

El control del clima de los invernaderos de plástico. Un enfoque actualizado*

PEDRO-FLORIÁN MARTÍNEZ¹ Y DOLORS ROCA²

Introducción

Al comparar tipos diferentes de invernaderos dotados de niveles diversos de equipamiento y tecnología, incluyendo la opción del cultivo sin suelo, desde el más simple con inversiones mínimas hasta el que cuenta con mayor tecnología, aplicados al caso concreto del cultivo del pimiento, en una zona con clima mediterráneo, los resultados de Fernández-Zamudio *et al.* (2006) concluyen que los cuatro niveles objeto del estudio son rentables, pero también queda claro que mayor inversión no implica mayor rentabilidad. En un estudio del mismo tipo en tomate, al aumentar el nivel de tecnología, aumentan los costes de producción totales debido a la intensificación del cultivo. Las diferencias de rentabilidad entre los niveles tecnológicos son pequeñas y la opción por uno u otro dependerá finalmente de las estrategias de viabilidad de la explotación a mediano y largo plazo, ya que la explotación de mayor nivel se situará mejor tecnológicamente para afrontar con eficacia un mercado cambiante (Fernández-Zamudio *et al.*, 2010). Por lo tanto, algunas cuestiones previas que hay que decidir para la inversión en tecnología en la horticultura protegida son, cuál es el mercado de destino de los productos, cuáles son las exigencias de este mercado, qué inversiones y qué técnicas hay que aplicar para producir y cumplir esos objetivos. La capacidad mayor o menor de regular las condiciones del clima del invernadero, es una de las decisiones que habría que tomar, ya que dicha capacidad es una de las herramientas más potentes del cultivo protegido.

Mejorar las condiciones de control del invernadero supone no solo la mejora de la producción en rendimiento y en calidad, sino también un uso más

* Para citar este capítulo: Martínez, P.F. y Roca D. 2011. El control del clima de los invernaderos de plástico. Un enfoque actualizado. En: Flórez R., V.J. (Ed.). *Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 177-242.

1 Consultor internacional en horticultura, pedroflorianmtz@gmail.com.

2 Investigadora del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, IVIA. Departamento de Horticultura, 46113 Moncada. Valencia, España. roca_dolfer@gva.es.

eficiente de los insumos (agua, fertilizantes, CO₂, combustibles, etc.), que resulta en una práctica de la horticultura más sostenible con el medioambiente y con los recursos. Este mejor manejo del sistema de producción en invernadero va ligado al buen conocimiento de las funciones y los procesos que tienen lugar en las plantas y a su aprovechamiento. La obtención de información sobre dichos procesos por medio de sensores adecuados, técnicas de medida y el desarrollo de algoritmos de control, que puedan aprovechar dichas informaciones, son necesidades fundamentales para avanzar en el control y el manejo de los invernaderos. Todavía hay mucho trabajo por hacer para el desarrollo pleno de estos sistemas al nivel comercial.

Sin lugar a dudas, cualquier planteamiento actual de mejora y optimización del manejo de los invernaderos, debe pasar el filtro de la sostenibilidad, tanto al incorporar mejoras tecnológicas en relación con los materiales de cubierta, como con los sistemas de control climático. Aplicar criterios de manejo basados en los requerimientos del cultivo y aprender a aprovechar sus señales de respuesta deberá, cada vez más, formar parte de las herramientas de control del sistema (Bakker *et al.*, 2008).

1. Condiciones climáticas

Es necesario estudiar las características del clima local con el fin de conocer los factores favorables y desfavorables para el cultivo y asimismo para las instalaciones, ya que el diseño de las mismas debe responder a las condiciones naturales. Se denomina clima espontáneo del invernadero al que se produce sin la intervención humana ni aporte de energía importante, calor, ventilación forzada, nebulización. La pintura de sombreo, la ventilación natural se consideran contribuyentes al clima espontáneo.

1.1 Importancia de la medida de las variables del clima

Por las razones mencionadas es necesario medir un número mínimo de variables climáticas, que servirán de base para prever e interpretar las respuestas de las plantas, en sus diferentes fases de desarrollo y para regular el funcionamiento de los equipos e instalaciones de protección climática y comprobar su eficacia. El número de variables a medir dependerá del grado de control que permitan los equipamientos del invernadero. Las más importantes son:

1.1.1 Radiación solar

El nivel de la intensidad de radiación solar total exterior, a lo largo de todo el año, es un factor fundamental sobre el que influyen la orientación del invernadero, el número de cubiertas y otros factores. Si la intensidad de radiación solar recibida por el cultivo fuera limitante, produciría efectos agrónómicos desfavorables.

La radiación del interior del invernadero tiene dos componentes:

- *Radiación difusa*, que alcanza el 60-65% en invierno nublado y que debido a su carácter multidireccional, mejora el balance total de luz de la masa vegetal del conjunto del cultivo.
- *Radiación directa*, con el 35-40% restante.

Como se ha dicho antes, la orientación del invernadero condiciona su comportamiento ante la radiación. Los invernaderos de una nave con orientación N-S tienen menos radiación en invierno y son más fríos, pero parece probado que en el conjunto del día, la iluminación interna en orientación N-S es más uniforme y más constante. En cambio, con orientación E-O, reciben más radiación en invierno y son en general más cálidos, pero en verano salen beneficiados con un balance diario inferior a los orientados N-S.

De diferente modo se comportan los invernaderos multinave. Con orientación N-S tienen más radiación en invierno y más homogeneidad en el reparto de las 24 horas, con buen desplazamiento de las sombras, mientras que los orientados E-O reciben menos luz en invierno, a causa del sombreado de unas naves sobre las adyacentes al lado norte y tienen, por lo tanto, más heterogeneidad de luz, pero menos diferencia de luz entre invierno y verano.

Es muy importante la orientación de las líneas de cultivo en el sentido N-S en todos los casos, para mejorar la distribución de luz en las plantas a lo largo del día, en especial cuando dichas plantas son de crecimiento vertical.

Finalmente, para conseguir la máxima transmisión de luz solar, hay que diseñar la cubierta para que forme el menor ángulo de incidencia con los rayos solares. Esto es válido para cualquier latitud geográfica. Hacer esto compatible con los costes de la estructura, así como con otras características del clima, como por ejemplo con las precipitaciones, nieve o lluvias, es una cuestión de optimización del diseño del invernadero.

En las localizaciones geográficas próximas al ecuador, estas cuestiones reducen su importancia debido a la menor variación de la inclinación del sol, lo que habrá que considerar en cada caso específico.

1.1.2 Temperatura

1.1.2.1 Temperatura del aire

Deben ser estudiadas las temperaturas mínimas externas, ya que pueden ser insuficientes y la época del año en que ocurren. Igualmente las temperaturas excesivas, que pueden ser difíciles de controlar por ventilación natural.

Los diversos cultivos tienen exigencias térmicas específicas (tabla 1), entre las cuales cabe distinguir, por una parte, los niveles de temperatura que favorecen o limitan las funciones de la planta y, por otra, las denominadas integrales térmicas, sumas de temperaturas, tiempo térmico. En el primer caso están, en síntesis, los niveles de máxima y mínima biológicas, la míni-

ma letal y las óptimas diurna y nocturna. Las temperaturas máxima y mínima biológicas, son los umbrales de temperatura que garantizan ausencia de daños irreparables en la planta y sus funciones, aun cuando las tasas de los procesos orgánicos de la planta, respiración, fotosíntesis, etc., puedan ser afectados en la medida en que se alejen de los niveles térmicos óptimos. La temperatura mínima letal, es el umbral por debajo del que la planta puede sufrir daños irreversibles. Las óptimas diurna y nocturna son los niveles térmicos de mayor confort y eficiencia para los procesos vitales de la planta, que son diferentes durante el día que de noche.

Tabla 1. Niveles climáticos importantes para algunas especies de plantas cultivadas en invernadero.

Especie	Temperaturas (°C)						CO ₂ (ppm)	HR óptima (%)
	Mínima		Óptima		Máxima biológica	Óptima Radicular		
	Letal	Biológica	Noche	Día				
Tomate	0 - 2	8 - 10	13 - 16	22 - 26	26 - 30	15 - 20	1.000 - 2.000	55 - 60
Pepino	0 - 4	10 - 13	18 - 20	24 - 28	28 - 32	20 - 21	1.000 - 3.000	70 - 90
Pimiento	0 - 4	10 - 12	16 - 18	22 - 28	28 - 32	15 - 20	-	65 - 70
Berenjena	0 - 2	9 - 10	15 - 18	22 - 26	30 - 32	15 - 20	-	65 - 70
Judía	0 - 2	10 - 14	16 - 18	21 - 28	28 - 35	15 - 20	-	-
Melón	0 - 2	12 - 14	18 - 21	24 - 30	30 - 34	20 - 22	-	60 - 80
Calabacín	0 - 4	10 - 12	15 - 18	24 - 30	30 - 34	15 - 20	-	-
Lechuga	0 - 2	4 - 6	10 - 15	15 - 20	25 - 30	10 - 12	1.000 - 2.000	60 - 80
Fresa	-2 - 0	6	10 - 13	18 - 22	-	12 - 15	-	60 - 70
Rosa	-6 - 0	8 - 12	14 - 16	20 - 25	30 - 32	15 - 18	1.000 - 2.000	70 - 75
Gerbera	0 - 2	8 - 10	13 - 15	20 - 24	-	18 - 20	-	60 - 70
Clavel	-4 - 0	4 - 6	10 - 12	18 - 21	26 - 32	15 - 18	500 - 1.000	70 - 80
Gladiolo	0 - 2	5	10 - 12	16 - 20	-	18 - 21	-	-
Poinsettia	0 - 4	8 - 10	16 - 20	20 - 25	-	18 - 20	-	-

Fuente: adaptado de Tesi (1972).

En el interior del invernadero, las temperaturas del aire de día responden a los aportes térmicos de la radiación solar. De noche son el resultado de los intercambios radiantes que, a su vez, vienen determinados por las características de transmisividad del material de cubierta y que son diferentes según el cielo esté raso o cubierto. También dependen de los intercambios por conducción y convección y por fugas según sea mejor o peor el cierre del invernadero, muy dependientes todos ellos de la velocidad del viento. Finalmente, la condensación en las hojas y el material de cubierta afecta también a estos intercambios.

La temperatura debe medirse colocando el termómetro en abrigo ventilado por medio de un ventilador, que introduzca el aire ambiente haciéndolo circular por el sensor a una velocidad aproximada de $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. En su defecto, puede medirse con el termómetro protegido del sol, en abrigo sin ventilación forzada, pero bien aireado.

1.1.2.2 *Temperaturas del entorno radicular*

Los investigadores trabajan para develar los efectos fisiológicos y las interacciones entre las temperaturas de las partes aérea y subterránea de las plantas. La temperatura afecta las tasas de fotosíntesis y de respiración y es conveniente controlarlas con el fin de aumentar la primera de día y reducir la segunda de noche, para obtener el mayor balance de asimilados disponibles para el crecimiento de las plantas.

El interés por el calentamiento del ambiente de la raíz es creciente. De modo general, se considera que el sustrato o el suelo deben mantenerse durante la noche de 1 a 2°C por encima de la temperatura del aire. La eficacia de la raíz para desempeñar sus funciones cambia sustancialmente al variar la temperatura de su entorno. Al aumentar esta temperatura, casi siempre aumentan los parámetros de crecimiento de las plantas, hasta alcanzar un máximo, tras el que disminuyen. Hay umbrales de temperatura del suelo por debajo de los que la absorción de agua se reduce y lo mismo ocurre con el crecimiento de la planta. Los motivos son la mayor viscosidad del agua a baja temperatura y la mayor resistencia al movimiento de la misma en la raíz, a causa de una disminución de la permeabilidad celular y un aumento de la viscosidad citoplásmica. Asimismo, la actividad metabólica radicular disminuye al bajar la temperatura del medio, que también afecta a la absorción de nutrientes minerales. A baja temperatura hay mejor absorción de cationes que de aniones, lo que hace variar el pH de la solución nutritiva. También aumenta el contenido de nitrógeno en las raíces respecto al de la parte aérea. Con temperatura alta en el sustrato aumenta el nitrógeno en la parte aérea y se reduce en raíces.

El manejo adecuado y conjunto de las temperaturas del aire y del suelo produce efectos óptimos. Por ejemplo en rosa, una consigna de temperatura del aire de $14 - 15^\circ\text{C}$, reduce las pérdidas por respiración y mejora la asimilación neta y una temperatura alta del suelo o sustrato, 21°C , aumenta la absorción de agua y nutrientes y favorece de este modo el crecimiento.

Por otro lado, el calentamiento del medio radicular es una técnica muy útil, para estimular la emisión de raíces adventicias en el material de propagación vegetativa (esquejes, estaquillas), de muchas especies ornamentales y también de especies leñosas frutales, sobre todo cuando la propagación se pretende hacer en época desfavorable de temperatura y luz escasas.

Conviene decir además que la reserva térmica del invernadero es el suelo. Debido a su elevada capacidad calorífica, el suelo actúa como un acumulador eficaz de calor durante el día. Esta eficacia varía según el tipo de suelo, pero también esto se modifica por el uso de acolchado y por la propia cubierta vegetal que sombrea el terreno. La capa de 10 cm superficiales de suelo puede aportar al aire, por la noche, con buen tiempo, más de 800 kJ.m^{-2} en octubre o abril y más de 400 kJ.m^{-2} en diciembre o enero, en clima mediterráneo. Esto hace posible un salto de 1°C respecto del aire libre durante una noche de 14 horas, en invierno y un salto de más de 2°C en una noche de 12 horas en abril. Los acolchados alteran estos efectos, al oponer una barrera a los intercambios de calor sensible y latente.

