ( $^{\circ}C$ );  $\varepsilon_c$ , emisividad del cultivo ( $0.72 + 0,005 \cdot T_a$ );  $T_c$ , temperatura del dosel ( $^{\circ}C$ );  $\varepsilon_s$ , emisividad del suelo;  $T_s$ , temperatura del suelo ( $^{\circ}C$ ).

Goyal y Ramírez (2008) citan, para cada componente de la ecuación (6), el balance energético según Annandale y Stockle (1994):

$$G = 0.1 \cdot R_n \quad (8)$$

En donde:

$G$ , densidad de flujo de energía en el suelo ( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ );  $R_n$ , radiación neta en ( $J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ).

$$H = \frac{\rho_a c_p \cdot (T_c - T_a)}{r_a} \quad (9)$$

En donde:

$H$ , flujo de calor sensible ( $\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ );  $\rho_a$ , densidad del aire ( $\text{kg.m}^{-3}$ );  $c_p$ , calor específico del aire ( $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ) a presión constante;  $r_a$ , resistencia aerodinámica ( $\text{s.m}^{-1}$ ).

El calor latente de vaporización se expresa a continuación según la ecuación propuesta por Stanghellini (1987):

$$L = \frac{\rho_a c_p}{\gamma(r_c + r_a)} \cdot (e_c - e_a) \quad (10)$$

En donde:

$L$ , flujo de calor latente ( $\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ );  $\gamma$ , constante psicrométrica ( $\text{Pa.K}^{-1}$ );  $e_c$  y  $e_a$ , presión de vapor en la superficie externa de la hoja y del aire (Pa) respectivamente;  $r_a$ , resistencia aerodinámica ( $\text{s.m}^{-1}$ );  $r_c$ , resistencia superficial o del cultivo ( $\text{s.m}^{-1}$ )

La resistencia aerodinámica ( $r_a$ ) describe la resistencia al transporte de calor y de vapor de agua desde la superficie evaporante al aire sobre el dosel, y depende de la distancia de la superficie a la altura del dosel, de la velocidad del viento y la estratificación térmica (Goyal & Ramírez, 2008). Mientras que la resistencia superficial o del cultivo ( $r_c$ ) describe la resistencia al flujo del vapor de agua a través de las hojas del cultivo y la evaporación de la superficie del suelo; esta resistencia tiene en cuenta factores de la planta como son la resistencia estomática y el índice de área foliar (IAF) (Ramírez & Jaramillo, 2009).

Analizando el balance energético en el transcurso del día, la radiación neta es positiva, mientras que, generalmente, el flujo de calor sensible y el flujo de calor latente son negativos:

$$R_n - L - H = 0 \quad (11)$$

El proceso inverso ocurre durante la noche, y en ambas situaciones obedece a lo que ocurre con el balance radiativo:

$$\begin{aligned} -R_n + L + H &= 0 \\ L + H &= R_n \end{aligned} \quad (12)$$

Existe una relación entre el calor sensible ( $H$ ) y el calor latente de evaporación ( $L$ ), que se conoce como el cociente de Bowen ( $\delta$ ), y se expresa de la siguiente manera:

$$\delta = \frac{H}{L} \quad (13)$$

Dicha relación permite calcular y conocer las pérdidas de calor sensible ( $H$ ), proceso que regula la temperatura de la hoja. Ramírez y Jaramillo (2009) expresan que cuando  $\delta$  es menor que 1, gran parte de la energía disponible en la superficie del cultivo pasa a la atmósfera como flujo de calor latente, es decir, como vapor de agua. De lo contrario, en aquellos casos donde la relación es muy baja o igual a cero, expresa que la temperatura de las hojas del cultivo es igual o muy semejante a la temperatura del aire circundante. Siempre que  $\delta$  tome valores negativos, sugiere que el agua que sale de las hojas por transpiración, enfría el aire cercano a la hoja y la temperatura del aire es menor que la temperatura de la hoja por pérdidas de calor, con una ganancia de calor y no una pérdida. Es así entonces que a través del ejemplo anterior, se advierte que el calor sensible y el latente no pueden medirse por separado.

Analizando algunas situaciones que pueden presentarse en un cultivo podríamos inferir que:

- Cuando no existan limitaciones en el suministro de agua por parte del suelo al cultivo, esta relación será baja ya que la evapotranspiración es el mecanismo de disipación de energía predominante, y además el más eficiente comparado con el flujo de calor sensible.
- En cambio, ante un estrés del tipo hídrico, los estomas de las hojas se cierran para evitar la pérdida de agua y la relación de Bowen tiende a infinito.
- Una reducción del área cubierta por cultivo (por ejemplo, como resultado de una poda) influye directamente en el aumento de la energía disponible para calentar el aire circundante como flujo de calor sensible ( $H$ ) y una disminución en la cantidad de energía que se emplea en evapotranspiración, como flujo de calor latente ( $L$ ), haciendo al cultivo elevar su temperatura como así también la temperatura del aire circundante. Por este motivo, en invernaderos sin cultivos o con cultivos con escaso desarrollo, la temperatura del aire es mayor que en la misma condición pero con un cultivo con una importante densidad foliar.
- Si por el contrario, la situación fuera de un ambiente con alta humedad relativa o prácticamente en su punto de saturación,  $L$  se hace prácticamente nulo, siendo  $H$  el único mecanismo para disipar la energía, con el mismo efecto que el caso anterior.

### 3. Balance energético en invernaderos

El conocimiento del balance energético, sus componentes y cómo incide éste en el microclima de los cultivos en su interior, permite la comprensión del sistema y otorga fundamentos para el análisis ante cualquier situación. Como expresan Wang y Boulard (2000), predecir el microclima dentro de un invernadero puede ayudar a los productores a gestionar la producción de cultivos y a los diseñadores mejorar los sistemas de ventilación y calefacción.

Muchos son los estudios realizados sobre el balance energético dentro de invernaderos (Garzoli & Blackwell (1981) y Al Jamal (1994) entre otros). A modo simplificado se presenta el modelo propuesto por Valera *et al.* (2008):

$$R_n + Q_{cli} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue} \quad (14)$$

En donde:

$R_n$ , radiación neta;  $Q_{cli}$ , energía ganada (o perdida) mediante el sistema de climatización;  $Q_{cc}$ , calor perdido (o ganado) por conducción-convección;  $Q_{ren}$ , calor sensible y latente perdido (o ganado) por renovación del aire interior;  $Q_{evp}$ , calor latente consumido en la evapotranspiración de las plantas y el suelo;  $Q_{sue}$ , flujo de calor perdido (o ganado) por la conducción a través del suelo.

Cuando se estudia el balance radiativo ( $R_n$ ) a nivel de invernadero, entran en juego factores, propios del material de cubierta, que inciden sobre la radiación que llega a las plantas, el suelo y, por consiguiente, sobre la radiación emitida desde estos hacia el exterior. En la ecuación presentada a continuación (Valera *et al.*, 2008) se considera que la radiación neta que calienta el invernadero es igual a la energía absorbida por la cubierta, por el suelo y las plantas menos la radiación emitida por la cubierta.

$$R_n = S_s \cdot [I \cdot (a + \tau \cdot a_s)] + S_c \cdot \sigma \cdot \tau_{ter} \cdot (\varepsilon_{atm} \cdot T_{atm}^4 - \varepsilon_{ter} \cdot T_{cb}^4) \quad (15)$$

En donde:

$R_n$ , radiación neta ( $J.m^{-2}.s^{-1}$ );  $S_s$ , superficie captadora de la radiación solar ( $m^2$ );  $I$ , radiación solar incidente ( $J.m^{-2}.s^{-1}$ );  $a$ , coeficiente de absorción de la cubierta para la radiación solar (valor de tabla);  $\tau$ , coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación solar;  $a_s$ , coeficiente de absorción de las plantas y el suelo;  $S_c$ , superficie de techo ( $m^2$ );  $\sigma$ , constante de Stefan-Boltzman ( $5,67 \times 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ );  $\tau_{ter}$ , coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación térmica;  $\varepsilon_{atm}$ , emisividad de la atmósfera;  $T_{atm}$ , temperatura de emisión de la energía de la atmósfera ( $^{\circ}K$ );  $\varepsilon_{ter}$ , emisividad del material de cubierta para la radiación térmica;  $T_{cb}$ , temperatura absoluta de la cubierta ( $^{\circ}K$ ).

El primer término de la ecuación (15) representa el balance de radiación de onda corta en el invernadero. Así la radiación de onda corta que incide sobre la superficie captadora de la radiación solar sufre procesos de absorción por parte de la cubierta, mientras que la que es transmitida hacia el interior del invernadero, es absorbida por las plantas y el suelo. Tanto el valor de  $a$  como de  $\tau$ , varían de acuerdo a qué tipo de material se trate, y pueden obtener de tablas (Tabla 1). En cuanto al coeficiente de absorción de las plantas, se halla una estrecha relación entre este valor y la fracción de suelo cubierto por las plantas y el índice de área foliar (IAF) del cultivo en el interior del invernadero. Por el lado del suelo, el índice de reflexión de la radiación solar o albedo ( $\alpha$ ) será el factor determinante.

El segundo término establece el balance de radiación de onda larga que escapa del invernadero. La fracción de la energía emitida por la atmósfera y la emitida por el material de cubierta están en función de su temperatura absoluta, mientras que, la parte de esta energía que logra escapar del invernadero, es función de las propiedades de transmisión para la radiación térmica del material de cubierta y la superficie ocupada por el mismo (Tabla 1). En este aspecto, el uso de superficies que se caracterizan por poseer un bajo coeficiente de emisividad ( $\varepsilon_{ter}$ ) son de gran utilidad como técnicas de ahorro energético, aspecto que se presentará posteriormente.

Tabla 1. Absorbividad ( $\alpha$ ), emisividad ( $\varepsilon$ ), transmisividad ( $\tau$ ) y reflectividad ( $\delta$ ) para diferentes tipos de radiación; coeficiente de pérdidas de calor (Kd) y densidad ( $\rho_c$ ) de los materiales comúnmente utilizados como cubierta de invernaderos (Adaptado de Valera *et al.*, 2008)

Materiales utilizados en cubiertas simples, en dobles paredes o como pantallas térmicas	Ref	Espesor (mm)	Radiación solar (300-2500 nm)			Radiación visible (380-760 nm)			Radiación térmica (2500-40000 nm)			K <sub>d</sub>	$\rho_c$
			( $\alpha=\varepsilon$ )	( $\tau$ )	( $\delta$ )	( $\alpha=\varepsilon$ )	( $\tau$ )	( $\delta$ )	( $\alpha=\varepsilon$ )	( $\tau$ )	( $\delta$ )		
Vidrio hortícola (VH)	2;4	4	0,03	0,89	0,08	0,01	0,91	0,08	0,9	0,00	0,10	6,7	2,4
PVC rígido	7;6	18	0,11	0,62	0,27	0,02	0,61	0,37	0,92	0,01	0,07	3,8	1,3
Polietileno sin aditivos (PE)	4;7;6	0,1	0,01	0,88-0,11	0,08-0,11	0,01	0,88-0,91	0,08-0,11	0,04-0,19	0,79-0,84	0,02	9,1	0,92
Polietileno de baja densidad (PEbd)	1;7;2	0,18	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,1	0,13-0,4	0,53-0,8	0,07	9,4-16,2	0,91
Polietileno de larga duración (PEld)	7;2	0,1	0,03	0,88	0,09	0,01	0,89	0,1	0,2-0,2	0,53-0,76	0,04-0,07	9,4-16,2	0,92
Polietileno infrarrojo (PEir)	8;4	0,1	0,03	0,89	0,08	0,01	0,89	0,1	0,77	0,2	0,03	8,6-13	0,92
Polietileno térmico (PEt)	1;4	0,18	0,03	0,89	0,08	0,02	0,9	0,08	0,8	0,1	0,03	8,6-13	0,92
Copolímeros EVA	7;6	0,1	0,02	0,89-0,91	0,07-0,09	0	0,9-0,92	0,08-0,1	0,42-0,58	0,39-0,55	0,03	7,8	0,94
PE+EVA	7;2	0,1+0,1	0,03	0,87	0,1	0	0,88	0,12	0,59-0,7	0,27-0,38	0,03	9,4-10,2	
Pantalla aluminizada	1	0,04						0,5	0,1	0,4		7,6	

en ambas caras													
1. Feuilloley <i>et al.</i> , 1989		4. Nijskens <i>et al.</i> , 1989		7. Nisen y Coutisse, 1981									
2. Feuilloley <i>et al.</i> , 1994		5. Nijskens <i>et al.</i> , 1984 a.		8. Nisen <i>et al.</i> , 1984									
3. Feuilloley y Issanchou, 1996		6. Nijskens <i>et al.</i> , 1984 b.											