1.1.2.3 Temperatura de la planta

La temperatura foliar es el resultado del comportamiento fisiológico de la planta y es un indicador del grado de confort de la misma, mucho mejor que la temperatura del aire. La temperatura foliar resulta de un balance entre la energía de radiación neta, los intercambios de calor sensible y la energía de calor latente consumida en la transpiración. Por lo tanto, la temperatura foliar depende directamente de la capacidad que tiene la planta de transpirar, que viene determinada, si su estado hídrico es bueno y no hay restricción por cierre estomático, por la diferencia de presión de vapor de saturación entre la hoja y el aire, de modo tal que si el aire que entra al invernadero es seco, la hoja se refrigerará transpirando y la temperatura foliar descenderá por debajo de la del aire ambiente y, si es húmedo, ocurrirá lo contrario al reducirse la transpiración.

Por la noche, la temperatura foliar es el resultado de los intercambios radiantes superficiales. Esto se aprecia observando el efecto de menores desarrollo y crecimiento de las plantas que están situadas cerca de paredes orientadas al N y al O, por el llamado “efecto de la pared fría”, que determina la temperatura superficial de la hoja. Este efecto desaparece cuando se pone una cubierta doble, pues entonces la temperatura superficial de la pared cercana a la planta ya no es fría al encontrarse aislada del exterior.

1.1.3 La humedad del aire

Conceptos:

1 mb (milibar) = $0,75 \text{ mm Hg}$ = 100 Pa (pascal); 1 mm Hg = 133 Pa (entre 0 y 30°C); corresponde a 1 g agua/m^3 aire.

- P_v , Presión de vapor, presión ejercida por el vapor del agua del aire húmedo a la temperatura t .
- P_{vs} , Presión de vapor de saturación, presión ejercida por el vapor de agua del aire húmedo cuando está saturado a la temperatura t .

- HR, Humedad relativa, es la relación entre la presión parcial del vapor de agua del aire y la presión de saturación de ese vapor a una temperatura dada, expresada como porcentaje. Carece de verdadera significación si no va asociada a la temperatura

$$HR = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100$$

- DPV, Déficit de presión de vapor o déficit de saturación, es un índice del déficit de saturación o poder desecante del aire, cantidad de agua que el aire puede absorber hasta saturarse, a una temperatura dada

$$DPV = P_{vs} - P_v$$

- Tr, Punto de rocío, temperatura a la que debe descender el aire, a presión constante y contenido de vapor de agua constante, para que se produzca su saturación.
- HA, es la humedad absoluta del aire

$$HA = \frac{m_{va}}{V_{as}} \text{ (g.m}^{-3}\text{)}$$

m_{va} , es la masa del vapor de agua del aire
 V_{as} , es el volumen de aire seco

Los sensores más extendidos para medir la humedad relativa en invernadero son del tipo capacitivo. En este sensor un material polímero orgánico higroscópico fabricado en capa muy fina, cambia su constante dieléctrica al absorber o perder vapor de agua en función de la humedad del aire del entorno, esto hace variar la capacitancia del material resultando variaciones de impedancia lineales con la humedad del aire y por lo tanto registrables. Estos sensores son precisos en el rango entre 10 y 90% de humedad y gracias a su fabricación en capa muy delgada producen una respuesta muy rápida. Estos higrómetros son bastante resistentes a las condiciones agresivas de los invernaderos, a diferencia de los higrómetros resistivos que no soportan ambientes polvorientos ni productos químicos, esto aparte de su lenta respuesta, que dificulta su aplicación como sensor de control. También se pueden emplear psicrómetros para la medida de la humedad. El psicrómetro consta de dos termómetros, uno mide la temperatura normal del aire y otro la temperatura resultante de mantener húmedo el bulbo del termómetro, envuelto en un tejido de algodón. De la diferencia entre las temperaturas de los dos termómetros, con la ayuda de una tabla o un diagrama psicrométricos, se determina la humedad relativa correspondiente del aire. El psicrómetro es más preciso que el resto de los sensores en condiciones de alta humedad,

pero requiere atención y más mantenimiento para que sus datos sean fiables cuando el nivel de humedad es bajo y por ello se usa menos, excepto en trabajos experimentales en los que sea importante un alto grado de precisión.

El déficit de humedad del aire, expresado como déficit de presión de vapor de agua, DPV, es frecuente que sea elevado en los invernaderos en las horas intermedias del día, cuando las condiciones de radiación solar son de alta intensidad. Cuando se producen estas condiciones, el cultivo se ve forzado a aumentar su tasa de transpiración para refrigerarse y puede ocurrir que la capacidad de absorber agua por las raíces no sea suficiente para reponer las pérdidas por la transpiración, provocando un desequilibrio hídrico en la planta, con consecuencias negativas para su crecimiento y desarrollo, e incluso para su integridad. En general, se considera que valores del DPV superiores a 2 kPa, que van normalmente asociados con altas temperaturas, pueden reducir la tasa de asimilación neta de los cultivos bajo plástico. La mayor parte de los cultivos se adaptan a márgenes amplios de humedad relativa del aire, siempre que los cambios no se produzcan con brusquedad. La humedad afecta la tasa de transpiración de la planta y los procesos relacionados con ella, como la regulación estomática, la absorción de nutrientes minerales y la distribución de hormonas. Un DPV bajo ($< 0,3 - 0,5$ kPa) puede reducir la tasa de crecimiento, provocar síntomas de deficiencias nutritivas y limitar los procesos reproductores, como el transporte del polen. A partir de estos niveles conviene deshumidificar el aire (Bartzanas *et al.*, 2005). Si desciende de 0,2 kPa, aumentan los riesgos de enfermedades criptogámicas y los trastornos fisiológicos. Por el contrario, un DPV alto ($> 2,5$ kPa) induce el cierre de los estomas y provoca estrés hídrico y térmico en las plantas, además de limitar, en casos extremos, los intercambios de CO_2 y, por lo tanto, la fotosíntesis. Se considera que entre 0,3 y 1,0 kPa el cultivo se encuentra en condiciones higrométricas óptimas.

Otra manifestación de la humedad es la condensación del agua en la pared interna de los plásticos, que tiene un inconveniente grave, el goteo sobre las plantas, aparte de las pérdidas de luz extra que produce por el aumento notable de la reflexión. Este problema trata de resolverse por medio de aditivos a la resina del plástico en su proceso de fabricación, que aumentan las propiedades de tensión superficial con el agua, para que se formen ángulos menores de contacto entre el plástico y la gota e impidan la formación de gotas grandes, cuyo peso exceda la fuerza de adhesión al plástico, facilitando, por el contrario, que el agua cubra la superficie del polímero, formando una lámina fina de pequeñas gotitas de agua. Esto sin olvidar que la inclinación de la cubierta también influye en la estabilidad del agua condensada, pues así como en la lámina de polietileno sin aditivos antigoteo, al aumentar la inclinación de la cubierta entre 15 y 40°, aumentan tanto el goteo como el deslizamiento del agua condensada, en las láminas antigoteo se observa una reducción o desaparición

del goteo y un aumento considerable de la cantidad de agua que se desliza por la lámina sin gotear sobre el cultivo (Gbioreczyk *et al.*, 2004).

En la figura 1 (1a a 1e) se observan características de diferentes tipologías de invernaderos.

1.1.4 Viento

La medida de los parámetros del viento en el exterior son de importancia capital, ya que su fuerza o velocidad y su dirección son determinantes de las características constructivas de los invernaderos, en particular de la resistencia de las estructuras, de la localización de las aberturas de aireación estática y de los intercambios de energía con el exterior y la orientación, así como de la valoración de la conveniencia de colocar cortavientos. En los casos de riesgos de vientos fuertes inesperados, el sistema de control de las ventanas del invernadero, debe poder accionar el cierre parcial o total de las ventanas que, por su posición respecto al viento y según su velocidad, puedan ser dañadas. Se considera que el viento es fuerte si su velocidad es superior a $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

1.1.5 Exigencias de las plantas

Con las medidas de las variables climáticas internas y externas al invernadero, los sistemas comerciales de control del clima pueden regular los equipos de ventilación, calefacción, sombreado, humidificación, etc. Por otra parte, la tendencia general es medir las variables del clima del invernadero, pero asimismo sería interesante conocer las condiciones del microclima que rodea a la planta y que afecta los flujos de masa y energía entre el cultivo y su entorno. Conocer las condiciones de este entorno inmediato a la planta permitiría optimizar las estrategias del control. Está claro que todas las variables referidas describen el ambiente físico en el que se desarrolla el cultivo, pero ninguna de ellas mide una sola variable de la propia planta. Este modo de funcionar tiene un coste en términos de precisión, ya que supone que el cultivo tendrá unas respuestas a las condiciones ambientales definidas por las medidas, pero no analiza las respuestas del cultivo propiamente dichas. Por ejemplo, el déficit de la presión de vapor de agua del aire, el DPV, que se suele estimar midiendo la temperatura del aire del invernadero. Una de sus aplicaciones es la regulación del estado de higrimetría ambiente, con el fin último de regular la transpiración de la planta; pero todo ello se hace a partir de una medida física indirecta. El resultado es sólo una aproximación a la realidad, pues lo que gobierna los intercambios de vapor de agua de la planta es el gradiente de presión de vapor entre la hoja y el aire circundante y este gradiente depende de la temperatura foliar, por lo que medir la temperatura foliar, sería una variable más representativa para emplearla en el control del clima del invernadero. La medida de la temperatura del dosel por termometría IR no es invasiva y es repetible. Los problemas actuales son el calibrado de los sensores y las inter-

ferencias de otros cuerpos cercanos que también emiten radiación IR (suelo, acolchado, estructura, etc.).

1.1.6 Efecto invernadero

Hay dos fenómenos diferentes que definen este efecto típico de los invernaderos:

- a. Un efecto abrigo, de reducción de intercambios de aire con la atmósfera.
- b. Un efecto invernadero propiamente dicho, debido a que la cubierta sea más o menos opaca a la radiación infrarroja larga, IRL, de 10 a 15 μm (10.000 a 15.000 nm) emitida por el suelo, la vegetación y otros elementos interiores del invernadero, expuestos a los rayos solares (infrarrojos cortos, IRC, y visibles) para los que la cubierta es muy transparente.

El resultado es un salto térmico variable durante el día, según la eficacia de la aireación, el nivel de fugas, y el coeficiente global de transmisión térmica de la cubierta.

2. Temperaturas bajas

Como se cita en el punto 1, las temperaturas mínimas limitantes son una de las características frecuentes en las regiones en las que se practica la horticultura protegida bajo plástico. Los invernaderos más frecuentemente empleados en estas zonas son de estructuras simples, de bajo coste, que no admiten inversiones en sistemas de calefacción costosos. Las soluciones para evitar las limitaciones térmicas deben ser por lo tanto de bajo coste relativo y a ellas se dedica una atención especial, sin profundizar en los sistemas de calefacción más tradicionales que, por otra parte, son muy conocidos.

2.1 Pérdidas de calor en el invernadero

El invernadero pierde calor por:

- Convección, que es la transmisión del calor entre una superficie y un fluido en movimiento, por ejemplo entre el aire interno del invernadero y la superficie interna del material de cubierta.
- Conducción, que es la transmisión del calor entre las moléculas de un sólido o entre dos sólidos en contacto, por ejemplo desde la superficie interior hasta la superficie exterior, a través del material de cobertura del invernadero.
- Radiación, que es la transmisión del calor entre las superficies de dos cuerpos que no se tocan, y sin un fluido que actúe como vehículo; la energía emitida por el cuerpo radiante es directamente proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta (ley de Stefan-Boltzman).
- Fugas, es decir, por grietas en el material de cobertura y huecos en la estructura.

- Conducción por el suelo, aunque normalmente se desprecian por su poca entidad respecto del total.
- Condensación y evapotranspiración, que en invernadero se concreta, en la práctica, en la transpiración del cultivo y en la condensación y evaporación sobre las paredes y techo del material de cubierta.

El balance de calor del invernadero se establece como resultado entre las ganancias por el aporte de la radiación solar principalmente y, en su caso, por la calefacción y las pérdidas enumeradas anteriormente.

2.1.1 Estimación y cálculo de las pérdidas de calor del invernadero

Pérdidas por conducción-convección:

$$Q_{cc} = K_{cc} \cdot S_c \cdot \Delta t \quad (\text{W})$$

$$K_{cc} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C})$$

S_c , es la superficie del material de cubierta (m^2)

Δt , es la diferencia entre las temperaturas interna del invernadero y externa ($^\circ\text{C}$)

K_{cc} , es el coeficiente de pérdidas por conducción-convección (tabla 2)

α_i , y α_e son los coeficientes de intercambio de calor convectivo entre el aire y las paredes interna y externa

e , es el grosor del material de cubierta (m)

λ , es el coeficiente de conductividad térmica del material de cobertura

Pérdidas por fugas (Montero *et al.*, 1998):

$$Q_f = mC \cdot t \quad (\text{W})$$

C , es el calor específico del aire ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}$)

m , es la masa renovada de aire del invernadero ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Δt , es la diferencia entre las temperaturas interna y externa ($^\circ\text{C}$)

Véase la tabla 3.

Pérdidas por radiación nocturna (Montero *et al.*, 1998):

$$Q_r = \varepsilon \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (\text{W})$$

ε , emisividad a través de la cubierta del invernadero

σ , constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}$)

T_2 , temperatura del cielo (cuerpo negro) ($T_2 = 0,0055 \cdot T_a^{1,5}$)

T_a , temperatura del aire exterior ($^{\circ}\text{K}$)

T_i , temperatura del aire del invernadero ($^{\circ}\text{K}$)

Las pérdidas por el suelo se estiman en el 5 al 10% adicional de las pérdidas de calor sensible y latente.

Tabla 2. Coeficientes de pérdidas por conducción y convección en invernadero.

Cubierta	K_{cc} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Cristal	6,3
Lámina de polietileno PE	6,8
Láminas de PE en cubierta doble PE-CD	4,0
Metacrilato alveolar doble	3,0
Cristal cubierta doble	3,0
Cristal más pantalla térmica	3,0
PE-CD más pantalla térmica	2,5

Fuente: ASHRAE (1989).

Tabla 3. Renovaciones del aire del invernadero.

Tipo de invernadero	N (renovaciones por hora)
Nuevo de cristal o poliéster	0,75 - 1,5
Nuevo de PE-CD	0,5 - 1,0
Viejo de cristal bien cuidado	1 - 2
Viejo de cristal mal cuidado	2 - 4
Sin viento	1
Con viento (18 km.h ⁻¹)	3

2.2 Medios pasivos para protección de las temperaturas bajas

2.2.1 Material de cubierta

La elección del material de cubierta es uno de los actos importantes que tiene que hacer el horticultor. Conseguir que la mayor cantidad posible de radiación solar penetre en el invernadero, significa preocuparse de que tanto la estructura como el material de cubierta se interpongan mínimamente entre el sol y el cultivo. La radiación solar incluye la radiación fotosintética y, asimismo, la calorífica que contribuirá en la época fría a favorecer los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas, evitando o reduciendo los gastos en calefacción. En zonas con riesgo de temperaturas bajas es conveniente elegir un material de baja transmisión de la radiación infrarroja larga (IRL), es decir, con el mayor poder aislante térmico posible, como el polietileno térmico. La alta transmisión a dicha radiación calorífica del polietileno normal (tabla

4) se reduce cuando se cubre por una capa de agua de condensación, fenómeno normal en los invernaderos de cubierta plástica, cuando la temperatura interna de la lámina desciende por debajo de la del punto de rocío del aire ambiente interno.

Tabla 4. Transmisividad a la radiación infrarroja larga de láminas de cobertura de invernadero.

Material	Transmisividad PAR directa (%)	Transmisividad IR largo (%)
Polietileno normal	91	68
Polietileno térmico	86	< 25
EVA	90	18 - 27
PVC	90	10 - 15

Fuente: Castilla (2005).

Por otra parte, la condensación aumenta las pérdidas por radiación del material hacia el exterior, ya que el agua cede calor al material y eleva su temperatura. Esta pérdida resulta muy pequeña, de ahí que no se tenga en cuenta. En los materiales con buenas características aislantes la condensación solo produce inconvenientes, ya que aumenta las pérdidas de luz por reflexión porque la cubierta se comporta como un espejo y además el goteo sobre el cultivo puede favorecer las enfermedades.

En los invernaderos de cristal, la condensación produce aumento de pérdidas por convección por aumento de la temperatura superficial del material de cubierta. En los de polietileno, por la noche con cielo cubierto y temperatura exterior baja, también la condensación aumenta la temperatura superficial y como consecuencia aumentan igualmente las pérdidas por convección.

Si el cielo está despejado las pérdidas por radiación hacia el cielo son mayores que con cielo nublado y por ello se produce un descenso térmico superior y un aumento de la condensación (tabla 5). En estas condiciones, si la temperatura exterior es de 10°C, las pérdidas por convección disminuyen; mientras que si la temperatura exterior es de 0°C, el flujo convectivo aumenta.

Tabla 5. Coeficientes globales de pérdidas térmicas de materiales de cubierta de invernadero con cielo despejado.

Tipo de cubierta	K (W.m ⁻² °K)
Vidrio	6,1
Polietileno larga vida PELV	8,8
EVA	7,8
Polietileno térmico PET	7,2

continúa

Sustratos, manejo del clima, automatización y control
en sistemas de cultivo sin suelo

PELV más PELV	6,0
EVA más PELV	5,4
PELV más EVA	5,3
PET más PELV	5,1
PELV más PET	4,7
PET más EVA	4,3
PET más PET	4,1
Vidrio más PELV	4,2
Vidrio más EVA	3,9
Vidrio más PET	3,5
Vidrio más vidrio	3,1

Fuente: Nisen y Deltour (1986).

Los depósitos de polvo y suciedad también hacen decrecer la transmisividad de la radiación IRL de los materiales de cubierta, pero el efecto negativo de la suciedad es mayor debido a la pérdida de luz para la fotosíntesis. Otros factores que contribuyen a reducir las pérdidas de calor del invernadero son mejorar su cerramiento para disminuir las fugas de aire, que es un aspecto de gran importancia en estructuras sencillas. También el empleo de cubiertas dobles es un buen método de mejora térmica, en el que debe tenerse presente la pérdida de luz que lleva consigo (tablas 5, 6 y 7); cada capa de material que se interponga entre el sol y el cultivo produce pérdida de luz disponible para la fotosíntesis (tablas 6 y 7). El uso de cubierta doble requiere un buen cierre del invernadero, ya que las pérdidas por fugas pueden llegar al 30-35% del consumo de energía en un recinto de doble cubierta cerrado deficientemente.

Según los resultados obtenidos en ensayos efectuados en España, con cubiertas dobles se pueden obtener saltos térmicos medios nocturnos de 2 a 3°C superiores al testigo de cubierta simple. En noche de helada se han medido 5°C por encima del exterior, mientras que el testigo de cubierta simple superaba al exterior en solo 1°C (Montero *et al.* 1986; Martínez y Bimbo, 1992; Martínez, 1994) (tabla 6).

Tabla 6. Efectos de cubiertas simple y doble de invernadero sobre el microclima y la tasa de fotosíntesis neta de gerbera.

	Radiación PAR ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)	Humedad (%)	Fotosíntesis ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Invierno:				
Exterior	879	12,5	62	-
Cubierta simple PET	570	21,6	66	12,0
Cubierta doble PET/EVA	456	24,0	82	9,5
Primavera:				
Exterior	1.350	25,2	27	-
Cubierta simple PET	950	33,6	29	14,0
Cubierta doble PET/EVA	880	37,9	31	15,5

PET, polietileno térmico; EVA, acetato de etileno y vinilo.

Fuentes: Martínez y Bimbo (1992); Martínez (1994).

La inercia térmica ambiente es mayor bajo cubierta doble que en el testigo de cubierta sencilla y la temperatura de la cubierta interna en cubierta doble es mayor que la del testigo, lo que indica menores posibilidades de condensación de agua en la lámina. Puede haber condensación en los dos casos, pero con diferente intensidad.

En cuanto a la humedad se refiere, los niveles de humedad relativa se caracterizan por igualdad de las máximas de la noche debido a la saturación y por ser mayores las mínimas bajo cubierta doble que las del testigo.

Tabla 7. Porcentajes de transmisividad a la radiación solar de invernaderos con cubiertas simple y doble (días soleados de 12 h).

Mes	Cubierta doble		Cubierta simple	
	sur	norte	sur	norte
Diciembre	51	34	61	47
Enero	51	33	67	45
Marzo	69	57	79	70

Fuente: Montero *et al.* (1986).

Por otro lado, la temperatura del material de la cubierta y la de las superficies de las plantas (hojas, frutos) pueden seguir una evolución paralela, relativamente independiente de la temperatura del aire interior; con lo cual la temperatura foliar puede salir beneficiada bajo cubierta doble.

2.2.2 Pantallas térmicas

El efecto de las pantallas, como el de la cubierta doble, se basa en la reducción de los intercambios radiantes y los de conducción-convección, pero

también se alteran los intercambios de calor sensible y latente entre las plantas, el suelo, el aire, la estructura y la evapotranspiración. Los efectos sobre los intercambios radiantes dependen de las características de transmisividad (τ), emisividad (ϵ) y reflectividad (ρ) de la pantalla para la radiación infrarroja larga. Si τ y ϵ son pequeñas, como es el caso de las pantallas metalizadas y con tratamientos especiales, se puede obtener una gran reducción (60%) de pérdidas por radiación. Si τ es grande o ϵ es grande, como ocurre con las láminas de polietileno y con los materiales tejidos, se obtiene una reducción pequeña de las pérdidas por radiación.

Los efectos sobre los intercambios por conducción y convección dependen de la permeabilidad del material al aire.

2.2.2.1 Efectos de las pantallas

Los efectos de las pantallas térmicas se resumen como sigue:

- Aumentan la temperatura del aire de 1 a 2°C.
- Aumentan la temperatura de la hoja debido a ser mayor la temperatura superficial de la pantalla que la del material de cubierta del invernadero. Las hojas tienen como referencia la temperatura de la pantalla para sus intercambios por radiación y tratan de equilibrar su temperatura con la de la pantalla.
- Aumentan la humedad del aire (10 a 15%). Esto conlleva un riesgo de condensación por encima de la pantalla.
- Reducen la temperatura de la cubierta exterior, que produce descenso de pérdidas por convección con el aire libre y menor sensibilidad térmica del invernadero al viento.

Hay un número muy elevado de materiales para pantallas en el mercado y siguen apareciendo materiales con mejores propiedades.

2.2.2.2 Propiedades exigibles a una pantalla térmica

Para obtener una función óptima la pantalla debe cumplir tres requisitos: *i*) Tener baja transmisividad para la radiación IR; *ii*) Tener alta reflectividad para la radiación IR; y *iii*) Permitir una mínima convección hacia arriba. Además, es importante que reúna el máximo de las propiedades siguientes: *i*) Reflejar la luz hacia el cultivo para mejorar su balance luminoso; *ii*) Ser flexible y tener suficiente resistencia mecánica, ya que de este modo puede mecanizarse su plegado y extensión; *iii*) Transmitir la humedad para evitar niveles excesivos en el espacio del cultivo; y *iv*) Ser resistente a los factores del clima y a los productos que se manejan en los invernaderos.

Hay dos grupos de materiales, las láminas de plástico y las fibras textiles o acrílicas.

Con el fin de mejorar la eficiencia en el uso de las pantallas, actualmente se tiende a compaginar las propiedades aislantes con las de porosidad para el flujo del vapor de agua, ya que la pérdida de luz que producen las pantallas cuando están plegadas, junto con la pérdida de temperatura a la que obliga su plegado para ventilar y eliminar los excesos de humedad y la condensación de agua sobre su superficie superior, disminuyen notablemente su eficacia como técnica de ahorro de energía (Bakker *et al.*, 2008). Por ello, se han desarrollado materiales tejidos, fibras porosas que combinan ambos objetivos, tratando de encontrar un equilibrio.

Por su parte, las láminas de plástico son resistentes al agua pero no dejan pasar la humedad a su través, con lo cual elevan la humedad del aire interno y esto puede afectar a muchas funciones fisiológicas del cultivo y a su estado sanitario. También esto aumenta el riesgo de condensación sobre la cara interna de la pantalla y en la parte alta del cultivo, lo que aumenta asimismo el riesgo de enfermedades. Muchas láminas tienen una alta transmisividad para la radiación IR, con la excepción de las que llevan depósitos metálicos en su superficie (láminas metalizadas).

Las láminas transparentes pueden permanecer extendidas durante el día, ofreciendo por ello un doble uso, como cubierta doble de día y pantalla nocturna. Estos materiales son más baratos por su simplicidad, aunque no son específicos en cuanto a su función. Suelen ser frágiles y por ello tienen que renovarse con frecuencia.

Las pantallas de fibras y tejidos no resisten al agua, dejan pasar la humedad y por ello elevan poco la humedad del aire del entorno de las plantas, con poco riesgo de condensación en su parte superior o en el cultivo. En lo que respecta a la radiación, tienen baja transmisividad al IR, son útiles para sombrear y, por consiguiente, deben plegarse durante el día para dejar pasar la luz. Por otro lado, son caras pero son más duraderas que las láminas y son más difíciles de metalizar, aunque también se fabrican con esta característica.

Según los materiales que la constituyen, la pantalla térmica tiene eficacia diversa en la reducción de pérdidas de calor (tabla 8).

Tabla 8. Economía de energía de materiales y pantallas comparados con la cubierta de cristal.

Material	Economía de energía (%)
Cristal cubierta doble	36
Lámina de tejido exterior	41
Lámina de tejido interior	45
Lámina de PVC exterior	37
Lámina PVC interior	31

continúa

Tejido de sombreado exterior	11
Tejido de sombreado interior	16
Hoja de aluminio laminado	50
Tejido negro fotoperiódico	37
Lámina de PE negro	35
Poliéster aluminizado reflectante	50

Fuentes: Bailey (1981); Winspear y Bailey (1978).

Las pantallas pueden ahorrar entre un 15 y 35% de gasto en energía. No obstante, la pérdida de luz que provocan es superior a un 5% y esto en condiciones de poca luz puede repercutir con un 5% o más de reducción del crecimiento.

Normalmente, la rentabilidad de la inversión aumenta cuando puede usarse también en tiempo caluroso, como material de sombreo.

3. Sistemas de calefacción del invernadero

La eficacia de la calefacción del invernadero depende del suministro de la cantidad suficiente de calor a la temperatura adecuada y de la distribución del calor correctamente. De ahí la importancia del diseño e instalación de un buen sistema de distribución para conseguir un reparto uniforme y un buen nivel de temperatura.

Los problemas que se pueden producir como consecuencia de una mala distribución son: crecimiento y desarrollo irregular de las plantas; aumento de enfermedades debido a zonas húmedas, con baja temperatura y condensación sobre las plantas; y muerte de plantas por frío en caso de helada.

3.1 Características exigibles a un sistema de calefacción

Una instalación de calefacción debe cumplir los siguientes requisitos: *i)* Tener capacidad suficiente; cualquiera que sea la temperatura exterior, la temperatura interior debe mantenerse constante; *ii)* Distribuir uniformemente el calor en la zona de crecimiento de las plantas; *iii)* Ser automatizable. Debe permitir diferentes niveles de temperatura de día que de noche; *iv)* Ser fiable y sencilla, de fácil mantenimiento sin necesidad de personal especializado; *v)* Ser viable desde el punto de vista económico; y *vi)* Usar un combustible fácilmente suministrable.

3.2 Principales factores a tener en cuenta para el diseño y la selección de un sistema de calefacción

3.2.1 Número de cubiertas

El número de capas de la cubierta del invernadero aumenta su aislamiento y, por lo tanto, reduce las necesidades de calor (tablas 2, 5, 6 y 8).

Con 2 a 20 cm de cámara entre las dos cubiertas, se consigue la eficacia máxima de aislamiento. A partir de ahí pueden aumentar las pérdidas, debido a mayores flujos de convección y conducción dentro del espacio de la cámara de aire.

Dos cubiertas pueden reducir las pérdidas de calor hasta cerca del 50% respecto a una sola cubierta. Tres cubiertas pueden aumentar un 16% más la reducción de necesidades de calor, pero esta disposición no es frecuente debido a la pérdida de luz y a las dificultades técnicas que plantea.