El flujo calor que pasa por la superficie de la cubierta y es perdido, o ganado, por conducción-convección ( $Q_{cc}$ ), responde principalmente a un gradiente de temperatura entre el interior y el exterior del invernadero, y a un coeficiente global de pérdidas que asume valores propios para cada invernadero. Este último depende del espesor, conductividad térmica y temperatura del material de cubierta, como así también de la temperatura del aire.

Según Valera *et al.* (2008) puede expresarse como:

$$Q_{cc} = S_d \cdot K_d \cdot (t_i - t_e) \quad (16)$$

En donde:

$S_d$ , superficie de la cubierta (paredes y techo) del invernadero ( $m^2$ );  $t_i$ , temperatura interior ( $^{\circ}C$ );  $t_e$ , temperatura exterior ( $^{\circ}C$ );  $K_d$ , coeficiente global de pérdidas de calor por conducción-convección ( $W \cdot m^2 \cdot ^{\circ}C^{-1}$ ). Este coeficiente depende del material de cubierta, de la hermeticidad del invernadero, del sistema de calefacción, del sistema de riego, de la velocidad del viento, de la cantidad de nubes que cubran el cielo y de la precipitación (FAO, 2000). En la Tabla 1 se presentan algunos valores de  $K_d$  para diferentes materiales de cubierta.

En los invernaderos, la entrada de aire procedente desde el exterior supone una pérdida o ganancia de energía. El término  $Q_{ren}$  corresponde al calor sensible y latente perdido, o ganado, por la renovación del aire interior, y obedece a la diferencia de temperatura y humedad entre el interior y el exterior. El volumen del invernadero (cantidad de aire que encierra, en  $m^3$ ), la tasa de renovación del aire (con ventanas abiertas o cerradas, infiltración, en  $h^{-1}$ ), la presión dentro del invernadero (función de la elevación sobre el nivel del mar, en atm), son determinantes en la ganancia o pérdida de energía por este mecanismo. Cuando el objetivo es evitar la excesiva pérdida de energía de un invernadero (por ejemplo en invierno), la renovación del aire debe ser la menor posible, y aquí es importante conservar la hermeticidad del invernadero. Esto implica que las roturas o las deficiencias constructivas pueden incrementar excesivamente esta pérdida.

Como se mencionó anteriormente, uno de los mecanismos más importantes que tienen los cultivos para disipar la energía incidente es mediante la transpiración. Dependiendo de la especie que se trate (coeficiente  $K_c$  específico), en que momento de su desarrollo se encuentre, el déficit de presión de vapor dentro del invernadero, la radiación incidente sobre el cultivo y la velocidad del viento dentro del invernadero, y considerando ahora el sistema conformado por el cultivo y el suelo, se determinará la cantidad de calor absorbido para provocar el cambio de estado del agua de líquida a vapor mediante la evapotranspiración ( $Q_{evp}$ ).

Por último, se estima que aproximadamente el 10% de las pérdidas de calor en un invernadero, se producen a través del suelo (Valera *et al.*, 2008). El flujo de calor ganado, o perdido, por conducción a través del suelo ( $Q_{sue}$ ) depende de la temperatura del suelo dentro del invernadero, la profundidad a la que se estima la diferencia de temperatura y de un coeficiente de intercambio térmico ( $K_s$ )

La importancia de conocer el balance energético en un invernadero radica en que constituye una herramienta sumamente útil a la hora de determinar la cantidad de energía que es necesaria eliminar (o ceder) al invernadero mediante el o los sistemas de refrigeración (o calefacción) con

los que se cuente. Dicho de otra manera, es una técnica de manejo de invernaderos que todo especialista debería conocer para hacer eficiente el uso de los recursos en los cultivos forzados. Como expresa Fidaros *et al.* (2010) en su trabajo, muchos de los modelos climáticos dinámicos (cita a Kindelan, 1980 y Bot, 1983) que representan la entrada de energía y las necesidades de climatización en los invernaderos, son indispensables para comprender el comportamiento térmico en el interior de estas estructuras.

Se impone ahora la necesidad de conocer los sistemas de climatización de invernaderos más utilizados. A continuación se presenta una clasificación y breve descripción de los sistemas que permiten el control climático bajo estas estructuras.

#### **4. Sistemas de climatización en invernaderos**

La producción bajo invernaderos requiere de múltiples técnicas para el control del medio físico que rodea a los cultivos. Un clima adecuado mejora la productividad y la calidad de las cosechas (Melián & Cámara, 2003). El control de la temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub> son variables climáticas que afectan el desarrollo de las plantas, reflejado en los resultados de producción, tanto en cantidad como en calidad (Ocampo *et al.*, 2014). Estas tres variables (temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>) son las resultantes de los procesos de transferencia de energía y masa que se establecen entre el volumen de aire y los diferentes comportamientos del invernadero (cubierta, dosel vegetal y suelo o sustrato) (Baille & González-real, 2002; citado por Melián & Cámara, 2003).

En su trabajo Elsner *et al.* (2000) enumeran de una manera muy generalizada, los requerimientos climáticos de las especies normalmente cultivadas en invernaderos. Los aspectos más importantes son:

- a. Las plantas no soportan heladas (temperaturas por debajo de 0°C), pudiendo incluso morir. El riesgo de temperaturas letales dentro de los invernaderos es mínimo cuando la temperatura del aire exterior es superior a 7°C.
- b. Las plantas que crecen bajo la protección de un invernadero, lo hacen perfectamente en un rango de temperatura que varía entre 17 y 27°C.
- c. Si la temperatura exterior registra valores inferiores a 12°C, el invernadero debe ser calefaccionado, principalmente por la noche. Mientras que si la temperatura exterior supera los 22°C, se hace necesario el empleo de refrigeración artificial. Con temperaturas entre 12 y 22°C, la ventilación natural es suficiente.
- d. El umbral máximo de temperatura para los cultivos se encuentra entre 35 y 45°C.
- e. Es deseable un mínimo de 500 a 550 h de brillo solar durante los tres meses que dura el invierno. Esto corresponde aproximadamente a una insolación diaria de 2300 W.h.m<sup>-2</sup>.día<sup>-1</sup>, con un mínimo de 1000 W.h.m<sup>-2</sup>.día<sup>-1</sup>. Si no se cumple este requerimiento se debe utilizar iluminación artificial.
- f. El umbral térmico mínimo del suelo es 15°C.
- g. Cultivos de tomate, pimiento, pepino, melón y porotos, requieren temperaturas nocturnas medias entre 15 y 18.5°C.
- h. Entre 70 y 90% de humedad relativa se considera como un rango seguro.

Aunque los límites del crecimiento citados anteriormente dependerán de cada situación en particular (tecnología disponible, recursos, costos de producción), y pueden ser muy discutidos, son útiles a modo orientativo para definir los criterios de climatización.

Existe una gran variedad de sistemas utilizados para el manejo del clima en los invernaderos, por lo que la clasificación de los mismos puede variar entre autores (Tesi, 2001; Valera *et al.*, 2008; Lopez *et al.*, 2001; Montero, 2012; FAO, 2000). A continuación se presentan y describen brevemente de los sistemas más utilizados para el control climático en invernaderos:

#### **4.1. Calefacción**

Las condiciones climáticas del invierno, en la mayoría de las regiones productivas donde se utilizan los invernaderos, no posibilitan el cultivo al aire libre de muchas especies (ejemplo melón y pimiento), razón por la cual se utilizan los medios de protección. El cultivo extratemprano y extratardío sólo puede lograrse en base a la reducción de pérdidas de calor, principalmente por la noche (aumentando la hermeticidad del invernadero, usando paredes dobles o pantallas térmicas), o calentando artificialmente con fuentes de energías tradicionales o no convencionales como la energía solar o geotérmica, por ejemplo (FAO, 2000).

A partir del balance de pérdidas presentado en la ecuación (14) se puede deducir la cantidad de calor  $Q_{cli}$  ( $\text{kCal}\cdot\text{h}^{-1}$  o  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{C}^{-1}$ ) a ser suministrada al invernadero por el sistema de calefacción utilizado. Para un cálculo aproximado de  $Q_{cli}$  puede utilizarse la fórmula (16) indicada para la valoración de las pérdidas por conducción–convección ( $Q_{cc}$ ) adoptando el coeficiente de transmisión global  $K_d$  correspondiente (Tabla 1). El valor de temperatura exterior ( $t_e$ ) que se utiliza para el cálculo viene dado por la mínima observada para la zona, mientras que el valor de la temperatura interior ( $t_i$ ) representa la temperatura nocturna óptima para el crecimiento del cultivo. A los fines de lograr un mayor grado de seguridad, el valor de  $t_e$  debiera corresponder a la temperatura mínima absoluta, aunque esto represente un encarecimiento en la capacidad calorífica requerida.

Algunos autores (Tesi, 2001) aconsejan aumentar las necesidades calculadas en un 30% como margen de seguridad. Stanhill (1981, citado por Lopez *et al.*, 2001) contabilizó las entradas al sistema invernadero (fertilizantes, agua, plantas y calefacción, entre otros) en unidades de energía, determinando que las necesidades de los invernaderos con calefacción en Inglaterra superaban en 40 veces la de los invernaderos sin calefacción en Israel, correspondiendo a la calefacción el 80% del total de la energía consumida. De allí se toma magnitud de la importancia de contabilizar las necesidades energéticas derivadas de la calefacción y hacer eficiente el uso de la energía.

Entre los sistemas más difundidos para calefaccionar invernaderos, se pueden citar:

##### **4.1.1. Sistemas convectivos**

Son sistemas en los que el elemento conductor del calor es el aire. Debido a su poca inercia, proporcionan un aumento rápido de la temperatura del aire, enfriándose de igual forma cuando dejan de actuar. Se localizan normalmente sobre el cultivo (Lopez *et al.*, 2001). A los sistemas convectivos a su vez se los puede clasificar como:

**4.1.1.1. Generadores de aire caliente de combustión indirecta:** Un cambiador de calor separa los gases que se generan en la combustión expulsándolos al exterior, e introduciendo al invernadero únicamente el aire caliente. Poseen un rendimiento del 60 al 70% (parte del calor es expulsado con los gases de la combustión) (Bouzo, comunic. pers., 2014). La descarga del aire caliente puede ser directa o a través de mangas (ej. mangas de polietileno). Existen sistemas de recuperación del calor de los humos de escape, donde su energía calorífica se puede aprovechar

para calentar el aire que se utiliza en la combustión (precalentadores) alcanzando valores de eficiencia de rendimiento mayores.