3.2.2 *El tipo de material de cubierta*

Si el material es o no termoaislante, si se produce más o menos condensación sobre él, las pérdidas de calor cambian y también por ello las necesidades de calefacción (tablas 2 y 4). Una condensación abundante llega a cubrir cerca del 70% de la cubierta. En este caso, la diferencia de economía de energía entre usar polietileno térmico o polietileno normal es sólo del 12,5%, debido a que la capa de condensación actúa como filtro de la radiación calorífica evitando que escape al exterior.

Al ocurrir la pérdida por radiación directamente desde las hojas, éstas pueden estar 1°C o más, más frías en invernadero de polietileno que en uno de cristal a la misma temperatura del aire. Con cubiertas de láminas de PVC o poliéster, las pérdidas por radiación son pequeñas.

3.2.3 *Hermeticidad*

Cualquier abertura, desajuste en ventanas o en puertas, en juntas entre paneles en el caso de placas o en solapes en el de láminas, implica aumento de pérdidas de calor por fugas (tabla 3). Para el diseño de la calefacción se considera un 10 a 15% de aumento en las pérdidas teóricas debidas a fugas, en invernaderos de cristal de cubierta simple. En los invernaderos de lámina de plástico, las pérdidas por fugas son mínimas si están bien contruidos.

3.2.4 *Volumen y superficie del invernadero*

El volumen no es importante para el cálculo de las necesidades de calor. Es importante la relación entre la superficie de la cubierta y la del suelo. Sin embargo, sí es necesario disponer de espacio para la mezcla y homogenización de las masas de aire ambiente con el aire caliente, antes de que éste alcance las plantas. Se considera que un mínimo de 1/3 del volumen total debe estar libre de obstáculos para facilitar la mezcla del aire de la calefacción o ventilación con el aire del invernadero. Por ello en la actualidad se tiende a construir invernaderos más altos, con mayor volumen sobre el cultivo, ya que esto beneficia el comportamiento climático del invernadero tenga o no calefacción, haciéndolo menos sensible a las variaciones del clima exterior.

3.3 Cálculo de las necesidades de calor

Se puede obtener una estimación de las necesidades de calefacción nocturna, utilizando un coeficiente K global de pérdidas de calor ($\text{W.m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$) para estimar las pérdidas de calor globales:

$$Q = KA(t_i - t_e) \quad (\text{W})$$

y sumando la estimación de las pérdidas por fugas:

$$Q_f = mC(t_i - t_e) \quad (\text{W})$$

También, sin cálculo, estas pérdidas se pueden estimar en un 10% de las globales

A = superficie del material de cubierta (techo y paredes) (m^2)

t_i = temperatura interna mínima requerida (consigna de calefacción) ($^\circ\text{C}$)

t_e = temperatura exterior ($^\circ\text{C}$) (media de mínimas del periodo más frío)

K = coeficiente global de pérdidas de calor ($\text{W.m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}$)

C = calor específico del aire ($\text{J.kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$)

m = masa de aire del invernadero renovada por fugas (kg.s^{-1})

Necesidades por m^2 de invernadero, si A_s es la superficie de suelo cubierto (m^2):

$$q = \frac{A}{A_s} K(t_i - t_e) \quad (\text{W.m}^{-2})$$

3.3.1 Saltos térmicos para el diseño de la calefacción

Según el grado de protección que sea necesario dar al cultivo, la consigna de la calefacción se puede establecer con varios criterios.

Salto térmico medio, ΔT_1 , es la diferencia entre la temperatura óptima nocturna y la temperatura media de mínimas del mes más frío.

Salto térmico para asegurar cero vegetativo en condiciones extremas, ΔT_2 , es la diferencia entre la temperatura mínima biológica y la temperatura mínima absoluta.

Salto de temperatura mínima base, ΔT_3 , es la diferencia entre la temperatura óptima nocturna y la temperatura mínima base (mínima de 5 días al año, según series de 10 años).

De estos cálculos se puede tomar para el dimensionado de la instalación el salto térmico mayor.

3.4 Sistemas de calefacción por radiación-convección

El agua caldeada por una caldera circula por tubos de acero, de aluminio o de plástico. Una parte del calor se distribuye por radiación directamente desde la superficie de los tubos a las superficies circundantes, plantas, suelo y cubierta principalmente. El resto se transfiere por conducción y convección al aire del invernadero.

3.4.1 *Tuberías laterales radiantes o de aletas*

Anchura máxima del invernadero 8 a 9 m. Es normal esta instalación en invernaderos de cristal. Si la circulación del agua es forzada, la temperatura de la tubería es uniforme y la distribución del calor buena. Una parte importante de las pérdidas tiene lugar por las paredes y por ello es conveniente situar tuberías en los lados para compensar dichas pérdidas. También debe haber una ligera separación entre las tuberías y la pared y una ligera separación entre las propias tuberías. La primera tubería se coloca junto al suelo. Para invernaderos más anchos es necesario que $1/3$ de las tuberías estén situadas arriba para evitar heterogeneidad de temperatura y los $2/3$ restantes van a los lados. En la figura 3a se observa la instalación de calefacción por tubos metálicos junto al suelo y móviles junto al cultivo.

En invernaderos múltiples se colocan tuberías horizontales apiladas en la vertical de cada limahoya de la cubierta.

Actualmente se sabe con certeza que, desde el punto de vista del aprovechamiento de la energía, la mejor localización de un tubo calefactor radiante es cerca de las plantas. Cuando se colocan los tubos en alto se gasta más energía, de un 5 a un 10%, en igualdad de condiciones (Kempkes *et al.*, 2000).

El principal inconveniente del sistema tradicional de tuberías radiantes con tubos metálicos y caldera, es el alto coste de la instalación y la necesidad de personal especializado para el manejo de instalaciones grandes.

3.4.2 *Tuberías radiantes sobre el suelo*

Otra solución consiste en colocar $1/3$ de las tuberías o más sobre el suelo, o bajo las mesas de plantas. Así se consigue el doble efecto de acercar calor a las plantas y llevar calor al suelo. Un inconveniente de este sistema es que las tuberías estorban al cultivar el suelo y hay que desmontarlas.

Un sistema alternativo de calefacción es por radiación IR de onda larga (IRL), que no se ha generalizado en el cultivo comercial por razones de costes de la energía. Sin embargo, este sistema es más eficiente que el de tubos radiantes llenos de agua caliente porque las superficies del cultivo y del suelo reciben el calor directamente, sin necesidad de convección por el aire, lo que además reduce considerablemente las pérdidas de calor del invernadero porque se disminuye la convección. Estudios a nivel experimental han demostrado el interés potencial de la calefacción radiante IRL, con incrementos de

la eficiencia del 45% respecto a los sistemas tradicionales por tubos con agua caliente (Kavga *et al.*, 2008).

3.5 Sistemas de calefacción por convección

3.5.1 *Aeroterms*

Circula agua caliente a 50-60°C, procedente de una caldera, por un intercambiador de calor a base de tubos metálicos con superficie ampliada por medio de aletas, a través de los cuales se impulsa el aire del invernadero por medio de un ventilador para que regrese caliente (figura 3b). La mayor o menor superficie de intercambio permite trabajar con agua a menor o mayor temperatura, respectivamente. El perfil de temperatura que se consigue es heterogéneo y da lugar a un gradiente vertical notable. A veces se usan tuberías a los lados para complementar, pero la heterogeneidad persiste. Este sistema es más barato que el de tuberías radiantes metálicas y es útil cuando no es necesario un control muy preciso de la temperatura.

En invernaderos de más de 20 m y hasta 40 m de ancho son necesarios dos aeroterms en el centro y en sentido contrario y dos ventiladores de circulación adicionales para uniformar la temperatura.

3.5.2 *Generadores de aire caliente*

Son equipos más sencillos, ya que no precisan caldera. Se alimentan con gasóleo calefacción o con gas, que se quema en una cámara de combustión, cuyos gases pasan por un intercambiador tubular de calor, por el que circula el aire del invernadero que, ya caliente, es impulsado por ventilador al espacio del invernadero. Este aire no tiene contacto con los gases de la combustión, por lo que está limpio. Los gases son expulsados al exterior por chimenea. Hay generadores de menor coste que no tienen intercambiador de calor y expulsan directamente los gases de la combustión al ambiente del invernadero. No es recomendable usar este tipo de equipo, ya que dichos gases de combustión pueden contener productos fitotóxicos que intoxiquen el cultivo. Incluso en los casos en los que se emplee gas propano o gas natural como combustible, aun cuando lo normal es que se produzca CO₂ como resultado de la combustión; si ésta es incompleta, pueden introducirse en el invernadero gases tóxicos, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

La salida libre del aire caliente de los aeroterms o de los generadores de aire caliente produce una distribución muy heterogénea del calor en el invernadero, tanto horizontal como verticalmente. Este problema se resuelve colocando mangas de polietileno perforadas desde la salida del convector hasta el punto más alejado. Tanto la dimensión como los intervalos de los orificios de salida del aire pueden variar a lo largo del tubo, para conseguir un reparto homogéneo del calor. Hay varias posibilidades de colocación de estas mangas o tubos flexibles:

3.5.2.1 Tubos de PE perforados colocados junto al suelo

Tubos de PE de 15 a 20 cm de diámetro con agujeros perforados a intervalos entre 15 y 60 cm, son un sistema barato y práctico. Mejoran la distribución del calor longitudinalmente, pero no la distribución vertical, que es otro problema. Una variación gradual de la distancia entre los agujeros mejora la distribución longitudinalmente. Este dispositivo se puede usar también para mejorar la ventilación moviendo el aire del invernadero. Si éste tiene más de 20 m de largo, el generador o aerotermo debe ponerse en el centro con tubos en las dos direcciones opuestas. En la figura 3c se observa un generador de aire caliente con manga distribuidora en posición baja.

3.5.2.2 Tubos de PE perforados colocados en alto

Se trata de un sistema muy extendido. En invernadero de menos de 9 m de ancho se usa un tubo y para mayor anchura se usan dos tubos paralelos. Como en el caso anterior, la distancia entre orificios debe ser más corta a medida que nos alejamos del generador, para lograr mejor distribución longitudinal del calor. Hay también gradiente vertical de temperatura, que a veces es baja junto al suelo, incluso con riesgos de condensación sobre las plantas y alta, ocasionalmente excesiva, en la zona superior. Buscar la posición más acertada del termostato es fundamental en estos casos, con el fin de asegurar una buena protección del cultivo y evitar gastos innecesarios de energía.

3.6 Calefacción del suelo con agua templada

En los tipos de protecciones sencillas, artesanas, usados en los países cálidos y de invierno suave, el calentamiento del aire por convección forzada implica, a menudo, un alto consumo de energía, por las pérdidas debidas a la poca estanqueidad de las construcciones. El calentamiento del suelo es relativamente barato en comparación con otros métodos de calefacción y concentró mucha atención tras la primera crisis del petróleo en los años 70, cuando se creyó conveniente invertir dinero en el ahorro de energía y en el aprovechamiento de las energías alternativas y de fuentes de energía residual del sector industrial. Por otro lado, en muchos casos las temperaturas de estos recursos eran moderadas, por lo que se comprobó que era conveniente la colocación de los elementos calefactores en la parte baja, sobre el suelo, cerca del cultivo, con el fin de aumentar los aportes radiantes a las plantas y reducir las pérdidas hacia la estructura. Esto es lo lógico cuando se trata de aprovechar recursos a dichas temperaturas moderadas, como pueden ser las aguas geotérmicas, los efluentes térmicos industriales, el calentamiento del agua por energía solar, etc. (Baille *et al.*, 1978; Martínez, 1980; Arenas *et al.*, 1982, 1984; Boulard y Baille, 1984; Martínez *et al.*, 1982, 1983, 1985; Arenas y Martínez, 1985; Baille, 1988). Para el calentamiento del suelo es ideal el uso de estos recursos de aguas templadas, ya que, por una parte, los tubos de

plástico usados como distribuidores del calor no soportan temperaturas altas y, por otra, aplicar altas temperaturas en el suelo causaría resecaamiento y endurecimiento, lo que perjudicaría el desarrollo y las funciones de las raíces y reduciría las propiedades de transmisión térmica del suelo.

La aplicación de calor a la zona de las raíces tiene además consecuencias positivas para el cultivo, ya que el comportamiento del sistema radicular de las plantas depende de que las condiciones que encuentre en el suelo o el sustrato se aproximen o se alejen de los óptimos para la planta. En el caso de la temperatura, existen niveles que favorecen y otros que limitan tanto la tasa de absorción de agua (Romero-Aranda y Martínez, 1993), como la de nutrientes minerales (figura 2), así como también pueden favorecer o limitar el crecimiento y el desarrollo de las raíces y el reparto de asimilados en la planta y, por lo tanto, todo ello condicionar el éxito económico del cultivo (Martínez *et al.*, 1989; Romero-Aranda y Martínez, 1993; Martínez y Abdel Fattah, 1995; Roca *et al.*, 2005).

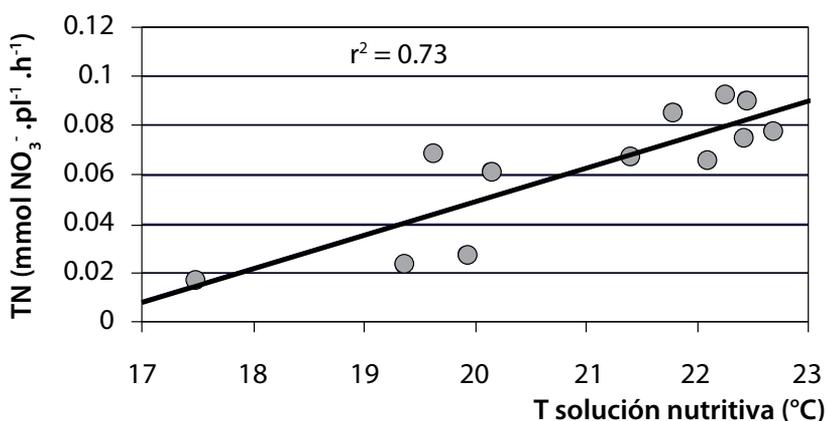


Figura 2. Efecto de la temperatura de la solución nutritiva sobre la tasa de absorción de nitrato por un cultivo hidropónico de rosa. Fuente: Martínez *et al.*, (2003).