**4.1.1.2. Generadores de aire caliente de combustión directa:** En este caso el aire caliente como los gases de la combustión son introducidos al invernadero (rendimiento 100%), por lo que el combustible debe ser lo menos tóxico posible (generalmente propano y gas natural). Lopez *et al.* (2001) no han encontrado síntomas de toxicidad ni mermas en la producción con la utilización de estos sistemas en invernaderos poco herméticos tipo “parral”, sin embargo, en invernaderos más herméticos (de arco), el sistema de aire caliente por combustión directa provocó en el cultivo de judía síntomas de toxicidad como reducción de la superficie foliar y longitud del tallo y aborto de frutos. Los niveles alcanzados de CO<sub>2</sub> superan las 5500 ppm durante los períodos más fríos, siendo esta concentración de CO<sub>2</sub> extremadamente alta, provocando la inhibición de la fotosíntesis por acumulación de almidón en el cloroplasto. Consecuentemente, el uso de estos sistemas debe estar condicionado a un control de los gases de combustión y a trabajar en regímenes de calor bajos o de mantenimiento ( $t_i - t_e = \Delta t$  pequeños), procurando ventilar para evitar toxicidad a las personas y plantas.

**4.1.1.3. Aerotermos:** Están constituidos por una caldera o unidad generadora de calor que por presión ingresa agua caliente a una sistema de distribución, conformando una serpentina situada en el mismo aerotermo (batería radiante de acero) y un sistema de impulsión del aire caliente mediante ventilación forzadas (intercambiador de calor). Presentan una rápida y uniforme distribución del calor, fácil regulación y generan menor condensación de la humedad sobre las paredes. Determinan además una menor desecación del aire conservando los niveles de humedad relativa elevados y constantes (Tesi, 2001). En la literatura citada se nombran efectos fisiológicos positivos por el hecho de que el movimiento del aire determina un mayor intercambio gaseoso a nivel de estomas. Además, se trata de sistemas de calefacción en donde no existe ningún riesgo de fitotoxicidad en los cultivos. Los hay de flujo vertical (elemento en el centro del invernadero y el aire caliente orientado hacia abajo) y horizontal (elemento dispuesto sobre la pared del invernadero). También pueden ser acoplados a los “fan-jet”, canalizando el aire mediante mangas plásticas perforadas, a 60cm de distancia, con mejor uniformidad en la distribución (Tesi, 2001). A pesar de las ventajas anteriormente citadas, no son sistemas difundidos en los invernaderos de gran superficie, por la complejidad que representa la conducción de agua caliente y la inversión inicial en el sistema de generación de calor (caldera).

#### **4.1.2. Sistemas radiantes**

Constituidos por una central térmica que proporciona el calentamiento del agua, vapor, aire o cualquier otro fluido, que introducidos en tuberías adecuadas, simples o con aletas, permiten el calentamiento del aire y los objetos (suelo, planta, contenedores, cubierta, etc.) que se encuentran a su alrededor por convección e intercambio radiativo. La distribución del calor depende de la disposición de los tubos que irradian y de su superficie, ya que se trata de un sistema estático. Por lo general, la distribución del calor es lenta y produce gradientes importantes de temperatura en el plano vertical, mientras que el enfriamiento de ambiente también es lento, y ante una eventual interrupción de su funcionamiento no producen variaciones peligrosas de la temperatura (Tesi, 2001).

Las tuberías pueden estar dispuestas sobre el cultivo, a nivel del suelo, o por debajo de las bancadas en invernaderos donde el cultivo se realice sobre éstas (en las dos últimas alternativas

sin hacer contacto con el suelo o mesadas respectivamente). Los sistemas radiantes pueden funcionar:

**4.1.2.1. Por calentamiento de agua:** Los sistemas pueden trabajar con agua caliente a baja temperatura (entre 30 y 50°C), agua a alta temperatura (90°C), o agua sobre calentada (120-140°C), en función del material utilizado para la construcción de las tuberías (plástico o metal). Otros sistemas utilizan vapor de agua a baja (0,5 atm), media (3 atm) o alta (>3 atm) presión, así como aceite diatérmico (250-280°C) (Tesi, 2001).

**4.1.2.2. Por calentamiento de aire:** Poseen menor inercia térmica que los sistemas por calentamiento de agua aunque, ante una interrupción en el funcionamiento normal del sistema, logran recuperar la temperatura de consigna en menor tiempo que los anteriores.

### **1.3. Sistemas conductivos**

En éstos, el calentamiento del suelo, sustrato o contenedores en contacto con el sistema de calefacción se produce por conducción. Es importante remarcar que dichos sistemas son eficientes únicamente trabajando por conducción ya que la emisión térmica por parte del suelo calentado es pequeña, e insuficiente, para producir calentamiento del ambiente. Según Fortsch (1967; citado por Tesi, 2001) solamente cuando la temperatura del suelo es superior en 5°C a la del aire, más del 5% de las necesidades térmicas del ambiente pueden ser suministradas por el suelo.

La calefacción puede hacerse por medio de resistencias eléctricas o con tuberías con agua caliente y se aplica sobre todo en el cultivo de plantas ornamentales, en la preparación de bancadas de enraizamiento o en cultivo forzado (Tesi, 2001). Este tipo de sistema cobra gran importancia en el “calentamiento basal” como técnica de forzado de cultivos.

Para el cálculo de la cantidad de calor necesaria para calentar un determinado volumen de suelo o sustrato se debe tener en cuenta su calor específico que depende de la textura y varía con el contenido de agua del mismo.

Así, podemos tener sistemas conductivos:

**4.1.3.1. Enterrados en el suelo:** La tubería se encuentra enterrada en el suelo, por ejemplo, a 35cm de profundidad. Se utiliza sobre todo en el cultivo de plantas ornamentales en maceta apoyadas en el terreno. Se habla de calentamiento “del pavimento” cuando se realiza con baldosas o cemento sobre el suelo.

**4.1.3.2. Apoyados sobre la superficie:** Los tubos van sobre la superficie del suelo o de las banquetas. Es menos eficaz para elevar la temperatura del suelo que el anterior, pero estimula el crecimiento de las plantas, influyendo más sobre la temperatura interna. Presentan la ventaja de ser removidos fácilmente cuando sea necesario el laboreo del suelo.

### **4.1.4. Estufas de gas, gasoil y eléctricas**

Son utilizadas sobre todo para la lucha contra heladas en aquellas zonas donde la duración de la calefacción es limitada y no justifica la instalación de un sistema más complejo, como en invernaderos de poca superficie.

Las estufas a gas se denominan “quemadores” y utilizan propano, permaneciendo generalmente los residuos de la combustión en el interior del invernadero con las posibles consecuencias nombradas anteriormente si los gases no son tratados. Además el propano al quemarse libera CO<sub>2</sub>

y agua (además de calor) por lo cual es necesario un estricto control de la humedad relativa en el invernadero. Poseen la ventaja de ser de costo relativamente bajo y móviles, pero su costo de funcionamiento (propano) es elevado.

Aquellas estufas que queman gasoil o querosene, poseen un menor costo de funcionamiento, pero mayor peligro de intoxicación. Las estufas eléctricas tienen menores inconvenientes de ese tipo pero su costo suele ser elevado y generan un gran consumo de energía.

## **4.2. Enfriamiento**

En numerosas regiones del mundo donde se practica el cultivo en invernaderos ocurre que durante el período más cálido, o durante gran parte del año, la temperatura en el interior del invernadero se encuentra por encima de la temperatura exterior y de las máximas permitidas para un normal crecimiento y desarrollo del cultivo en su interior. Este fenómeno limita las posibilidades de utilizar el invernadero en el período estival, generando mayores costos de producción por la instalación ociosa. Por ello es necesario eliminar el exceso de temperatura o al menos buscar medios para prevenir su incremento, así como conocer las especies que se adapten mejor a elevadas temperaturas (Tesi, 2001).

Al igual que para el caso de la calefacción, las necesidades de enfriamiento de un invernadero pueden ser estimadas mediante la ecuación (14), pero en este caso  $Q_{cli}$  hará referencia a la cantidad de calor que es necesario eliminar del invernadero ( $kCal.h^{-1}$  o  $W.m^{-2}C^{-1}$ ) y los demás términos indicarán el aporte que hace cada mecanismo de disipación de la energía para recudir la temperatura del ambiente en el interior.

Entre los sistemas más extendidos para reducir la temperatura en los invernaderos, se pueden citar:

### **4.2.1. Ventilación**

Este método consiste en la aireación del invernadero para modificar la temperatura y humedad del aire en su interior, recomponer la concentración de  $CO_2$  durante el período diurno y, en algunos cultivos, favorecer la polinización y fructificación. Si se analiza desde el punto de vista del balance energético, el viento remueve la capa de aire saturada de humedad que rodea al cultivo, incrementado el déficit de presión de vapor entre este y la atmósfera, lo que implica un aumento de la transpiración y por ende en la disipación de la energía en forma de calor latente. Algo similar ocurre con el flujo de calor sensible al renovarse el aire del ambiente, debido al incremento en el gradiente de temperatura que se origina.

Es sumamente importante considerar que, cualquiera sea el método de ventilación utilizado, debe existir un equilibrio entre una conveniente reducción de la temperatura y humedad, y una adecuada condición para el crecimiento de las plantas en el interior, es decir, evitar los daños mecánicos. Con el fin de evitar saltos excesivos de temperatura, la acción de aireación debe ser iniciada cuando la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior sea mínima.

La ventilación de un invernadero puede ser realizada mediante métodos naturales o pasivos, o también mediante sistemas activos o forzados.

**4.2.1.1. Ventilación Natural:** También denominada pasiva o estática, y hace referencia a la circulación del aire sin intervención de medios artificiales como ventiladores, sino como efecto de la *distribución de presiones* en la superficie de la estructura debido al viento, que crea zonas de presión positiva y negativas en la cubierta (efecto dinámico), y/o la *diferencia de temperatura* y por lo tanto de presión positiva y negativa en la cubierta (efecto estático). El efecto dinámico o

eólico tiene más importancia que el efecto térmico (FAO, 2000). Antón y Montero (2002) expresan que el efecto estático tan sólo tiene importancia con velocidades de viento inferiores a 2 m.s<sup>-1</sup>. En los días calurosos y soleados, con viento calmo (inferior a los límites mencionados) cobra relevancia el efecto “chimenea” (o flotabilidad, de su término inglés “buoyancy”). Elsner *et al.* (2000) lo explican como aquel fenómeno que se da cuando el gradiente de presión es generado por la diferencia de densidad entre masas de aire con diferente temperatura. El aire más pesado, más frío, se mueve hacia abajo por efecto de la gravedad y reemplaza el aire más caliente, que es forzado a moverse hacia arriba por su menor densidad y mayor cinética molecular. Si el invernadero está equipado con aberturas de ventilación, tanto cerca del nivel del suelo (lateral) como en el techo (cenital), se reemplaza el aire caliente, interno, por el externo, más frío. El aire exterior fresco entra en el invernadero a través de las aberturas laterales, mientras que el aire interior, más caliente, sale a través de las aberturas cenitales. En este caso, ocurre un efecto “acoplado” de ventilación por diferencia de presión con la ocurrida por efecto de flotación por diferencial de temperatura.