Para el calentamiento del medioambiente radicular, hay que tener presente lo siguiente: *i*) El aire caliente se eleva; por ello, los elementos radiantes deben situarse dentro del terreno o sustrato o bien sobre él pero con una gran superficie de contacto; *ii*) Al emplear agua a temperatura moderada es necesario contar con grandes superficies de intercambio en los elementos calefactores; y *iii*) La disposición del sistema de calefacción no debe dificultar las labores del cultivo.

3.6.1 Tubos enterrados

La configuración del sistema de distribución del calor para el suelo puede hacerse de varios modos: *i*) Distribución en un sentido, fácil instalación pero requiere altos caudales y mayor coste de funcionamiento; *ii*) Distribución en dos sentidos independientes, es una instalación complicada, que requiere distribuidores y colectores en ambos extremos, por lo tanto es más cara; y *iii*) Distribución en zigzag, es una solución intermedia, con menos costes de instalación que la número dos y de funcionamiento que la número uno; cumple buenos criterios de diseño y es flexible.

3.6.1.1. Ejemplo de cálculo de instalación de tubos de plástico enterrados 10 cm

Temperatura exterior mínima media del aire t_e

Temperatura del aire interior deseada t_i

- *Demanda de calor del suelo:*

$$Q_s = mC \Delta t \quad (\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$$

C, calor específico del suelo ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}$)

m, masa de suelo $m = vd$; v, volumen de suelo a calentar (m^3); d, densidad aparente ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Δt , salto térmico;

$$\Delta t = t_{sc} - t_s$$

t_s , temperatura media del suelo del invernadero a 10 cm de profundidad

t_{sc} , temperatura deseada a 10 cm de profundidad

- *Emisión de calor del tubo:*

$$E_t = KS(t_a - t_i)$$

K, coeficiente global de transmisión térmica del tubo

S, superficie radiante del tubo $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

t_a , temperatura media del agua (media entre la entrada y la salida)

$S = 0,118 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ en polipropileno anillado (PPA); $0,063 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ en polipropileno (PP) o polietileno (PE) liso.

El coeficiente global K se calcula así:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

α_1 , coeficiente de intercambio superficial interior del tubo, depende del caudal de circulación ($0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

e_1 , grosor de pared del tubo ($0,0007 \text{ m}$ en PP; $0,002 \text{ m}$ en PE)

λ_1 , coeficiente de conductividad del tubo, $0,19$ en PPA; $0,36$ en PE

e_2 , espesor de tierra o sustrato a calentar

λ_2 , coeficiente de conductividad de la tierra o sustrato húmedos

α_2 , coeficiente de intercambio superficial tierra-aire.

- *Distancia entre los tubos:*

$$\frac{\text{n}^\circ \text{ tubos}}{m} = \frac{Q_s}{E_t}$$

distancia entre tubos (cm):

$$d = \frac{100 \text{ cm} / m}{\text{n}^\circ \text{ tubos} / m}$$

- *Diferencias de emisión calorífica entre tubos:*

Para un salto térmico $t_a - t_i = 30^\circ\text{C}$

valores de K: PPA $10,61 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}$ ($e_1 = 0,0007 \text{ m}$); PP liso $9,98 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}$ ($e_1 = 0,002 \text{ m}$); y PE liso $10,43 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}$ ($e_1 = 0,002 \text{ m}$).

valores de emisión térmica, E_t : $E_t = KS(t_a - t_i)$

PPA $37,56 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$; PP liso $18,8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$; y PE liso $19,66 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}$

- *Comportamiento en ensayos de campo (en España) (Martínez et al., 1983):*

Con tubos colocados a dos profundidades en suelo enarenado: a 10 cm y a 50 cm , con temperatura del agua de 35 a 38°C .

- a 10 cm de profundidad los tubos pueden ser más delgados, hay más cesión de calor y la localización es más cercana a las raíces, pero tiene el inconveniente de molestar para el laboreo del suelo. Como contrapartida, la cesión de calor al aire es mayor; la zona de suelo cercana al tubo está más caliente.
- b a 50 cm de profundidad, el efecto sobre la temperatura del aire es pequeño y las capas superficiales del suelo quedan a la misma temperatura, no

son afectadas. Con una densidad de 2 m tubo/m² se tiene capacidad de protección térmica en clima invernal suave.

Interesa localizar los tubos en la zona de más concentración radicular, con 1 m tubo/m² y temperatura del agua de 35 a 38°C se obtienen los efectos siguientes:

- *Tubos a -10 cm*: Δt del aire de noche 2°C sobre el testigo frío; t mínima del suelo a -10 cm = 18°C; y t mínima del suelo a -30 cm = 18°C.
- *Tubos a -50 cm*: Δt del aire sobre testigo frío = 0°C; t mínima del suelo a -10 cm = 15°C; t mínima del suelo a -30 cm = 20°C; y t mínima del suelo en testigo frío a -10 cm = 11°C y a -30 cm = 14°C.
- *Cesión de calor*: Los tubos a 50 cm de profundidad ceden 25 a 35 W por metro lineal de tubo. Esto es un buen aporte al suelo, pero escaso para el aire, aunque en clima suave puede ser suficiente.

Los tubos a 10 cm de profundidad ceden 60 W por metro lineal de tubo, que es un buen aporte para el aire en climas suaves.

Aporte energético en la campaña (y equivalente en gasóleo):

Tubos a -50 cm = 72.000 kJ.m⁻² (2,4 L.m⁻² de gasóleo)

Tubos a -10 cm = 149.700 kJ.m⁻² (5,1 L.m⁻² de gasóleo)

3.6.1.2 Aplicación para calefacción de mesas de propagación de plantas ornamentales

Con agua de 35 a 40 °C, por ejemplo con calentador de propano, se coloca tubo negro de polietileno de pared fina, de 20 mm de diámetro, en líneas separadas 20 a 25 cm. Con un termostato colocado en el sustrato se acciona la bomba de circulación a la consigna de temperatura deseada (por ejemplo a 24°C).

Comportamiento térmico de los sustratos:

En los sustratos orgánicos y artificiales, su conductividad calorífica aumenta poco con el contenido de humedad pero sí aumenta su capacidad calorífica. En los sustratos minerales la conductividad aumenta mucho con el contenido de humedad. Para contenidos altos de humedad la conductividad se estabiliza. La difusividad aumenta también con el contenido de humedad. La capacidad calorífica aumenta poco en estas condiciones.

3.6.1.3 Suelo radiante

Un suelo radiante emplea el pavimento como acumulador del calor, que es capaz de irradiarlo al ambiente aéreo con efectos notables debido a su masa y a su gran superficie. Para construir un suelo radiante, se prepara un lecho de unos 10 cm de hormigón poroso (sin arena). Los tubos de polipropileno de 20

mm de diámetro se colocan empotrados en la capa de hormigón, separados de 30 a 40 cm formando una parrilla.

Con agua a unos 35°C (el límite máximo es 50°C) circulando de 0,6 a 0,9 m.s⁻¹ por tubos de polietileno o polipropileno separados 30 cm, se obtienen unos 60 W.m⁻². Si el suelo está cubierto por macetas con plantas, el aporte de calor al aire puede descender un 25%. Este tipo de instalación requiere una inversión alta, pero su funcionamiento posterior es barato. Los mejores efectos agronómicos del calentamiento del suelo se obtienen con un aporte complementario al aire, que requerirá menor energía de la empleada si no se calentara el terreno. Para el caso de agua templada se dispone de aerotermos con mayor superficie de intercambio, que pueden trabajar satisfactoriamente en estas condiciones.

Véanse en las tablas 9 y 10 algunos datos sobre el aporte de calor al aire desde suelo calentado, para un salto térmico entre el interior y el exterior de 5°C y una temperatura del agua de 25°C.

Tabla 9. Aporte de calor al aire según la posición de los tubos de calefacción.

Posición de los tubos	W.m ⁻¹	Separación de tubos (m)	
		Cubierta PE	Cubierta doble PE
Tubos al aire	25,2	0,40	1,00
Tubos en la superficie	20	0,30	0,80
Tubos enterrados	13	0,20	0,50

Tabla 10. Coeficientes de transmisión del calor del suelo al ambiente aéreo, con tubos enterrados a 15 cm y en diferentes disposiciones.

Tipo de disposición	K (W.m ⁻² °C)
Separados 15 cm en suelo desnudo	4,2
Separados 15 cm con acolchado y bandejas	2,9
Separados 30 cm en suelo desnudo	3,5
Separados 30 con acolchado y bandejas	2,7
Separados 45 en suelo desnudo	2,9
Separados 45 cm con acolchado y bandejas	2,6
Acolchado de arena seca	4,0
Acolchado de arena húmeda	9,2

3.6.2 Colchones termorreguladores (sistema pasivo)

Consisten en tubos o colchones llenos de agua, estancos y sin circulación, depositados sobre el suelo. Actúan como colectores y distribuidores simultáneamente. Se han realizado experimentos en Grecia, sur de Francia, Italia (Sicilia), España y Chipre, que indican resultados variables, más o menos in-

teresantes según la situación geográfica y el método utilizado. Se consiguen saltos térmicos de 1 a 4 °C en las mínimas nocturnas, sobre un testigo sin este tipo de colchones. Los rendimientos de captación de energía disminuyen mucho cuando el cultivo sombrea el sistema (pasan del 12 al 5% según datos franceses, y del 43 al 20% en Chipre). Los mejores resultados corresponden a materiales transparentes, colocados sobre acolchado negro, con cobertura del suelo del 35 al 40%, y con diámetro de unos 30 cm y capacidad para unos 100 litros por metro lineal. Se aumenta su rendimiento si se aíslan del suelo (placa de poliestireno, plásticos alveolares).

Inconvenientes: pierden eficacia al ser sombreados por las plantas; tienen poca resistencia mecánica y, por lo tanto, hay riesgo de rotura e inundación; y dificultan las operaciones de cultivo.

Es interesante ensayar su utilidad localmente, como método de protección antihelada en zonas de clima invernal suave con riesgo de heladas.

3.6.3 *Mangas y tubos sobre el suelo*

Consistente en tubos de polietileno de baja densidad de diferentes diámetros, por los que se hace circular agua templada de origen diverso, puede ser agua procedente de pozos geotérmicos, de residuos de refrigeración industrial, de instalaciones de energía solar, etc. Estas instalaciones efectúan el calentamiento simultáneo del aire y del suelo superficialmente, trabajan bien con temperaturas suaves del agua, entre 20 y 60°C, al mismo tiempo efectúan el calentamiento directo e indirecto de las plantas por radiación y por convección, respectivamente, e incluso en algunos casos pueden refrigerar el invernadero en días calurosos. Sus principales inconvenientes son la poca resistencia mecánica que implica un riesgo de rotura y la ocupación del suelo, que puede dificultar las operaciones culturales. En las figuras 3d, 3e y 3f se aprecian calefacción por mangas sobre el suelo con agua templada, preparación de calefacción por suelo radiante y calefacción por tubos de polipropileno sobre el suelo, respectivamente.

En España con mangas de PE negro sobre el suelo, de 80 mm de diámetro y 0,5 mm de espesor con circulación de agua geotérmica a 40 y a 23°C, con un caudal de 1 L.s⁻¹, con una manga al pie de cada línea de plantas (cultivos de pimiento, melón y gerbera) se pueden ver los efectos térmicos en la tabla 11.

Tabla 11. Temperaturas del aire a +20 cm y del suelo a -10 y -20 cm bajo la superficie, con calefacción de invernadero por mangas sobre el suelo con aguas templadas en condiciones de helada.

Temperatura del agua (°C)	Aire libre (cm)			Invernadero frío (cm)			Invernadero caliente (cm)			Salto térmico en el agua (°C)
	+20	-10	-20	+20	-10	-20	+20	-10	-20	
40	-4,6	4,8	9,4	1,9	10,3	13,9	9,0	13,4	15,3	13,7
40	-3,4	3,3	8,7	0,4	9,3	13,6	8,0	12,8	15,3	13,6
23	-1,1	2,1	6,3	0,5	7,7	11,1	4,3	9,5	12,4	12,3
23	-1,8	1,7	6,0	-0,4	7,3	10,9	3,7	9,2	12,2	12,7

Fuente: Martínez *et al.* (1983).

Con agua a 40°C, el sistema permite un buen caldeoamiento del ambiente aéreo a mínimas de 15, 12 y 10°C, según el tipo de cultivo practicado, y un nivel homogéneo de unos 18°C en el perfil del suelo hasta 35-40 cm de profundidad. Efectos de 100% de incremento de los beneficios brutos de pimiento y melón en los primeros meses y de 50% al final, comparado con el invernadero frío. En gerbera hace posible una elevada producción invernal de buena calidad y equilibra la distribución de la producción a lo largo del año, reduciendo el número de flores de la primavera y el verano, aspecto muy interesante desde el punto de vista comercial.

En este tipo de instalaciones, el hecho de trabajar con pequeñas diferencias de temperatura entre los conductos y el aire ambiente, produce diferencias en cuanto a los intercambios convectivos y radiantes con respecto a los sistemas que emplean temperaturas del agua altas. También la participación de ambos intercambios en el coeficiente global de transmisión térmica es distinta. Por otro lado, los sistemas por tubos radiantes tienen menores pérdidas de calor que los convectivos. Por ejemplo, con temperaturas mínimas alrededor de 1,5°C y cielo despejado sin viento, se han medido en invernaderos de polietileno térmico, coeficientes K de pérdidas térmicas globales de 5,5 W.m⁻² °C para calefacción por agua circulando por mangas radiantes sobre el suelo, frente a 8,8 W.m⁻² °C con calefacción por generador de aire caliente forzado. Estas cifras pasan a 16,1 y 21,9 W.m⁻² °C, respectivamente, con viento (Martínez *et al.*, 1983).

3.7 La importancia creciente del ahorro de energía y del interés de las fuentes alternativas de energía renovable

El encarecimiento progresivo de los costes de los combustibles derivados del petróleo y en general de las fuentes de energía, obliga a estudiar sin pausa medidas de ahorro de energía y de mayor eficiencia en su uso, así como las posibilidades de otras fuentes de energía. Su interés viene condicionado por el coste de los combustibles y es muy posible que sistemas de aprovechamien-

to de las energías alternativas que, hasta el momento presente, no han sido económicamente viables, lo sean en tiempos próximos, no olvidemos que las alarmas sobre el agotamiento previsible de los recursos basados en el petróleo suenan desde hace tiempo.

La reducción de las consignas de temperatura de la calefacción ha sido una de las medidas inmediatas en muchos casos, con la consecuencia negativa de retrasos del ciclo del cultivo o deterioros de la calidad del producto. Los resultados que se obtuvieron tras la primera crisis del petróleo, mostrando el hecho de que las tasas de desarrollo de muchas especies vienen determinadas por la temperatura media de un periodo de tiempo amplio, más que por las temperaturas instantáneas del día y de la noche (Cockshull *et al.*, 1981; Langhans *et al.*, 1985; de Köning, 1990) y sobre la dependencia del rendimiento y la precocidad del tomate de la integral térmica, más que de la variación diurna de la temperatura (Hurd y Graves, 1984), tienen como consecuencia que, siempre dentro de un rango de temperaturas no perjudiciales para la planta, periodos a temperatura baja sean compensados por otros a temperatura más alta de lo normal y viceversa.

Así las consignas de la calefacción se pueden bajar cuando se tienen condiciones climáticas en las que se favorecen mayores pérdidas de calor, por ejemplo con viento fuerte y, por el contrario, se puede subir la consigna cuando las pérdidas de calor son pequeñas. De este modo se puede mantener la temperatura media de cultivo ahorrando calefacción. Un ejemplo de este tipo de manejo basado en estos conceptos, es colocar la consigna de ventilación más alta para conseguir una acumulación de temperatura mayor durante las horas de aporte de energía solar y, posteriormente, compensar esto rebajando la consigna de calefacción nocturna (Elings *et al.*, 2005; Bakker *et al.*, 2008). Hay diversas variantes de manejo basadas en estos conceptos (Hao *et al.*, 2008).

Asimismo, los sistemas de calefacción por energía solar a través de colectores solares térmicos han sido estudiados con interés desde la primera crisis del petróleo de los años 70, analizando sus posibilidades técnicas en función de las condiciones del clima local y del tipo de aplicación o las necesidades de calefacción. Un inconveniente del uso de colectores solares es la ocupación de terreno, que será mayor o menor en función de la disponibilidad local de radiación solar y de la demanda de calefacción que se establezca, según el tipo de aplicación (calentamiento del aire, del suelo, del sustrato, forzado, apoyo, etc.) y otro inconveniente es la dependencia del suministro de energía de las eventualidades climáticas y la separación temporal entre el suministro, que se hace durante las horas de sol y el consumo, que se hace normalmente por la noche, lo que obliga a un almacenamiento. En el caso del aprovechamiento para calentar el suelo, se ha tratado de prescindir del almacenamiento en tanque de agua y usar el propio suelo como acumulador térmico, que favo-

rece las funciones de las raíces y además puede aportar calor al aire durante la noche. La eficacia de este planteamiento depende, entre otras cosas, de la superficie de tubos que se entierren, pero incluso con índices pequeños ($0,172\text{m}^2\cdot\text{m}^{-2}$) de superficie de intercambiador de calor a superficie total de suelo, con tubos de polietileno enterrados a 30 cm y distanciados un metro, bajo las líneas de cultivo, se han conseguido temperaturas mínimas entre 1 y $1,5\text{ }^\circ\text{C}$ más en el invernadero con calefacción solar que en el invernadero sin calefacción, con salto térmico en el suelo de 5 a $8\text{ }^\circ\text{C}$ superior al del suelo exterior a 30 cm y muy estable tanto de día como de noche (Martínez, 1980; Martínez *et al.*, 1982).

Por otra parte, en la actualidad se trata de desarrollar modelos experimentales con el objetivo de optimizar el uso de la calefacción a través de la determinación de consignas óptimas, que se deciden por medio de la integración de modelos de absorción de radiación, de fotosíntesis y de respiración, es decir que el sistema se manejaría con criterios de aprovechamiento óptimo de la temperatura, la luz y el CO_2 para una producción máxima de biomasa y una eficiencia máxima en el uso de los recursos (Lund *et al.*, 2006; Markvart *et al.*, 2008).

Un sistema novedoso estudiado recientemente (Courtois *et al.*, 2008), es el basado en el aprovechamiento reversible del invernadero como generador de energía térmica, combinado con las buenas características del acuífero subterráneo como almacén térmico. La base del método consiste en aprovechar la baja conductividad térmica de las formaciones geológicas y la capacidad calorífica del agua que contienen, lo que asegura pocas pérdidas, y emplear el agua tanto como almacén de energía, como también de portadora de la misma. En un acuífero superficial, a menos de 10 m, la temperatura del agua se mantiene constante, cercana a la media anual del aire exterior. Se necesitan dos pozos, uno como almacén caliente y otro frío. El sistema se llama reversible porque cada pozo se usa alternativamente para bombear o inyectar según la estación del año. En la época fría el agua se extrae del pozo caliente y se enfría al pasar su contenido calorífico al evaporador de una bomba de calor, para calentar el invernadero, inyectándose después el agua fría al pozo frío. En la época cálida el flujo se invierte, extrayendo agua del pozo frío que se caldea al usarse para refrigerar el invernadero y se inyecta al pozo caliente.

4. Exceso de temperatura

El exceso de temperatura en el invernadero durante las horas de sol es uno de los problemas importantes para los horticultores de regiones cálidas y de clima mediterráneo. Produce en las plantas problemas ligados a disfunciones enzimáticas por degradación de las proteínas y por limitación de la síntesis de las mismas, agravados por los efectos secundarios del estrés oxidativo y la deshidratación. Todo ello conduce a la inhibición de la fotosíntesis, afec-

tando, como consecuencia, negativamente al crecimiento y a la producción. Asimismo, el exceso de temperatura puede afectar otros procesos indispensables para la producción, como son los que intervienen en la reproducción (formación de polen y óvulos, polinización, fecundación) entre otros (Martínez, 1979).

La renovación del aire del invernadero por medio de la ventilación es la técnica más frecuente para reducir el exceso de temperatura. Pero la ventilación no es solamente necesaria en los periodos de alta radiación solar, para mitigar la subida de la temperatura dentro del invernadero, sino que también lo es el resto del tiempo porque cumple otras funciones importantes para el cultivo, como son el mantenimiento de la concentración de CO_2 en los niveles del aire externo y evitar la humedad excesiva del aire, aparte de facilitar los intercambios de energía y de gases entre la planta y su entorno. La aireación debe evitar descensos del CO_2 en el entorno de las plantas superiores a 30 mmol.mol^{-1} ; para ello son suficientes de 9 a 12 renovaciones por hora.

Los medios disponibles para reducir los excesos térmicos en los invernaderos son la ventilación forzada, la ventilación natural, el enfriamiento por evaporación y el sombreado.

4.1 Ventilación forzada

La ventilación forzada se emplea poco debido a su alto consumo de energía eléctrica. La capacidad del ventilador debe ser suficiente para 1 a 3/4 de renovaciones del volumen interno del invernadero por minuto, a unos 3 mm de columna de agua de presión estática (30 Pascal). Es frecuente que los ventiladores trabajen como extractores, pero también es posible que trabajen impulsando el aire al interior, creando sobrepresión en el invernadero. Esto puede ser positivo para algunas aplicaciones; por ejemplo, cuando se emplean mallas antiinsectos en las ventanas, se dificulta la entrada de insectos. El espacio recomendado entre ventiladores es de 8 a 10 m y de 30 a 40 m la distancia máxima recomendada hasta las ventanas.

Potencia del ventilador:

$$P = \frac{VA \times p}{\eta} \quad (\text{W.m}^{-2})$$

Caudal del ventilador:

$$Q_v = VA \times S_s \quad (\text{m}^3.\text{h}^{-1})$$

Donde:

p , pérdida de presión (Pascal) (N.m^{-2})

η , rendimiento del ventilador

V, volumen del invernadero
 S_s , superficie del suelo
VA, ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) el índice de la capacidad de ventilación,
 $V(\text{m}^3)/S_s(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1})$

Veamos un ejemplo supuesto:

$p = 30 \text{ Pa}$
 $VA = 170 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} = 0,047 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
 $\eta = 70\%$
Resulta ser $P = 2,014 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$

Se recomiendan caudales máximos de 2 a 3 m^3/minuto por m^2 de suelo.

El uso de aire acondicionado en invernadero es excesivamente costoso, ya que la temperatura de trabajo del enfriador es cercana a la del aire del invernadero, lo que obliga, para conseguir un coeficiente de intercambio alto, o bien a tener en dicho enfriador una superficie de intercambio grande, o bien utilizar convección forzada con consumo eléctrico alto, y ambas soluciones son muy caras (Zwart y Kempkes, 2008).

4.2 Ventilación natural

En el invernadero los intercambios por la ventilación están regidos por la convección, que afecta tanto las transferencias de calor como de masa y que determinan finalmente el clima interior. Durante los últimos años, la aplicación de métodos de cálculo de dinámica de fluidos para el desarrollo y la solución de modelos de simulación, ha permitido conocer mejor el comportamiento de los invernaderos en relación con la ventilación natural (Boulard, 2007). Desde un inicio en el que el estudio se veía limitado a condiciones muy restrictivas, en invernaderos pequeños, cerrados, vacíos, hasta el momento actual en el que las simulaciones se hacen sobre invernaderos grandes, con cultivo, con las perturbaciones en los intercambios de calor y masa producidas por un funcionamiento realista, que incluye los intercambios convectivos y radiantes (Montero *et al.*, 2005) y las interacciones con el uso de mallas antiinsectos (Bartzanas *et al.*, 2002; Valera *et al.*, 2005; Fatnassi *et al.*, 2006), el progreso de conocimientos ha sido notable. Actualmente se dispone de análisis por dinámica de fluidos de una gama amplia de tipos de invernadero, desde los reducidos túneles (Roy y Boulard, 2004), los grandes invernaderos multinave (Fatnassi *et al.*, 2006), los grandes parrales tipo Almería (Baeza *et al.*, 2005; Molina *et al.*, 2004), los invernaderos del trópico (Campen, 2005), etc. Ahora lo que se plantea es el problema de la validación de estos modelos, dado que la caracterización y las medidas se han hecho en modelos a escala reducida. La caracterización a escala real es escasa y es problemático tratar de emplear los resultados obtenidos en condiciones

naturales, inestables, para validar los resultados obtenidos en condiciones estacionarias. Esta dificultad para validar las simulaciones del método de la dinámica de fluidos es el factor que limita su aplicación en la actualidad. El desafío presente es poder explotar los modelos en estudio para, por una parte, mejorar el diseño de los invernaderos y de sus equipos de control del clima y, por otra, desarrollar algoritmos y estrategias de control más eficaces, en particular en lo referente a la ventilación (Boulard, 2007).

La ventilación natural es el método más extendido por su simplicidad y economía de inversión, uso y mantenimiento. La más frecuente es la lateral y frontal, por ser más barata su construcción, pero la eficacia aumenta notablemente combinando ventanas laterales y cenitales que originan mayores diferencias de presiones entre el interior del invernadero y el exterior, y aprovechan con mayor eficacia el viento y las diferencias de temperatura; esto combinado con una cumbrera alta es lo mejor.

También se está aplicando el cálculo de la dinámica de fluidos en el estudio del efecto de la ventilación sobre el flujo de aire del interior del invernadero, pues permite analizar las interacciones entre el flujo de aire de la ventilación y la masa del cultivo. Dicho movimiento interior depende de la forma, el tamaño y la colocación de las ventanas, así como de la velocidad y la dirección del viento externo. Por ejemplo, con ventana lateral basculante orientada a barlovento, el viento entra al invernadero e inmediatamente fluye hacia el techo, cruza el invernadero y retorna por abajo entre el cultivo pero a velocidad ya muy reducida, y esto limita la renovación del aire entre las plantas. Sin embargo, con ventanas de la misma dimensión pero enrollables, el aire entra y fluye directamente por entre las plantas a mayor velocidad, atravesando el espacio del invernadero y saliendo por la ventana de sotavento. Se ve con claridad cómo el flujo de aire interior depende mucho del diseño de la ventana, en particular de la orientada a barlovento (Sase, 2006). De esto se desprende, por lo tanto, que los detalles constructivos deben ser atendidos, pues tienen efectos importantes sobre la ventilación. Entre otras cosas, es interesante disponer:

- Ventanas perpendiculares a la dirección del viento
- Líneas de cultivo paralelas a la dirección del viento
- Invernaderos múltiples separados por pasillos paralelos a la dirección del viento y ventanas abiertas a dichos pasillos
- La superficie de ventanas mínima de 15 a 25% de la del suelo
- La anchura máxima del invernadero limitada a 20 m cuando sólo haya ventanas laterales y no cenitales

La importancia del diseño de la ventilación no se limita a conseguir la tasa de renovación máxima de aire, sino que también es necesario conseguir una renovación completa del volumen del invernadero, para evitar espacios

no renovados debidos a los obstáculos al flujo del aire, el más importante de ellos sería el cultivo cuando tiene desarrollo vertical y cuando la orientación de las filas obstaculiza la circulación del aire que debe fluir por las ventanas.

Las disposiciones de ventanas a los lados y en el techo orientadas a barlovento, son las que dan tasas más altas de renovación del aire y consiguen las diferencias de temperatura menores, entre el interior y el exterior y la distribución térmica más homogénea en el invernadero (Baeza, 2007; Bournet *et al.*, 2007). Sin embargo, la eficacia de la ventilación por ventanas orientadas a barlovento está supeditada a que el invernadero sea estrecho, ya que de lo contrario se pierde la homogeneidad de las temperaturas. Esta heterogeneidad puede amortiguarse abriendo la ventanas del techo a barlovento, con la precaución de no poner en riesgo la estructura del invernadero (Montero *et al.*, 2008).