Como en todos los casos, existe en el mercado una gama de tecnología disponible para el manejo de la ventilación natural, encontrándose desde los invernaderos con apertura manual de las ventanas, hasta aquellos donde la misma se realiza de manera mecanizada y provistos de automatismos conectados a sensores de temperatura, humedad y viento; sistemas donde la apertura puede ser del tipo “todo o nada” o de posiciones intermedias mediante reguladores de acción modulada (Tesi, 2001).

A continuación se indica, de manera resumida, una serie de recomendaciones propuestas por Valera *et al.* (2008) para optimizar el funcionamiento de la ventilación natural:

- Los invernaderos equipados con ventanas cenitales o ventanas cenitales y laterales, son más eficientes en la ventilación natural que aquellos equipados únicamente por ventanas laterales.
- Disponer como mínimo de una superficie de ventilación del 20 al 35% de la superficie de suelo cubierta. Con el fin de facilitar el efecto “chimenea”, 1/3 de la superficie de ventilación debe estar compuesto por ventanas cenitales.
- Es conveniente orientar el invernadero de forma que las ventanas se sitúen perpendicularmente a los vientos predominantes en el período estival.
- Evitar la presencia de edificios o árboles que obstaculicen el flujo natural de aire por las ventanas.
- Las ventanas laterales de barlovento producen mejor ventilación cuando se sitúan cerca del suelo y tienen mayor tamaño que las cenitales.
- Es importantes tener ventanas cenitales que abran a barlovento como a sotavento para asegurar una máxima ventilación en diferentes condiciones climáticas.
- Las ventanas deben cerrar herméticamente para evitar infiltraciones durante los períodos fríos.
- De utilizar mallas anti-insectos en las aberturas del invernadero, éstas deben tener una porosidad superior al 40% para no disminuir en exceso la ventilación natural, o bien preverse la reducción de la renovación de aire mediante un incremento de la superficie de ventanas (de ser dimensionalmente y estructuralmente posible).
- Apertura de las ventanas gradual y en función de las condiciones ambientales del invernadero. El sistema debe permitir el cierre ante la posibilidad de lluvias y/o vientos fuertes.

**4.2.1.2. Forzada:** También llamada artificial o mecanizada, y hace referencia a aquellos sistemas donde la ventilación se logra por uso de ventiladores, permitiendo un control más preciso de la temperatura del invernadero que el que puede lograrse con la ventilación natural. Se pueden distinguir los sistemas basados en la *admisión* del aire al interior del invernadero y los de *extracción* del aire en el mismo. Este último sistema es el más difundido por su mayor rendimiento en la ventilación y porque producen menos problemas en la elección de ventiladores y en la protección de las plantas (Tesi, 2001).

Para hacer eficiente este sistema de refrigeración, se debe tener en cuenta el volumen de aire a evacuar. Tesi y Ferlicca (1969; citados por Tesi, 2001) recomiendan una tasa de ventilación mínima de 48 a 60 renovaciones de aire por hora. De todos modos esta relación debe ser ajustada en función de diversos factores (ej. distancia entre ventana y extractor).

La ASAE (1981) (American Society of Agricultural Engineers; citada por Valera *et al.* 2008) establece una serie de normas para el diseño y control de los sistemas de ventilación forzada, que pueden consultarse en esta publicación si se requieren mayores precisiones técnicas para el diseño este tipo de ventilación.

#### **4.2.2. Evaporación de agua**

Estas técnicas se basan en el consumo energético que realiza el agua para pasar de estado líquido a vapor (para evaporar 1 gr de agua se absorben algo menos de 600 cal, dependiendo de la temperatura considerada del agua). Son recomendados para zonas áridas con altas temperaturas y baja humedad relativa, ya que permiten, de forma simultánea, una disminución de la temperatura y un aumento de la humedad del aire, lo que favorece al desarrollo de los cultivos. La utilización de estos sistemas significa, sin embargo, un consumo elevado de agua. Una manera de disminuir este consumo es acompañar la técnica con un buen control de la ventilación.

Estos sistemas se pueden clasificar en:

**4.2.2.1. Pantallas evaporadoras (“cooling system”):** Se hace pasar el aire a través de una pantalla porosa saturada de agua. Mediante la evaporación, el agua absorbe calor del aire refrigerándolo. El aire fresco cruza al interior del invernadero y sale por el otro extremo. La circulación del aire a través de la pantalla porosa y dentro del invernadero se logra gracias al empleo de ventiladores. Según su ubicación, estos sistemas se pueden clasificar en: *Sistemas de presión negativa* (los ventiladores succionan el aire y están situados en la cara opuesta del invernadero con respecto a la pantalla evaporadora) y *sistemas de presión positiva* (los ventiladores fuerzan el aire a circular a través de las pantallas e ingresan al invernadero). Los primeros, al generar una presión negativa dentro del invernadero, pueden generar ingreso de aire del exterior por roturas de la cubierta, conjuntamente con el polvo (FAO, 2000).

Inicialmente se utilizaban pantallas realizadas con virutas de madera, piedras o ladrillos, pero en la actualidad han sido sustituidas por paneles porosos de plástico. Estos paneles se mantienen húmedos por medio de toberas que rocían agua desde la parte superior (aprox.  $2 \text{ L.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$ ).

Se caracteriza por un gran consumo de electricidad, el que se estima un 75% más que la ventilación forzada (FAO, 2000). El consumo de agua durante el funcionamiento de estos equipos no se presenta como una limitante ya que se tratan de sistemas de recirculación, además de permitir el uso de agua salina y de baja calidad.

La refrigeración por evaporación es mucho más efectiva en climas secos (humedad ambiente entre 35 y 40%), llegando a registrarse reducciones de  $10^{\circ}\text{C}$  con respecto a la temperatura exterior (Montero *et al.*, 1990; citado por Valera *et al.*, 2008), y es el único sistema que permite la producción de plantas bajo invernaderos en estas regiones.

**4.2.2.2. Humidificación del aire por agua a presión (“fog system”):** Consiste en una serie de toberas nebulizadoras a presión elevada (35-60 atm) colocadas sobre tubos de distribución, en el centro del invernadero, a unos 2 m de altura. Es necesaria, al igual que lo explicado para las pantallas evaporadoras, la circulación del aire, para lo cual se utilizan ventiladores, aunque de menor potencia que los utilizados en los sistemas “cooling”, que se colocan a los lados del invernadero que permanece abierto en la parte superior del techo (Tesi, 2001). El agua que se utilice en estos sistemas no debe contener sales de calcio para evitar obturación de las toberas. El real beneficio con este sistema se encuentra en la generación de gotas de muy pequeños tamaños (del orden de 20  $\mu\text{m}$ ) de manera que se logre el cambio de estado de líquido a vapor sin que la misma alcance a mojar las hojas del cultivo.

También existen sistemas llamados “mist” que utilizan toberas o boquillas a deflexión que funcionan con una presión mucho menor que en el sistema anterior (aproximadamente a 4 atm) y un pequeño gasto de agua (10 a 15  $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Así se produce una lluvia tenue de breve duración, de 5 a 15 segundos, que forma una película de agua muy sutil sobre las hojas. Se utiliza sobre todo en invernaderos de enraizamiento con el fin de disminuir al máximo la evapotranspiración (por descenso de humedad relativa y aumento de temperatura) y cierre de estomas de las hojas de los esquejes con la consiguiente dificultad para el enraizamiento (Tesi, 2001). Otro de los sistemas utilizados para disminuir el costo relacionado con el mantenimiento de altas presiones hidráulicas para lograr tamaños pequeños de gotas, es mediante la aspersión de agua a menor presión pero con el uso de aire comprimido generado por compresores.

#### **4.2.3. Sombreado**

El principio mediante el cual funciona este sistema es por la reducción de la radiación solar que incide e ingresa al invernadero. De esta manera, al reducir la radiación incidente, también se reduce la radiación neta, y de esta manera los términos del balance de radiación y energía según lo expresado en la ecuación 14. Según Tesi (2001) el principal objetivo no busca reducir la intensidad luminosa, sino más bien reducir la temperatura, por ello el sombreado debe permitir la transmisión de una fracción suficiente de radiación del espectro visible (380-760nm), para el proceso fotosintético, y limitar al máximo posible la radiación del infrarrojo corto (760-2500nm). Como regla general el sombreado es complementario de la evaporación de agua y de la ventilación, cuando estas técnicas no mantienen la temperatura interior dentro de límites razonables (FAO, 2000). Sin embargo, numerosas referencias indican que cuando la renovación horaria de un invernadero es superior a 40  $\text{h}^{-1}$ , la eficiencia de utilización de mallas de sombreado se reduce considerablemente.

Los diferentes sistemas de sombreado podrían clasificarse de la siguiente manera:

**4.2.3.1. Sistemas fijos o estáticos:** Son aquellos que una vez instalados sombreadan al invernadero de una manera constante, sin posibilidad de graduación o control. Podemos diferenciar entre:

**4.2.3.1.1. Blanqueado:** El producto más común utilizado en este sistema es la cal hidratada. Se aplican lechadas de cal en la cubierta del invernadero con el fin de reflejar gran parte de la radiación infrarroja corta que incide sobre el mismo. Los resultados son variables y dependen en gran medida de la homogeneidad de la cobertura, generalmente no pareja, y del número de aplicaciones que se superpongan. En las regiones más lluviosas se añade a la cal algún adherente

para evitar el lavado. Es un método económico pero no posibilita la regulación en función de la luz exterior. Las labores de aplicación y limpieza, especialmente la segunda, demanda de mano de obra que incidirá inevitablemente en los costos productivos (Montero & Muñoz, 2015).

**4.2.3.1.2. Embarrado:** Técnica muy rudimentaria que consiste en la aplicación de agua barrosa en la cubierta del invernadero. Es un sistema poco práctico y con una homogeneidad mucho menor que el blanqueado de la cubierta. Su bajo costo no debería justificar su utilización ya que además de no ser un sistema regulable, reduce la vida útil del material de cubierta.

**4.2.3.1.3. Cortinas fijas:** Se utilizan materiales sombreadores independientes de la cubierta. Entre ellos: esteras de paja, caña, varillas de madera y redes tejidas de plástico (las más difundidas actualmente) por su cualidad de practicidad, ligereza y adaptabilidad a diferentes situaciones.

En la actualidad se dispone de redes o mallas plásticas con sombreadamiento del 30 al 70% (hay mayores pero no son de uso agronómico) según las exigencias del cultivo, siendo la más utilizada la malla de poliéster de alta resistencia con un porcentaje de sombreado del 50%.

Con el fin de reducir la temperatura del ambiente en el invernadero, las mallas deben ser colocadas en el exterior del mismo y con una separación de al menos 15-20 cm. Así se logra una reducción de la radiación que incide sobre el techo del mismo y se forma una capa de aire que permite la ventilación y reducción de la temperatura de la cubierta. La malla, en el interior, absorbe la radiación solar y la convierte en calor dentro del invernadero, calor que debe ser evacuado por ventilación. Por el contrario, la malla exterior se calienta con la radiación, pero se refrigera con el aire exterior del invernadero. Es importante que las redes se dispongan de manera tal que no obstaculicen el acceso de aire por las aberturas laterales y cenitales.