Baeza *et al.* (2006) aplican el cálculo de dinámica de fluidos al estudio del comportamiento de la ventilación en grandes invernaderos, de muchas naves, con ventanas sólo en el techo y comprueban que las configuraciones más eficaces para ventilar son las que abren ventanas dobles en el techo de cada nave y las que abren una ventana en cada nave, pero alternando a barlovento y a sotavento, comparadas con la abertura de una ventana por cada nave, todas a la misma orientación, que es la configuración menos eficaz. Las dobles ventanas en el techo de cada nave dan mayor movimiento del aire en la parte baja del invernadero, ocupada por el cultivo.

Todo esto además viene afectado por el cultivo cuando se tutora formando un seto vertical, ya que constituye un obstáculo para el flujo del aire interior. Sase (1989) ha estudiado con detalle este efecto de las filas del cultivo en un invernadero de dos naves, con ventanas laterales y en el techo corridas y un cultivo adulto de tomate vertical. Con viento perpendicular a las ventanas, la velocidad del aire interior es casi proporcional a la del exterior y si las filas del cultivo están perpendiculares a las ventanas, la velocidad media del aire interno que circula entre las filas es hasta un 36% de la del viento exterior. Sin embargo, si las filas del cultivo están paralelas a las ventanas, esta velocidad media del aire interior que circula entre las plantas baja hasta ser un 13 a 18% de la del exterior. Cuando el viento se mueve paralelo a las ventanas, entonces la velocidad media del aire interior baja hasta el 13 al 21% de la del exterior y es casi independiente de la orientación de las filas del cultivo.

Si sólo se abren las ventanas del techo y se dejan las laterales cerradas, entonces la velocidad media del aire interior es de un 12% de la del exterior y no afectan, ni la orientación de las filas de plantas, ni la dirección del viento.

Todo esto lo confirman también Kacira *et al.* (2004) con aplicación de cálculo de dinámica de fluidos a modelos de predicción, aportando además que la tasa máxima de ventilación del aire del invernadero, se consigue con ventanas enrollables laterales combinadas con ventanas basculantes en el techo.

Esta disposición da también una alta tasa de aireación en la zona ocupada por el cultivo. El flujo de aire en el cultivo aumenta incluso más si se tienen abiertas ventanas enrollables laterales y las ventanas basculantes del techo a sotavento, cerrando las de barlovento, pero así disminuye algo la tasa de renovación general del invernadero. La menor tasa de ventilación se tiene con sólo ventanas basculantes laterales abiertas.

Los trabajos de Gázquez *et al.* (2006; 2008) comparan la ventilación forzada con la ventilación natural combinada con nebulización de alta presión o con blanqueado de la cubierta durante la época más calurosa, y concluyen que esta última combinación es la mejor en términos de resultados del cultivo y de costes. La ventilación forzada consiguió bajar el salto térmico y aumentó la incidencia de mosca blanca (*Bemisia tabaci*) y de trips (*Frankliniella occidentalis*), en tanto que la combinación de la ventilación natural con la nebulización provocó más de un 30% de pérdidas por necrosis apical (el cultivo era pimiento).

Un problema importante no resuelto en la práctica del manejo de los invernaderos, es el de la reducción de la tasa de ventilación que causan las mallas antiinsectos colocadas en las ventanas (figuras 4a y 4b). La malla tiene una densidad de trama determinada según el insecto al que se necesita bloquear (tabla 12); esta densidad produce una disminución del coeficiente de pérdida de presión de la malla respecto a la velocidad del aire. Dicho coeficiente expresa la resistencia de la malla, en relación con el caudal de aire que la traspasa, y depende de la porosidad de la malla, de la velocidad del aire y va ligado al número de Reynolds (Re). Un material poroso tiene un $Re < 1$ y las mallas normalmente recomendadas como barreras contra insectos pueden tener valores Re entre 3,4 y 144 a velocidades del aire hasta de 1,1 metros por segundo. El coeficiente de pérdida de presión de la malla sólo es constante a partir de $Re > 200$, en este rango a medida que Re disminuye el coeficiente de pérdida de presión de la malla aumenta (Klose y Tantau, 2005). En un estudio detallado de mallas Cabrera *et al.* (2006) obtienen que la malla más eficaz contra *Bemisia tabaci*, de hilos de 0,19 mm y densidad de 23,8 x 11,9 hilos/cm, reduce la tasa de ventilación un 33% y la malla más eficaz contra *Frankliniella occidentalis* del mismo grosor de hilo y densidad 27,2 x 13,6 hilos/cm, reduce la ventilación un 41%. Es, por lo tanto, necesario complementar el empleo de estas mallas con otros medios de enfriamiento que compensen estas pérdidas de eficiencia de la ventilación (ventilación optimizada, sombreado, enfriamiento evaporativo).

Tabla 12. Tamaño medio de los insectos vectores de invernadero y tamaño máximo permisible de poros de mallas antiinsectos.

Insecto	Nombre científico	Tórax (micras)	Poros (mm)
Trips	<i>Frankliniella occidentalis</i>	215	0,19
Mosca blanca de invernadero	<i>Trialeurodes vaporariorum</i>	288	0,29
Pulgones	<i>Aphis gossypii</i>	355	0,34
Mosca blanca	<i>Bemisia tabaci</i>	239	0,46
Minador	<i>Liriomyza trifolii</i>	608	0,61

Fuente: Teitel (2006).

4.3 Sombreado

El sombreado es una de las técnicas más usadas y eficaces para reducir la cantidad de radiación solar total que penetra en los invernaderos y se realiza por dos métodos: pintando la cubierta con mezclas a base de cal y un agente surfactante (figura 4c), o colocando sobre ella (figuras 4d y 4e) o sobre el cultivo un material tejido formando una malla (figura 4f), que puede dar diferentes grados de sombreado.

El encalado se puede hacer con una solución de 300 g de cal y 30 g de cola de pescado por cada litro de agua, o bien usando productos blanqueadores para horticultura que se encuentran disponibles en el comercio.

Lo que debería tratar de hacerse a través del sombreado es filtrar específicamente la radiación infrarroja corta, entre 700 y 2.300 nm de longitud de onda, para disminuir la entrada de calor. Por ello, las condiciones ideales que debería satisfacer cualquier método de sombreado son:

- Ser selectivo, dejando paso a la luz y limitando la radiación IR solar.
- Ser incoloro para no producir alteraciones en el espectro visible, ni emitir radiación térmica.
- Ser reflectante y de baja absorción en la parte de la radiación que intercepta, para reducir su calentamiento.
- Ser de función regulable, según la intensidad de la radiación.
- Ser plegable.
- Ser de precio ajustado a su función.

Existen láminas y cristales que tienen propiedades selectivas filtrantes de la radiación IR corta, IRC (Hemming *et al.*, 2006; Mutwiwa *et al.*, 2008) y, asimismo, hay pinturas reflectantes de dicha radiación (von Elsner, 2005), pero los resultados no son todavía satisfactorios, además de que causan pérdidas sensibles de radiación fotosintética. En los años 90 se fabricaron láminas que incorporaban pigmentos de interferencia, que reflejaban parcialmente el espectro visible, dando como resultado un efecto de sombreado y de luz difusa (Verlodt *et al.*, 1995). Posteriormente nuevos aditivos, pigmentos de interferen-

cia, actuaban sobre el rango infrarrojo corto de modo más específico, resultando en una reducción mucho menor de radiación fotosintética (PAR) y una disminución de la temperatura del aire significativa (Verlody y Verschaeren, 1997).

Los trabajos efectuados hasta ahora revelan que el tema no está resuelto. Dan mejor resultado los materiales reflectantes que los absorbentes del IRC y preferiblemente interesa actuar en el rango de 800 a 1.100 nm que en el de 1.100 a 2.500 nm. Las pinturas blancas con propiedades filtrantes del IRC se pueden usar en los periodos de alta radiación solar, pero todavía reducen excesivamente la radiación fotosintética. Una alternativa puede ser usar pantallas filtrantes plegables, con la condición de que no dificulten la ventilación (Hemming *et al.*, 2006). Esta posible reducción de la tasa de ventilación del invernadero y el no ser posible modular la pérdida de luz por el sombreado adaptándola a las necesidades de las plantas, así como también la dificultad de regulación de la humedad, pueden limitar la transpiración y debido a ello puede asimismo aumentar la temperatura del dosel vegetal dando lugar a situaciones de estrés para el cultivo.

En estudios realizados en España sobre la eficacia de diversos sistemas de sombreado (tabla 14), para reducir los excesos térmicos en invernaderos cubiertos con polietileno térmico y empleando mallas blancas y negras del 37% de eficacia y enalado, se observa que el procedimiento más eficaz para limitar la temperatura alta es la malla negra colocada exteriormente, seguida en eficacia por la malla blanca exterior y el enalado, que tienen un comportamiento semejante. Las mallas, blanca o negra, colocadas en el interior aumentan la temperatura 3 a 4°C sobre el testigo no sombreado. De colocar la malla negra en el exterior a hacerlo en el interior hay un incremento de unos 8°C en el mes de julio.

Las funciones fisiológicas de las plantas sombreadas también se ven afectadas sustancialmente, según el material empleado. La mayor transmisión de luz la da el enalado pero también reduce menos la temperatura y da lugar a condiciones de estrés más acentuado, con diferencias de presión de vapor hoja-aire mayores (tabla 13). El resultado se observa en las menores tasas de transpiración y de fotosíntesis con que responden las plantas. Por otra parte, si se emplean materiales de alto índice de sombreado, como es el caso de la malla negra más tupida, de trama de 5x4, la eficacia en la reducción de la temperatura es mayor y también lo es el amortiguamiento de la diferencia de PV entre la hoja y el aire, pero esto se consigue a costa de menor transmisión de luz, lo que provoca un descenso excesivo de la fotosíntesis (tabla 13). La elección del material más conveniente dependerá de varios factores: uno es conocer el punto de saturación lumínica del cultivo y su capacidad de adaptarse al nuevo ambiente, manteniendo respuestas adecuadas (fotosíntesis, transpiración). En la tabla 13 se observa que la malla negra menos tupida y las dos blancas, dan mejor respuesta fotosintética, pero la malla negra 5x3 consigue menor temperatura ambiente, menor diferencia de presión de vapor hoja-aire y menor transpiración, lo que resulta en mayor eficiencia en el uso del agua (Martínez y Bimbo, 1992; Martínez, 1994).

El control automático de las mallas de sombreado, a través de la medida de la temperatura del dosel por sensores IR, contribuiría a aprovechar más la luz disponible por el cultivo manteniendo más estables las condiciones térmicas de la planta (Langton y Hamer, 2001).

Tabla 13. Variables climáticas (radiación PAR, temperatura del aire) y respuestas fisiológicas de cultivo de gerbera (tasa de fotosíntesis, tasa de transpiración, diferencia de presión de vapor entre hoja y aire), en invernaderos cubiertos con diferentes materiales de sombreado, colocados exteriormente sobre la cubierta de polietileno.

Fecha	Aire libre	Pintura de cal	Malla blanca		Malla negra	
			Trama 5x3	Trama 5x4	Trama 5x3	Trama 5x4
Radiación PAR ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)						
Día 1	2,000	734	687	555	542	249
Día 2	1,820	720	598	496	474	219
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)						
Día 1	31,9	39,4	38,3	38,5	35,6	34,9
Día 2	31,5	36,9	36,2	36,5	34,9	33,9
Fotosíntesis ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)						
Día 1	-	5,1	8,8	8,6	10,2	6,0
Día 2	-	8,5	12,5	12,1	10,3	4,6
Transpiración ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)						
Día 1	-	19,3	22,0	21,6	20,3	14,8
Día 2	-	17,6	30,0	24,5	22,7	20,0
DifPV (hoja/aire kPa)						
Día 1	-	3,87	3,08	3,04	2,40	2,49
Día 2	-	2,80	1,94	1,87	1,85	1,87

Fuente: Martínez y Bimbo (1992).

Tabla 14. Fracción de radiación global interior respecto de la incidente en invernaderos sin cultivo, cubiertos con lámina de polietileno térmico.

Material de sombreado	Insolación (h)	Radiación interior (%)
Malla blanca interior	8,4	34,9
Malla blanca exterior	10,9	37,6
Malla negra interior	10,8	30,3
Malla negra exterior	10,3	29,3
Encalado	10,9	57,8
Testigo no sombreado	12,5	53,5

Fuente: Datos experimentales de los autores.

4.4 Enfriamiento evaporativo

En condiciones de alta radiación solar, elevado déficit de saturación y una alta temperatura, puede ocurrir que el cultivo, a pesar de disponer de agua suficiente en el sustrato, se encuentre en situación de estrés hídrico, debido a no poder satisfacer el flujo de transpiración de la planta, la demanda del aire ambiente. Cabe la posibilidad de controlar esta situación a través de una regulación del mencionado déficit de saturación del aire, por el uso de un sistema de humidificación.

Desde hace pocos años se buscan métodos de manejo que tengan en cuenta tanto las variaciones de los parámetros físicos como la adaptación de las plantas a las condiciones de humedad ambiente. Las respuestas de la transpiración de la planta y las relaciones directas existentes entre ellas y la temperatura de la cubierta vegetal en condiciones reales y extremas de transpiración (Jackson *et al.*, 1981), se pueden relacionar para llegar a establecer índices de estrés hídrico para unas condiciones de desarrollo del cultivo y de capacidad de transpiración (índice foliar y conductancia estomática). A través de un modelo del balance de energía al nivel del cultivo, se pueden determinar las condiciones de temperatura del follaje que definen un nivel de estrés resultante de un nivel de radiación solar. El déficit de saturación, D_s , que se asocia a dicho nivel de estrés se puede calcular del modelo según la radiación solar recibida. Dicho nivel de D_s que regularía indirectamente la transpiración del cultivo, se controla por medio de un manejo conjunto de la humidificación (tiempo) y la ventilación (Baille *et al.*, 1994; González Real, 1995).