En aquellas situaciones donde sea necesario reducir la radiación incidente sobre el cultivo y a la vez mantener el aislamiento térmico, las mallas se colocan en el interior del invernadero. Las mallas colocadas horizontalmente a la altura del alero presentan la ventaja, con respecto a las situadas paralelamente a la pendiente, de reducir el volumen de invernadero a calentar.

**4.2.3.2. Sistemas móviles:** Son aquellos que permiten un control más o menos perfecto de la radiación solar en función de las necesidades climáticas. Se emplean las mismas mallas plásticas utilizadas en los métodos de cortina fija, con la adaptación (rieles y correas) que les permite ser móviles, tapando o destapando la cubierta del invernadero según las exigencias del cultivo en las distintas estaciones del año, o el nivel de radiación diario. El movimiento puede ser manual o estar controlado por temporizadores, sensores de luz y temperatura.

#### **4.2.4. Plásticos fríos**

Junto a la estructura y otras formas de refrigeración, la correcta elección del material de cubierta puede ayudar a controlar las temperaturas diurnas excesivas en el invernadero en las zonas tropicales o desérticas (Espí, 2012).

La radiación infrarroja cercana (800 – 2500nm) o NIR (de su término en inglés Near-infrared) es poco absorbida por las plantas y provoca el incremento de la temperatura dentro del invernadero. Los plásticos fríos, filmes antitérmicos o “cool films” son materiales fotoselectivos que, gracias al uso de aditivos, bloquean la NIR evitando de esta manera el sobrecalentamiento diurno del invernadero. Hemming *et al.* (2004; citado por Hemming *et al.*, 2006) obtuvieron resultados donde se demuestra que es posible una reducción de hasta el 25,7% de NIR (700-1100nm), con tan solo una reducción de la radiación fotosintéticamente activa o PAR (de su término en inglés

Photosynthetic Active Radiation) del 8,7%. Esto indica que los aditivos utilizados provocan un efecto diferencial respecto al espectro electromagnético solar.

Los aditivos pueden ser materiales reflectantes (pigmentos metálicos), materiales absorbentes y pigmentos de interferencia (pigmentos con una capa delgada de óxidos metálicos).

La eficacia de los materiales NIR en la reducción de la temperatura del aire y de los cultivos dentro de los invernaderos depende de varios factores como la capacidad de ventilación, la densidad y transpiración del cultivo (Hemming *et al.*, 2006).

Su uso aún bastante limitado se debe a su elevado costo y que todavía dicha tecnología está en proceso de investigación y desarrollo.

### **4.3. Ahorro energético**

Se encuadran en esta categoría todos aquellos métodos que tienden a mejorar la eficiencia energética en los invernaderos. Entre ellos podemos citar:

**4.3.1. Pantallas térmicas:** Basan su principio en disminuir el volumen de aire a calefaccionar (cuando se disponen horizontalmente a la altura del alero), y reducir las pérdidas de radiación ya que son buenos aislantes térmicos, con un valor de  $K$  muy bajo, pero fundamentalmente con un valor de emisividad muy bajo, por lo que actúan reflejando la radiación infrarroja lejana emitida por el invernadero durante la noche. Se utilizan materiales con mejores propiedades aislantes que el polietileno y se colocan en el interior del invernadero con sistemas móviles para extenderlo por las noches y recogerlo durante el día.

Se pueden utilizar.

- Telas ligeras de hilado acrílico de diversos colores (blanco, gris, anaranjado)
- Tejidos de fibra plástica (poliéster o polipropileno) prensado, de color blanco preferentemente.

Los tejidos de poliéster son los que presentan las mejores propiedades para el sombreado y aislamiento térmico (Tesi, 2001).

La eficacia de este sistema depende de la calidad del material, la disposición del mismo en su instalación, la magnitud de la radiación neta al final del día, las horas de apertura y cierre de la pantalla (en este caso cuando se trata de pantallas móviles).

Presentan como desventajas su costo de instalación (rieles, malla, cocido, etc.), el sombreado indeseado al cultivo si no se recoge durante el día, la acumulación de agua sobre el material, el aumento de humedad debido a la reducción de ventilación y el descenso brusco de la temperatura cuando la pantalla se recoge durante las primeras horas de la mañana (FAO, 2000).

**4.3.2. Paredes dobles:** Se construyen invernaderos con una doble cubierta, formándose una capa de aire aislante entre la cara interna y la externa. La cámara de aire formada, 5 a 15 cm de espesor, es una barrera efectiva al flujo de calor, ya que aprovechan como principio físico la baja conductividad térmica del aire.

Existen técnicas constructivas y dispositivos especiales para lograr la separación entre ambas capas de la cubierta. Las paredes dobles pueden ser de vidrio, plásticos rígidos (ej. Polimetil metacrilato “PMMA” o “SDP”; Policarbonato “PC” y polipropileno “PP”), o películas plásticas flexibles (“paredes infladas”).

Este sistema llega a reducir las pérdidas de calor entre un 30 y 45% (FAO, 2000). Un inconveniente que acarrea este sistema es la reducción de la luz debido a la presencia de la

segunda película de polietileno, lo que podría ser un serio problema en climas donde la luz invernal sea limitante.

**4.3.3. Corta vientos:** Se busca la protección contra los vientos fríos y disminuir las pérdidas de calor por infiltración de aire desde el exterior, estimadas hasta un 50%. Las cortinas pueden estar constituidas por material vivo (árboles, arbustos, especies herbáceas de gran porte) o inerte como mallas de polietileno o polipropileno) sujetas mediante un sistema de postes de madera, palma o acero galvanizado entre otros.

Para que desempeñen correctamente su función deben reunir los siguientes atributos:

- Permeabilidad: Deben ser permeables al viento. En caso contrario podrían generarse turbulencias a sotavento y provocar daños en la estructura y cultivos.
- Altura: El diseño de la cortina debe contemplar la proyección de su efecto protector contra los vientos. Normalmente se considera que la zona protegida por la cortina se extiende a sotavento, aproximadamente 10 a 12 veces su altura.
- Homogeneidad: Se busca que la cortina sea homogénea en su composición y estructura, con el fin de evitar zonas impermeables y zonas de infiltraciones de viento que pudieran dañar la estructura a proteger. Esto se logra fácilmente con el uso de mallas de permeabilidad fija en las cortinas artificiales (mallas de polipropileno por ejemplo), y con un buen diseño (combinación de portes) y mantenimiento (poda) en las cortinas naturales.

**4.3.4. Energía solar pasiva:** Consiste en sustituir el uso de fuentes de energía no renovable por una renovable, la energía solar. Tiene los beneficios de no ser contaminante y poseer un efecto muy positivo ante el ambiente.

Se la utiliza como complemento de los sistemas tradicionales o bien para calentar el agua de riego (Tesi, 2001). Dentro de las posibilidades de uso más comunes tenemos:

- Instalaciones solares térmicas como apoyo a la calefacción: Se utiliza para el calentamiento de líquidos (agua) o sólidos (piedras), así como materiales con un cambio de fases capaces de liberar el calor latente de fusión a temperatura constante con intercambiadores de fácil transporte.
- Instalaciones solares fotovoltaicas para producir electricidad y abastecer bombas, sistemas de control climático.

La difusión de este tipo de instalaciones viene limitada por su elevado costo, pero representa una interesante alternativa para aquellos sistemas productivos donde el consumo de otros tipos de energía es muy elevado.

**4.3.5. Lámina de agua o “Hidroinvernaderos”** (Tesi, 2001): Se denominan así aquellos invernaderos que utilizan agua corriente sobre los laterales o techos para mantener niveles térmicos más elevados que el exterior. La instalación está integrada por un sistema de distribución de agua sobre el techo con tubo de polietileno rígido perforado o provisto de boquillas aspersoras, y de una bomba para la impulsión del agua. Las soluciones que pueden utilizarse son diversas, según el efecto térmico que se busque.

## **5. Invernaderos en zonas tropicales y subtropicales**

El diseño de los invernaderos según las exigencias de los cultivos a realizar y el clima de la región en donde se emplazarán, es el primer aspecto a tener en cuenta para lograr una adecuada

condición térmica de los mismos. Luego, en función de lo anterior, se deberán complementar con las alternativas de climatización descritas anteriormente.

Desde comienzos de los años sesenta, los invernaderos y otros tipos de estructuras de protección vegetal se instalaron, en primer lugar, alrededor de la cuenca del Mediterráneo y posteriormente en países tan distantes como Méjico o China (Montero *et al.*, 2008). La producción bajo invernaderos en climas tropicales y subtropicales avanzó enormemente en los últimos años. Países como India, Indonesia, Israel, Méjico, Colombia, Costa Rica y Venezuela, constituyen algunos ejemplos de desarrollos tecnológicos realizados para adecuar las estructuras a estas condiciones ambientales. En prácticamente todos los casos la evolución fue desde el uso de estructuras muy simples, de madera y ventilación natural, hasta las estructuras actuales metálicas de producción industrial, con gran variedad de equipos de climatización.

Desde el punto de vista climático, en climas tropicales y subtropicales la radiación no presenta limitaciones en ningún momento del año, mientras que la elevada temperatura y la humedad ambiente son las que marcan el camino a seguir en los avances para la incorporación de tecnología, tanto de diseño y estructura como de manejo. La refrigeración se considera como una necesidad básica para la producción en invernaderos en climas calurosos. La comprensión de los procesos físicos del invernadero, su cuantificación en función del tamaño, la forma y el clima externo, son factores de gran importancia al momento de estudiar el desarrollo de un sistema de manejo adecuado (Bot, 1983 citado por Kumar *et al.*, 2009).

En este apartado se presentan algunas pautas de diseño, estructura, manejo y climatización que se adaptan a la producción intensiva en invernaderos en zonas climáticas del trópico y subtropico. Se hará particular énfasis en aquellas que sean reproducibles en el norte Argentino, especialmente, en el este de la provincia de Formosa, de acuerdo a la tipología de productores, el acceso a tecnologías y las características que toma el sector productivo hortícola en la provincia. Según la clasificación de Trewartha *et al.* (1980, citado por Zabeltitz & Baudoin, 1999) basada en la clasificación de Köppen, el este de la provincia de Formosa se corresponde con un clima del tipo Sub-tropical húmedo, con abundantes precipitaciones ( $1200 \text{ mm.año}^{-1}$ ), elevadas temperaturas durante los meses estivales, elevada humedad ambiente a lo largo de todo el año, ocurrencia de inviernos suaves (con valores medios de temperaturas mínimas de entre  $4$  a  $13^{\circ}\text{C}$ ), aunque no obstante la posibilidad de algunas heladas ocasionales durante esta estación. Esta condición del ambiente imprime ciertas características climáticas que deben ser contempladas a la hora de diseñar la estructura de protección (Zabeltitz & Baudoin 1999):

- Las elevadas precipitaciones en algunos momentos del año obligan a diseñar estructuras que protejan contra las lluvias y el exceso de humedad.
- La radiación solar es un problema por exceso sólo durante los meses de verano. En invierno, la suma de la radiación solar diaria cae a valores entre 50 y 70% más bajos que los de verano. El intervalo de aproximadamente  $2$  a  $3,5 \text{ kWh.m}^{-2}\text{día}^{-1}$ .
- Las temperaturas diarias son relativamente altas por lo que los invernaderos deben tener buena eficiencia en la ventilación. Durante las noches de invierno las temperaturas pueden bajar considerablemente; por lo tanto, los invernaderos deben tener ventilaciones que se pueden cerrar por las noches. Además, el material de la cubierta debiera tener baja transmisividad para la radiación NIR, con el fin de reducir la temperatura interior durante el día
- En verano, las temperaturas y la suma diaria de la radiación solar son más altos que en las zonas tropicales. Por lo tanto, se requiere del sombreado y muy buena ventilación. Las

instalaciones de sombreado deben ser móviles con el fin de permitir que la mayor cantidad de luz posible en el invernadero durante el invierno.

Kittas *et al.* (2012) señalan tres aspectos de diseño fundamentales a tener en cuenta, estrictamente vinculados con el balance de radiación y energía:

1. Reducción de la radiación que ingresa a la estructura
2. Remover el calor excedente mediante el intercambio de aire
3. Incrementar la fracción de la energía que se disipa en forma de calor latente

### **5.1. Diseño de la estructura**

El correcto diseño de la estructura del invernadero se basa en que deben lograrse las condiciones climáticas necesarias para los cultivos a lo largo de todo el año o, al menos, durante gran parte del mismo. Para las condiciones que se estudia en el presente trabajo se debe priorizar la facilidad con la que pueda realizarse el intercambio de aire para regular la temperatura mediante la ventilación y una correcta distribución del gradiente térmico en altura.

En el presente trabajo no se hará un análisis de las características constructivas y de las cargas que debe soportar la estructura, pero es importante conocer que en muchos países de avanzada en la materia, existen normas que establecen parámetros para la construcción de los invernaderos (ej. normas DIN en Alemania y Grecia; UNI en Italia; NEN en Holanda y UNE en España). Estas se basan en las cargas que debe soportar la estructura (nieve, viento, equipos de climatización, materiales de construcción, anclaje, soporte de los cultivos, entre otros) (Elsner *et al.*,2000).

Actualmente existen en el mercado una importante diversidad de **materiales** para la construcción de invernaderos. La elección entre ellos, depende básicamente de criterios vinculados a su resistencia, costo y vida útil. Sin embargo, y dentro de los denominados invernaderos “artesanales” los materiales se restringen normalmente a la disponibilidad regional de los mismos. Al respecto es importante destacar no solo las bondades técnicas de los mismos, sino que su disposición y vinculación debe responder al logro de una estructura que brinde respuestas adecuadas de acuerdo a las exigencias ambientales en donde se construyan. En la provincia de Formosa la mayoría de los invernaderos que actualmente se construyen están hechos en postes de palma (*Copernicia alba*) y techos del mismo material o tablas de eucalipto (*Eucalyptus spp.* ) o pino (*Pinus spp.*). En el primer caso, las estructuras son más resistentes pero con techos mucho más pesados, lo que demanda mayor precaución en el trabajo durante su construcción. Mientras que en el caso de utilizar tablas de eucalipto o pino, debidamente tratadas para disminuir su deterioro, las estructuras son bastante más livianas pero con ciertos inconvenientes para soportar el elevado contenido de humedad en el ambiente y los vientos fuertes, especialmente el viento procedente del cuadrante norte durante el verano. Cualquiera sea el caso del material utilizado, sea palma o madera, debe ser tratado para proteger la estructura de los daños causados por la humedad, insectos y hongos. En la provincia de Formosa, es común el uso de asfalto líquido o el recambio de aceite de motor (aceite “negro”) y dicho tratamiento consiste en pintar los postes que irán enterrados en el suelo desde la base hasta 20 -30 cm por encima de la superficie del suelo. Para una mejor protección de los postes utilizados, se recomiendan tratamientos con creosota o inmersión completa en sulfato de cobre, aunque suponen mayores costos y complejidad operativa, ya que necesitan de instalaciones especiales (ej. autoclave por presión, vacío y temperatura para el creosotado).

## 5.2. Dimensiones

Como se mencionó anteriormente, las dimensiones del invernadero deben resultar de un adecuado equilibrio entre un buen aprovechamiento del espacio, la facilidad de ventilación y su resistencia estructural. Antón y Montero (2002) expresan que la geometría del invernadero definida principalmente a través de la pendiente de la cubierta, y anchura de la nave, el tamaño, posición y forma de las ventanas, poseen gran influencia sobre la ventilación natural.

La **altura** del invernadero es un factor clave a manejar para el control del ambiente interno, principalmente tratándose de una región en donde la alta temperatura es un factor a tener muy en cuenta durante los meses de primavera, verano e incluso otoño como es Formosa. Una altura elevada supone una mayor uniformidad en la temperatura en sentido vertical, y por lo tanto, condiciones ambientales más adecuadas en su interior a la altura de los cultivos (Tesi, 2001). En invernaderos altos aumenta tanto el gradiente de temperatura interna como la eficiencia de la ventilación natural (efecto chimenea) (Elsner *et al.*, 2000). Invernaderos tropicalizados de diferentes partes del mundo se construyen con alturas de cumbrera que superan los 4,5 m (Kumar *et al.*, 2009) e incluso mayor aún situándose en valores que van hasta los 7 m (Zabeltitz & Baudoin, 1999).

Las medidas de la base, determinarán la superficie de suelo cubierta. Es por ello que cuanto más similares sean el largo y ancho del invernadero, se estará reduciendo la superficie de paredes, y en consecuencia, la dispersión del calor. A igualdad de superficie se suelo cubierta, cuanto mayor sea la superficie de paredes y techo, mayor será la superficie intercambiadora de calor con el medio exterior (Figura 1).

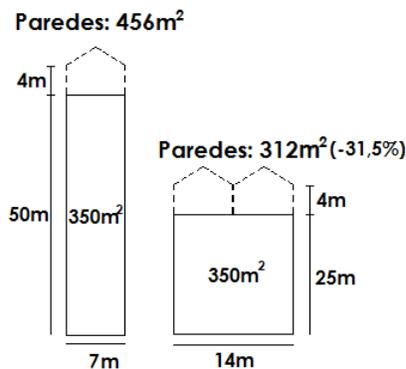


Figura 1. Invernaderos de igual superficie pero con diferentes áreas de cubierta.

Ahora, en regiones cálidas, si las estructuras son muy anchas, principalmente debido al acoplamiento de varios invernaderos a la par, se perjudica su aireación, disminuyendo notablemente el número de renovaciones horarias. Experimentos realizados por la FAO (2000) en invernaderos mediterráneos, con ventanas laterales enrollables, han demostrado que es muy difícil que el clima del interior sea aceptable si la anchura del invernadero supera los 20-25 m. Para las condiciones ambientales del trópico y sub trópico Zabeltitz y Baudoin (1999) aconsejan anchos de entre 5 y 8 m, o 16 m en caso de invernaderos múltiples (2 naves).

La **separación** a adoptar entre estructuras individuales depende de la latitud y resulta mayor en países donde ésta es mayor y en los invernaderos orientados E-O es más importante que en los orientados en sentido de N-S (Tesi, 2001). Por ejemplo, De Villele (1971, citado por Tesi, 2001) en el sur de Francia, para invernaderos túnel de 8,5 m de anchura y 3,2 m de altura, aconseja una

separación de 2 m con orientación N-S y de 4 m para orientación E-O. Zabeltitz y Baudoin (1999) recomiendan, para el caso de invernaderos en zonas tropicales, una separación de 1,5 a 2,0 m entre invernaderos. Sin embargo, la separación entre dos invernaderos está relacionada con la mejora en la ventilación y también en la proyección de sombra de uno sobre otro, principalmente en el caso de los invernaderos cuyo eje longitudinal tiene orientación de E-O.

### **5.3. Orientación y forma de la techumbre**

Ambos aspectos están directamente relacionados con la transmisión de la radiación solar hacia el interior del invernadero. Nisen (1969, citado por Elsner *et al.*, 2000) ha estudiado la transmitancia de la radiación de varios tipos de invernaderos con orientación este-oeste y norte-sur en los meses de Diciembre y Junio para el hemisferio norte, arribando a las conclusiones que a continuación se presentan resumidas:

- La transmitancia se incrementa al aumentar el ángulo de la techumbre.
- La mayor transmitancia de la luz en invierno, y menor en verano, se logra con la orientación este-oeste que con la norte-sur.
- Los invernaderos con techos curvos tienen una mejor transmitancia que los techos con ángulo de 25°.
- Invernaderos con techos de doble vertiente simétrica con una pendiente de 35° superan el 60% de la transmitancia de la radiación incidente.

Un estudio similar fue el de Castilla (2005, citado por Montero, 2012) quien comparó distintas pendientes entre 11 y 45° con estructuras simétricas y asimétricas, llegó a la conclusión de que los invernaderos simétricos con pendientes entre 25 y 30° representan un buen compromiso entre transmisión de luz y costo constructivo.

Experiencias en el país (Bouzo & Pilatti, 1999) han demostrado que invernaderos de techos curvos y con orientación del eje longitudinal en la dirección E-O tuvieron una transmitancia promedio de 6,7% mayor a los ubicados en la dirección N-S.

Como se mencionó anteriormente, en climas sub-tropicales, la radiación invernal no es una limitante. Además, en el norte argentino, el viento norte podría ocasionar serios problemas para aquellas estructuras que se dispongan con su eje principal en forma perpendicular a dichos vientos (eje longitudinal E-O). Es por ello, que una correcta opción para la orientación del invernadero en la provincia de Formosa, podría ser noreste-suroeste. De esta manera se logra un balance entre una buena captación de la radiación y protección contra los vientos fuertes predominantes en la región.

Por otro lado, la inclinación del techo y el material de la cubierta influyen en la formación y precipitación de gotas de agua en el interior del invernadero. Elsner *et al.* (2000) presentan una serie de estudios que permiten concluir que el ángulo mínimo del techo para evitar goteo debe ser de 20-25°, mientras que Montero (2012) propone pendientes de 45°.

Conjugando los resultados presentados anteriormente, con las características constructivas típicas de la región (invernaderos con estructura de madera), podría inferirse que techos simétricos de doble vertiente, o con abertura cenital, y ángulos de inclinación entre 25 y 35° proporcionarían una buena transmisividad de la radiación e impedirían la formación y precipitación de gotas de aguas sobre el cultivo, además de adaptarse mejor a las posibilidades constructivas que aquellas estructuras de techos curvos. En la Figura 2 se presentan tres modelos de invernaderos que podrían adaptarse a las condiciones de la provincia de Formosa.

#### 5.4. Ventilación

La ventilación natural es el sistema de disipación de la energía de los invernaderos más económico al que pueden acceder los productores mediante invernaderos de tipo artesanales en climas sub-tropicales. Sin embargo, la resolución de las características de las ventanas requiere del conocimiento del comportamiento térmico del invernadero con relación al ambiente externo. Parte de las premisas que deben considerarse se encuentran contenidas en el desarrollo previo de este documento, cuyas ecuaciones matemáticas permitieron la construcción de modelos de simulación matemáticos que orientan la resolución de la ventilación (Bouzo *et al.*, 2006). Herramientas informáticas más avanzadas mediante simulación numérica como la computación dinámica de fluidos (CFD del inglés Computational Fluid Dynamics) utilizan una, dos o tres dimensiones para simular el flujo de viento, temperatura y humedad. Son sumamente útiles para predecir el microclima dentro de un invernadero, permitiendo observar gráficamente las zonas dentro del invernadero con diferentes condiciones de temperatura, presión de vapor o velocidad de viento.

Estas tecnologías basadas en la simulación matemática y aplicadas a la ventilación natural, han permitido tener un gran avance en el conocimiento de esta técnica de climatización, evitando las pruebas directamente 'in situ' o la utilización de modelos físicos, lo que incrementan los costos y los tiempos de resolución. A continuación se describen algunos aspectos importantes a tener en cuenta para su aplicación en invernaderos de zonas tropicales y sub-tropicales, además de los ya mencionados en el apartado de diseño de la estructura.

Como primera medida, el **diseño de las aberturas** de ventilación debe permitir la elaboración de estrategias para evaluar las mejoras de la tasa de renovación horaria en diversas condiciones climáticas. La capacidad de ventilación de un invernadero se describe generalmente por la **relación de apertura** o "**superficie de ventanas**", que expresa el área de apertura máxima como porcentaje del área de suelo cubierto, y hace referencia a la capacidad de ventilación; mientras que la posición, la forma y el funcionamiento de la ventilación influye fuertemente sobre la tasa de renovación de aire de los invernaderos (Elsner *et al.*, 2000). Algunos experimentos realizados en la cuenca del Mediterráneo (White & Aldrich, 1975; citados por Kittas *et al.*, 2012) demuestran que un área de ventilación equivalente del 15 al 30% de la superficie de suelo cubierta es suficiente para una correcta ventilación del invernadero, y que con porcentajes mayores al 30% el efecto adicional es insignificante. No obstante, otros investigadores cuyos trabajos experimentales lo realizaron en zonas tropicales (Montero *et al.*, 2001; Campen, 2004; Kamaruddin *et al.*, 2000; y Hermanto *et al.*, 2006; citados por Kumar *et al.*, 2009) han tenido resultados satisfactorios con porcentajes aberturas de ventilación mayores, situados del 33 hasta incluso el 60% de la superficie de suelo cubierta. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estas proporciones tan altas de superficies de ventanas respecto a superficie de suelo cubierto sólo son posibles cuando los invernaderos son aislados y con una altura considerable. Por otro lado Zabeltitz y Baudoin (1999) expresan que para una ventilación eficiente en climas sub-tropicales es suficiente una proporción del 18 a 25% para dicha relación.

A pesar que las ventanas cenitales son eficientes con velocidades de viento muy bajas (entre 1 a 2 m.s<sup>-1</sup>), se observó que en condiciones de regiones ventosas estas aberturas inducen generalmente más altas tasas de ventilación que las laterales (Papadakis *et al.*, 1996; citado por Elsner *et al.*, 2000). La razón principal de este efecto es que a la altura de las ventanas laterales la velocidad del viento se reduce fuertemente por la fricción con el suelo. Además, el efecto de las diferencias de presión creadas por la forma de la cubierta es más fuerte en las aberturas del techo.

Por otro lado, las ventanas en las paredes laterales son necesarias para la inducción de la ventilación por gravedad cuando la velocidad del viento es baja. Se ha demostrado que las ventilaciones cenitales por sí solas no logran un eficiente flujo de aire en condiciones de baja velocidad del viento (Mistriotis *et al.*, 1997; citado por Elsner *et al.*, 2000), lo que se relaciona con un principio de continuidad, es decir, para que exista un flujo que egresa de un sistema, debe haber otro flujo que ingrese.

El sistema más efectivo para una correcta ventilación en invernaderos situados en climas cálidos es aquel que combina la ventilación lateral (paredes) con la cenital (techo). Así lo demuestran Katsoulas *et al.* (2006) quienes estudiaron el comportamiento de la ventilación con CFD en invernaderos con cultivo de tomate y obtuvieron que la configuración más efectiva de ventilación es aquella que posee tanto ventanas cenitales como laterales, seguido por aquellos sistemas de ventanas laterales únicamente (tasa de ventilación 46% menor), mientras que la menos efectiva resultó aquella que poseía únicamente ventanas cenitales (tasa de ventilación 71% inferior).

Debido a las condiciones climáticas del sub-trópico se debe considerar, además, que tanto el tamaño como la forma de las ventanas no deben debilitar la estabilidad estructural del invernadero, ya que ocasionalmente será sometido a fuertes vientos, y su diseño debe proteger el cultivo de lluvia directa incluso cuando estén abiertas.

El uso de ventilación cenital en invernaderos tropicalizados es argumentado por Kumar *et al.* (2009) citando el trabajo de varios autores:

- Von Zabeltitz (1999) quien expresa que la adopción conjunta de la ventilación en el techo (abertura cenital) y los lados (paredes o “cortinas”) es adecuado para el invernadero en el trópico húmedo y la mejor manera de lograr el intercambio de aire es mantener la relación de abertura de ventilación tan grande como sea posible
- Ould Khaoua *et al.* (2006) utilizando la técnica de CFD han evaluado el efecto de la disposición de ventilación en los patrones de flujo de aire y temperatura. Sus resultados indicaron que la configuración de ventilación del techo a barlovento genera la tasa de ventilación más alta (11-26 h.<sup>-1</sup>).

Como se desprende de lo anterior, un parámetro que se relaciona con la eficacia del sistema de ventilación es la tasa de ventilación. Dicha tasa hace referencia al volumen de aire renovado del invernadero, por hora, en relación al volumen de aire que el mismo alberga en su interior. Lopez *et al.*, (2001) expresan que entre 20 y 30 renovaciones horarias se consideraría como un buen término medio, siendo además una tasa de ventilación que puede alcanzarse en la mayoría de invernaderos con ventanas cenitales incluso en días de poco viento. Para el caso de climas húmedos se ha demostrado experimentalmente (Montero & Muñoz, 2015) que con una renovación de 40 volúmenes por hora, se consigue eliminar correctamente el exceso de energía (calor) del interior de la estructura.

La orientación de las ventanas cenitales es otro factor a tener en cuenta a la hora de diseñar un invernadero. Actualmente el estudio con CFD permite obtener representaciones muy claras y precisas sobre el comportamiento de la ventilación en invernaderos según el tipo de abertura cenital y su orientación. Un ejemplo de ello es el trabajo de Montero y Muñoz (2015) donde hallaron que con ventanas cenitales abatibles, se obtienen tasas de ventilación entre un 35% y un 60% más altas a barlovento que a sotavento, para velocidades comprendidas entre 2 y 7 m.s<sup>-1</sup> respectivamente. Además encontraron que las ventanas abatibles son bastantes más eficaces que

las enrollables, con tasas de ventilación entre 3 y 4 veces más altas para más mismas velocidades de vientos que el caso anterior. El alerón de las ventanas rebatibles ejerce un efecto modificador sobre el flujo de aire que se aproxima a la ventana, de forma que incrementa la velocidad de entrada y salida a través del hueco abierto. Así, una correcta recomendación para la construcción de los invernaderos en zonas sub-tropicales, es que, de poseer ventilación cenital, ésta pueda adaptarse a algún tipo de sistema que le permita abatirse (abrirse y cerrarse. Figura 2 C) y dicha abertura debe orientarse preferentemente a barlovento de los vientos predominantes de la zona. Como se expuso con anterioridad, la posibilidad de abrir o cerrar la ventana cenital permite tener un mejor control sobre el indeseable ingreso de agua en ocasión de precipitaciones de altas intensidades, muy frecuentes en regiones tropicales, además de permitir cerrar la ventana ante tormentas o días de intenso viento.

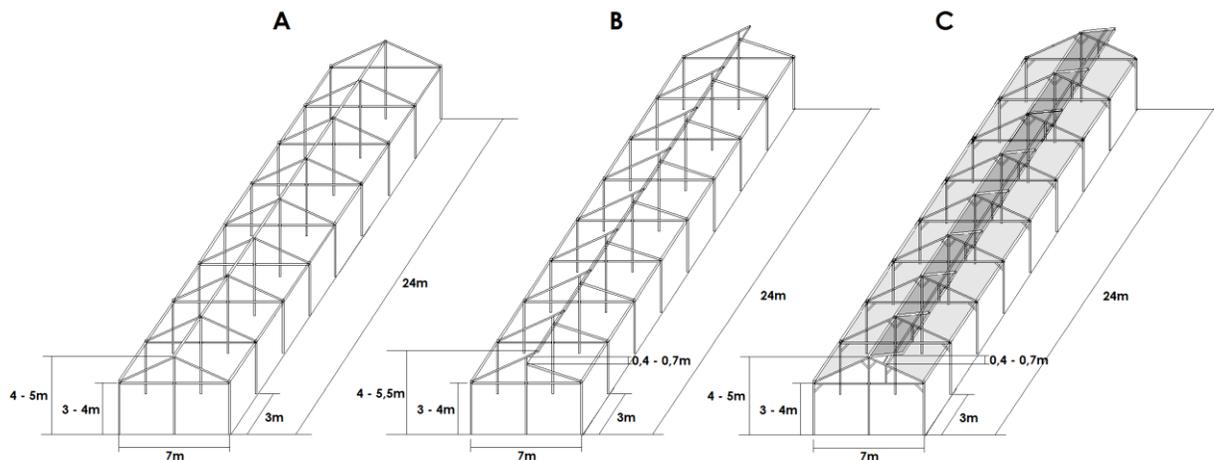


Figura 2. Modelos de invernaderos de construcción en madera. A. Techo a dos aguas; B. Techo a. dos aguas modificado (abertura cenital fija); C. Techo a dos aguas modificado (abertura cenital abatible).

### 5.5. Sombreado

Considerando el balance de radiación de un invernadero, (ecuación (15), siempre que se disminuya la cantidad de radiación que ingrese al mismo, se estará disminuyendo la cantidad de energía medido en términos de radiación neta a disipar para mantener la temperatura interior dentro de los rangos tolerables para los cultivos. Las técnicas de sombreado contribuyen en este aspecto al manejo de los invernaderos en zonas tropicales y sub-tropicales y representan, para el nivel tecnológico de los sistemas productivos de la provincia de Formosa, una alternativa accesible que complementa efectivamente a los demás sistemas de climatización.

De los diferentes sistemas para el sombreadamiento presentados en el apartado de sistemas de climatización, el encalado y la utilización de mallas de sombreado son por los que se podrían optar para la región.

Por un lado, el encalado o blanqueado de la cubierta, al ser una técnica de relativo bajo costo, podría adaptarse perfectamente a los sistemas productivos de la provincia, pero su efecto sobre la temperatura del aire posee datos escasos y difíciles de comparar entre sí. Montero y Muñoz (2015) citan el trabajo realizado en Argentina por Francescangelli *et. al.* (1992) donde se comparó el efecto del blanqueado aplicado en dos densidades: 95 y 34 gramos de cal hidratada en disolución de 1 kg de cal por 5 litros de agua. En general las diferencias de temperaturas entre el testigo y los demás tratamientos fueron de 2 a 3 °C con las ventanas totalmente abiertas (18% de superficie respecto al suelo), mientras que en el cultivo de tomate se registraron descensos de

temperatura de 4,6 y 3,3 °C para los tratamientos más denso y liviano respectivamente. En el suelo se lograron descenso de 8 a 9 °C, lo que puede tener un efecto muy importante en las primeras fases de desarrollo del cultivo.

Así, su uso quedará determinado por las posibilidades de acceso a los diferentes niveles tecnológicos, pero debe quedar claro de que no es una técnica de fácil repetitividad ni presenta resultados significativos en la reducción de la temperatura en el interior de los invernaderos, cuando la renovación horaria debido a la ventilación es mayor a 40 h<sup>-1</sup>.

El uso de mallas de sombreo ofrece las ventajas, con respecto al método anterior, de ser más práctico en su uso, más uniforme el sombreamiento y principalmente ofrecer la posibilidad de recogerse fácilmente durante días nublados o cualquier situación que así lo demande. Como se mencionó con anterioridad, para su correcto funcionamiento y para obtener los resultados esperados (reducción de la temperatura interior), se prefieren los sistemas móviles y donde la malla se ubica en el exterior del invernadero con una separación de al menos 10-20 cm con respecto a la cubierta de la estructura. Experiencias como la de Martínez (1984; citado por Montero & Muñoz, 2015) en donde compararon el sombreamiento móvil frente al fijo, y hallaron aumentos en peso seco total del 65% en *Cyclamen* y del 132% en *Fucsia* entre otros.

Algunos autores, como (Bouzo *et al.*, 2003), expresan que uno de los inconvenientes de su uso radica en que con los materiales actualmente disponibles la reducción de la radiación solar no es selectiva, disminuyendo tanto la radiación infrarroja como la PAR y, aunque permita atenuar los picos de temperaturas máximas, también puede ser causal de una disminución de la producción como efecto del sombreamiento del cultivo. Por ello han realizado estudios con sombreamiento total y parcial en el techo de invernaderos, obteniendo que las plantas en invernaderos sin sombreamiento estuvieron sometidas a estrés hídrico durante gran parte de su ciclo, mientras que los tratamientos con sombreo parcial (mitad oeste del techo) han registrado los mayores rendimientos comparado con la utilización completa de media sombra.

A continuación se presentan algunas cuestiones que Montero y Muñoz (2015) proponen tener en cuenta con respecto al sombreo de invernaderos para reducir la temperatura:

- El sombreo tiene más influencia sobre el clima del invernadero cuando la ventilación es escasa. Por ejemplo, si la tasa de renovación es 10 volúmenes por hora (invernaderos parrales con pocas ventanas) una malla blanca descende la temperatura en 3 o 4°C, mientras que si es 60 el descenso térmico es de apenas 1°C
- En los invernaderos sin plantas o con el cultivo recién trasplantado, el sombreo reduce en gran manera la temperatura (más de 10°C en muchos casos). Sin embargo, cuando hay otra fuente la refrigeración, ya sea la transpiración del cultivo, la evaporación de agua o el aumento de la tasa de ventilación, el sombreo pierde importancia relativa y tiene menos efecto sobre el clima interno.

Actualmente se dispone en el mercado una gama de productos de este tipo, diferenciados por el material de construcción (polietileno, polipropileno, entre otros) y por su color. El color de la malla de uso más difundido es el negro, debido principalmente a que es un material “popularizado” y a su mayor duración. Sin embargo Montero y Muñoz (2015) señalan que bajo el punto de vista climático no es la mejor opción. Han realizado un estudio donde comparaban el efecto de los diferentes colores (pero igual poder de transmisión, 40%) de malla de sombreo sobre la temperatura interior del invernadero, con diferentes tasas de ventilación. Los resultados

indica que en cuanto a la reflexión de la radiación, la malla aluminizada reflejaba el 55%, la negra el 10% y la blanca el 40%, por lo que la absorción de la luz era del 5%, 50% y 20%.

Según los cálculos, si el invernadero está bien ventilado ( $40 \text{ h}^{-1}$ ) y lleno de cultivo con tasa alta de transpiración, la temperatura ambiente es  $2,2 \text{ }^\circ\text{C}$  inferior con la malla aluminizada en lugar de la negra, y  $1,6^\circ\text{C}$  inferior con la blanca respecto a la negra. El cálculo también indica que la malla negra no reduce la temperatura del invernadero, puesto que el testigo sin malla tuvo una temperatura  $0,6 \text{ }^\circ\text{C}$  inferior a la del invernadero con malla negra.

Por último, Montero y Muñoz (2015) recomiendan no utilizar mallas de color, puesto que cualquier material coloreado corta un porcentaje mayor del espectro visible. La fracción absorbida se corresponde con su color complementario (por ejemplo la pantalla naranja o verde absorbe mayor cantidad de azul y desequilibra el espectro de la llega al cultivo). Además la pérdida adicional de luz visible ocurre normalmente por absorción, que tiene el inconveniente adicional de aumentar la temperatura del invernadero.

A partir de estos resultados podríamos suponer que la mejor opción para la reducción de las elevadas temperaturas estivales en los cultivos en invernaderos podía lograrse con el uso de mallas aluminizadas en el exterior del invernadero. Una realidad es que el bajo nivel de inversión actual en los sistemas productivos zonales limita el uso de tecnologías costosas como lo puede ser un sistema exterior, móvil, motorizado, con malla aluminizada y sensores de radiación. Por ello es un desafío desarrollar y diseñar estructuras que permitan un fácil manejo de la cobertura de sombreado y más económicos (ejemplo rieles, poleas y sogas), como el uso de malla blanca o, en última instancia, negra.

### **5.6. Materiales de cubierta**

La gran variedad existente de materiales de cobertura y sus propiedades frente a los diferentes tipos de radiación le confieren a cada invernadero características propias que afectan al balance radiativo y, por consiguiente, energético en su interior.

Existen estudios realizados sobre la aplicación de plásticos fríos (o NIR) en invernaderos diseñados para zonas tropicales (Kumar *et al.* (2009) citan a Hemming *et al.*, 2006; Impron *et al.*, 2007), pero la realidad indica que el acceso a este tipo de tecnología aún se encuentra distante para los productores de esta región, fundamentalmente por su elevado costo y por la falta de experiencias locales, regionales o nacionales que la validen y la extiendan en los sistemas productivos más avanzados.

### **Bibliografía**

ANTÓN, A. & MONTERO, J.I. 2002. Mejorando el clima de los invernaderos.

BOUZO, C.A., & PILATTI, R.A. 1999. Evaluación de algunos factores que afectan la transmisión de radiación solar en invernaderos. Facultad de Agronomía y Veterinaria 13 (2): 13–19.

BOUZO, C.A.; PILATI, R.A.; FAVARO, J.C. & GARIGLIO, N.F. 2003. Cultivo de tomate en invernadero: alternativas para el control de temperaturas extremas. IDIA XXI 4: 137–141.

ELSNER, VON B.; BRIASSOULIS, D.; WAAIJENBERG, D.; MISTRITIS, A.; ZABELTITZ, CHR. VON; GRATRAUD, J.; RUSSO, G. & SUAY, R. 2000. Review of structural and functional characteristics of greenhouses in european union countries, part II: Typical designs. *Journal of Agricultural Engineering research* 75 (2) (February): 111–126.

ESPÍ, E. 2012. Materiales de cubierta para invernaderos. *Cuaderno De Estudios Agroalimentarios* 3 (July): 71–88.

FAO. 2000. Control del medio ambiente. El Cultivo Protegido En Clima Mediterráneo. FAO Dirección de Producción y Protección Vegetal 90. 313pp.

FIDAROS, D.K.; BAXEVANOU, C.A.; BARTZANAS, T. & KITTAS, C. 2010. Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Renewable Energy* 35 (7) (July): 1380–1386.

GARZOLI, K.V. & BLACKWELL, J. 1981. An analysis of the nocturnal skin plastic heat loss from a single greenhouse. *Agricultural Engineering* (March 1979): 203–214.

GOYAL, M.R. & RAMÍREZ, V.H. 2008. Elementos De Agrometeorología. Ed. UNISARC. Colombia. 263pp.

HEMMING, S.F.; KEMPKES, N.; BRAAK, Van D.; Dueck, T. & Marissen, N. 2006. Greenhouse cooling by NIR-reflection. *Acta Horticulturae* 719: 97–106.

AL JAMAL, K. 1994. Greenhouse cooling in hot countries. *Energy* 19 (11): 1187–1192.

JARAMILLO, A. 2005. La redistribución de la radiación solar y la lluvia dentro de plantaciones de café (*Coffea arabica* L.). *Revista Académica Colombiana De Ciencias Exactas* 29 (112): 371–382.

KATSOULAS, N.; BARTZANAS, T.; BOULARD, T.; MERMIER, M. & KITTAS, C. 2006. Effect of vent openings and insect screens on greenhouse ventilation. *Biosystems Engineering* 93 (4) (April): 427–436.

KITTAS, C.; KATSOULAS, N. & BARTZANAS, T. 2012. Greenhouse climate control in mediterranean greenhouses. *Cuaderno De Estudios Agroalimentarios* 3: 89–114.

KUMAR, K.S.; TIWARI, K.N. & JHA, M.K. 2009. Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: a review. *Energy and Buildings* 41 (12) (December): 1269–1275.

LOPEZ, J.C.; LORENZO, P.; MEDRANO, E.; SÁNCHEZ, M.C.; PÉREZ, J.; PUERTO, H.M. & ARCO, M. 2000. Calefacción de invernaderos en el sudeste español. Resultados experimentales para cultivos de pepino y judía. Estación Experimental Las Palmerillas. Ed. Caja Rural de Almería. Almería. 54pp.

LOPEZ, J.C.; LORENZO, P.; CASTILLA, N.; PÉREZ, J.; MONTERO, J.I.; BAEZA, E.; ANTÓN, A.; FERNÁNDEZ, M.D.; BAILLE, A. & GONZÁLEZ-REAL, M. 2001. Incorporación De Tecnología Al Invernadero Mediterráneo. Estación Experimental Las Palmerillas. Ed. Cajamar. Almería. 90pp.

MELIÁN, M.A. & CÁMARA, J.M. 2003. Control del clima en invernaderos. Evaluación de su rentabilidad. Agricultura (February) 110-116.

MONTERO, J.I. 2012. Desarrollo de estructuras para invernadero. Cuaderno De Estudios Agroalimentarios 3 (July): 45–70.

MONTERO, J.I. & ANTÓN, A. 2015a. Refrigeración de invernaderos II. Institut De Recerca i Tecnología Agroalimentària (July). 13pp.

MONTERO, J.I. & ANTÓN, A. 2015b. Refrigeración de invernaderos I: Ventilación Natural. Institut De Recerca i Tecnología Agroalimentària (July). 12pp.

MONTERO, J.I.; STANGHELLINI, C. & CASTILLA, N. 2008. Invernadero para la producción sostenible en áreas de clima de invierno suaves. Horticultura Internacional 65 (Octubre): 12-31.

OCAMPO, J.; ORTEGA, L.D.; HUERTA, A.; SANDOVAL, E.; JARAMILLO, J.L. & MARTÍNEZ, C. 2014. Caracterización y funcionalidad de invernaderos en Chignahuapan Puebla, México. Bio Ciencias 01 (222): 261–270.

RAMÍREZ, V.H. & JARAMILLO, A. 2009. Balances de energía asociados a los cambios de cobertura en la zona andina Colombiana. Cenicafé 60 (3): 199–209.

STANGHELLINI, C. 1987. Transpiration of greenhouse crops an aid to climate management. Ph. D. Thesis. Institute of Agricultural Engineering. Wageningen.

TESI, R. 2001. Medios de protección para la hortoflorofruticultura y el viverismo. Ed. Mundi-Prensa. Madrid. 288pp.

VALERA, D.; MOLINA, F. & ÁLVAREZ, A. 2008. Ahorro y eficiencia energética en invernaderos. Instituto para la diversificación y ahorro de energía. Madrid. 59pp.

WANG, S. & BOULARD, L. 2000. Predicting the microclimate in a naturally ventilated plastic house in a mediterranean climate. Agricultural Engineering 75: 27–38.

ZABELTITZ, Chr Von & BAUDOIN, W.O. 1999. Greenhouse and shelter structures for tropical regions. Dirección de Producción y Protección Vegetal 154. Ed. FAO. Roma. 122pp.