El enfriamiento evaporativo se basa en la conversión del calor sensible del agua en latente, con absorción de 2.445 kJ.kg^{-1} según el calor latente de vaporización del agua a 20°C , poniendo en contacto aire no saturado con agua a menor temperatura. En los invernaderos las dos técnicas más difundidas son: *i*) La pulverización de agua en gotas finas, llamada nebulización, en el aire del invernadero, combinada con ventilación pasiva; y *ii*) El paso de una corriente forzada de aire a través de un panel poroso saturado de agua. En los dos casos, la temperatura del aire disminuye al aumentar su contenido de humedad absoluta, con lo que se reduce su déficit de presión de vapor de agua y también se reduce la demanda de transpiración del cultivo (Montero *et al.*, 1990).

4.4.1 La nebulización

La nebulización fina (*fog* en inglés) forma pequeñísimas gotas de agua que, si son menores de 10μ , quedan flotando en el aire hasta que se evaporan y, por lo tanto, no llegan a mojar las plantas. Se realiza con varios tipos de instalaciones:

- Con boquillas de alta presión a $60\text{-}70 \text{ kg.cm}^{-2}$, mediante una bomba de elementos cerámicos y tuberías resistentes, de cobre o acero (figura 5a).

Los difusores pueden ser de cámara de turbulencia, en la que el agua se pulveriza contra un cilindro con aletas y sale por un orificio de 200 μ de diámetro, para gotas de una micra. También pueden ser difusores de aguja, contra la que sale proyectada el agua por un orificio cónico hecho con rayo láser, para gotas menores de 10 μ . Este es el sistema más usado en invernadero. Los difusores son de 7 L.h⁻¹ y hay 0,06 a 0,1 difusor por m². En estos sistemas, es necesaria una buena filtración del agua, con prefiltrado de 100 a 50 μ y filtrado de 5 a 0,5 μ . Puede incluso ser necesario un tratamiento desmineralizador con resinas de intercambio o por ósmosis inversa. Si contiene bicarbonatos, deberá ser acidificada hasta pH de 6,5 a 6,8 (Urban, 1997).

- Con difusores de baja presión, a 3-6 kg.cm⁻², que expulsan agua contra un disco cónico que gira a 15.000 rpm. Por la forma del disco y la fuerza centrífuga producida por el giro, el agua forma gotas de 20 a 100 μ . El caudal de los difusores se puede regular entre 10 y 120 L.h⁻¹ regulando la velocidad de giro. Se coloca un difusor por 40 a 100 m² de invernadero. Este sistema es más barato, requiere menos mantenimiento y menos tratamiento del agua, pero las plantas se mojan y puede haber depósitos salinos sobre las hojas, según sea la composición del agua. Conviene usarlo con intervalos cortos de funcionamiento y automatizarlo por consigna de DPV no inferior de 1,5 kPa (Montero, 2006).
- Finalmente, hay otro tipo de sistema mixto empleando dos fluidos, aire y agua, con difusores, atomizadores neumáticos, que emiten el agua entre 2 y 6 kg.cm⁻² y el aire entre 2 y 3,5 kg.cm⁻². El tamaño de las gotas depende de las diferencias de presión entre el agua y el aire. Con presión de aire baja las gotas pueden ser mayores de 50 μ , esto no interesa, y si las dos presiones son iguales, las gotas son menores de 10 μ . Buenas presiones son de 2 a 2,5 kg.cm⁻² en el agua y de 3 a 3,5 en el aire (Morel, 1992). El sistema es de bajo mantenimiento y fácil instalación, pero debe regularse bien para que las plantas no se mojen y tiene un consumo eléctrico alto (20 a 30 Wh.hm⁻²) debido a que necesita un compresor de aire (Urban, 1997).

Los sistemas de nebulización son especialmente eficaces en ambientes secos por la transferencia de calor de masa, que hace descender la temperatura del aire. Requieren agua de buena calidad.

4.4.2 Refrigeración por panel húmedo

Una corriente de aire externo es forzada a penetrar en el invernadero por ventiladores extractores a través de un panel poroso saturado de agua. El panel se forma con fibras de materiales naturales o sintéticos, que tienen propiedades hidrófilas. Por la parte superior de dicho panel se vierte agua

para mantenerlo siempre saturado. En el lado opuesto del invernadero, los extractores aspiran el aire interior con un caudal inferior a 30 renovaciones por hora, creando un vacío que es simultáneamente llenado por aire externo, que entra a través del panel saturándose de humedad y reduciendo por ello su temperatura (Fuchs *et al.*, 2006) (Figuras 5b y 5c). Es un sistema muy simple, que no moja el cultivo, pero que es caro de instalación y costoso de funcionamiento por el consumo de electricidad de los extractores. La distribución de temperatura no es homogénea, se produce un gradiente con menor temperatura cerca del panel húmedo, que va aumentando al alejarse de él. Hay que tener en cuenta también que el consumo de agua puede ser alto.

El ambiente resultante, con descenso sensible de la temperatura del aire y algo menor de la del cultivo, reduce la tasa de transpiración de éste. La reducción de temperatura del aire del invernadero, depende mucho de la humedad del aire externo. Si es alta, no toma humedad del panel y el efecto es prácticamente nulo. Si es baja, puede ocurrir un descenso de temperatura del aire que sale del panel de 15°C y del follaje de alrededor de 2°C. Los órganos no transpirantes, frutos, flores, también se benefician de la refrigeración. Por encima de una humedad exterior del 60% el sistema deja de ser eficaz.

En las condiciones semiáridas de Arizona, con extremos de 38,5°C y 15% de humedad relativa, Sabeh *et al.* (2006) en invernadero con cultivo consiguen medias de 27,8°C y 51,7% de humedad relativa, con tasa de ventilación de 0,051 m³.m⁻².s⁻¹ y concluyen que con esta tasa de funcionamiento de los extractores se consigue las condiciones óptimas para el cultivo, ya que si se aumenta la ventilación, la temperatura no cambia y la HR se reduce, esto aparte de que el consumo de agua aumenta. En todo caso, con este sistema de enfriamiento, cuando el aire es muy seco el consumo de agua es alto, superior al empleado para riego, lo cual debe tenerse en cuenta.

En las regiones que tienen condiciones climáticas extremas es necesario prestar mucha atención al diseño del invernadero, ya que un diseño adaptado a las condiciones locales, facilitará posteriormente el control del clima. Dar mayor altura al invernadero es un medio eficaz de amortiguar las oscilaciones térmicas extremas.

5. Regulación de la humedad del aire

Los niveles de humedad ambiente en el invernadero tienen implicaciones fisiológicas y agronómicas:

- Contenidos altos de humedad aumentan el riesgo de enfermedades criptogámicas y dificultan la polinización; además, reducen la transpiración y como consecuencia la capacidad de absorción y de transporte del agua y los minerales a través de la planta.

- La humedad muy baja causa el cierre estomático y reduce los intercambios de CO_2 y de vapor de agua, con consecuencias negativas para la fotosíntesis y la regulación térmica de las plantas.
- La humedad baja con temperatura del aire alta, permite que la planta se refrigere por la transpiración. Cuando la humedad es alta, si la transpiración es escasa, también lo es la disipación de calor de la planta y el resultado es una temperatura foliar más elevada que puede alterar las funciones de la planta.

Otro de los trastornos fisiológicos relacionados con el déficit de humedad del aire es la necrosis apical, frecuente, entre otros, en los frutos del tomate y el pimiento, producida por la competencia por el calcio que ocurre entre las hojas, órganos que transpiran mucho, y los frutos, que transpiran muy poco o nada. Esta falta de transpiración es desventajosa para los frutos, ya que el calcio es transportado por el flujo de agua que circula por el xilema, preferentemente hacia dichos órganos transpiradores, las hojas.

Estudios de regulación de la humedad ambiente del invernadero, por medio de equipo de nebulización de alta presión, como medio de control de la incidencia de la necrosis apical en el pimiento grueso, revelan (tabla 15) aumento de humedad del aire del invernadero, que se traduce en respuestas fisiológicas del cultivo que favorecen el transporte del calcio hacia el fruto, así es la menor tasa de transpiración foliar, a pesar de la mayor apertura estomática, que favorecería la dirección del flujo de agua y asimismo del calcio hacia los frutos, sin por ello sobrecalentar las hojas gracias al efecto refrigerante de la nebulización, con una incidencia de necrosis apical del 5% en peso de fruto, frente a un 18% en un testigo sin nebulización (Roca *et al.*, 1999).

Tabla 15. Efectos fisiológicos de la regulación de la humedad ambiente por nebulización de alta presión en pimiento (PAR = 860,25 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

	TA (°C)	TF (°C)	DPVh-a gs (kPa)		E ($\text{mmolH}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Pn ($\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	WUE
Testigo	36,37 A	34,45 A	2,23 A	3,04 B	24,78 A	16,30	0,66 B
Nebulización	33,68 B	32,62 B	1,64 B	4,56 A	20,67 B	17,93	0,87 A

TA, temperatura del aire; TF, temperatura foliar; DPVh-a, diferencia de presión de vapor hoja-aire; gs, conductancia estomática; E, tasa de transpiración foliar; Pn, tasa de fotosíntesis neta; WUE, eficiencia de uso del agua. Consigna de HR mínima de nebulización 65 \pm 5%.

Medias seguidas por letras iguales en columnas para cada variable, no son significativas al 1% criterio LSD. Fuente: Roca *et al.* (1999).

Combinando los efectos de humedad del ambiente y salinidad de la solución nutritiva, también en pimiento, estudiando con mayor detalle lo que ocurre en las distintas partes del fruto (tabla 16), resulta que en condiciones de humedad alta el transporte de calcio al fruto se ha mejorado claramente,

hasta en su extremo apical, incluso en las condiciones de alta salinidad (Roca y Martínez, 2001). Nuevamente la menor tasa transpiratoria de las hojas ha favorecido el flujo de calcio hacia los frutos. Se comprueba además, que al analizar la vascularización del fruto (tabla 17), el ambiente húmedo ha favorecido el desarrollo de más vasos xilemáticos en los frutos obtenidos en estas condiciones, lo que puede haber contribuido a la llegada del calcio y a su reparto en el fruto (Roca y Martínez, 2001).

Tabla 16. Contenido de calcio (% m.s.) en distintas partes de frutos de pimiento de 20 días de edad, en ambientes seco y húmedo y dos condiciones de salinidad.

Tratamiento	Ambiente		Salinidad (dS.m ⁻¹)	
	Seco	Húmedo	1,6	3,2
Pedúnculo	0,215 A	0,179 B	0,210 a	0,184 b
Semilla más placenta	0,088 B	0,160 A	0,080 B	0,169 A
Mitad basal	0,047 B	0,064 A	0,045 B	0,066 A
Mitad apical	0,024 B	0,034 A	0,024 B	0,034 A

Ambiente seco: 50% día y 70% noche. Ambiente húmedo: 85% día y 90% noche. Temperatura de ambos: 28°C día y 16°C noche.

Medias seguidas de letras diferentes en filas son significativamente diferentes al 95% (minúsculas) o al 99% (mayúsculas). Criterio LSD.

Fuente: Roca y Martínez (2001).

Tabla 17. Número de haces vasculares xilemáticos en los tercios basal y apical de frutos de pimiento de 20 y 30 días de edad, en ambientes seco y húmedo y dos condiciones de salinidad.

Tratamiento	Ambiente		Salinidad (dS.m ⁻¹)	
	Seco	Húmedo	1,6	3,2
Basal 20 días	50,00 B	71,10 A	56,90 b	64,20 a
Apical 20 días	43,20 B	62,30 A	47,90 B	57,60 A
Basal 30 días	63,10 ab	66,90 ab	69,10 a	60,90 b
Apical 30 días	55,70 b	63,20 a	62,30 ab	56,60 ab

Ambiente seco: 50% día y 70% noche. Ambiente húmedo: 85% día y 90% noche. Temperatura: 28°C día y 16°C noche.

Medias seguidas de letras diferentes en filas son significativamente diferentes al 95% (minúsculas) o al 99% (mayúsculas). Criterio LSD.

Fuente: Roca y Martínez (2001).

Trabajos de otros autores en tomate (Romero-Aranda *et al.*, 2002) y en pimiento (Montero, 2006; Katsoulas *et al.*, 2006) indican también menores incidencias de necrosis apical y mejor calidad regulando la humedad ambiente con ayuda de nebulización de alta presión, incluso señalando un efecto positivo mayor cuando se dan condiciones de salinidad alta. Sin embargo, Gázquez *et al.* (2006) obtienen mayor incidencia de necrosis en pimiento al

usar nebulización, probablemente por diferencias de criterio en la combinación de la nebulización y la ventilación del invernadero. Para obtener los mejores efectos refrigerantes de la nebulización es conveniente una acertada combinación con la ventilación y con el sombreado, hasta conseguir un grado de confort máximo para la planta. Este manejo integrado mejorará en el momento en el que se disponga de sensores eficaces, que informen de la respuesta del cultivo y de algoritmos de control, que permitan integrar el manejo de los diferentes equipos (Sase *et al.*, 2006).

La condensación es otro problema vinculado a la higrometría del invernadero, es un inconveniente, en general, en los invernaderos de plástico cuando se produce sobre la cara interna de la cubierta y da lugar al goteo, pero aún es más indeseable que la condensación se produzca sobre las plantas. Para evitarlo se puede recurrir a: *i)* Emplear sistemas de calefacción con predominio de intercambios radiantes para elevar las temperaturas de las plantas y paredes, en relación con la del aire. En casos graves, calentar y ventilar simultáneamente; *ii)* Usar pantallas térmicas o doble pared; *iii)* Reducir las aportaciones de agua usando preferiblemente riego localizado; *iv)* Usar materiales de cubierta termoaislantes; *v)* Emplear acolchado plástico; y *vi)* Podar y deshojar las partes bajas e internas de las plantas.

Reducir las tasas de transpiración del cultivo puede ser eficaz para conseguir un uso más eficiente de la energía, al necesitar menor aporte de la misma para el control de la humedad ambiente, sobre todo en condiciones de baja radiación solar. Una reducción controlada del área foliar del cultivo, cuando se tienen índices de área foliar altos, como ocurre en muchos cultivos de invernadero, puede ayudar a economizar energía sin afectar negativamente la producción, así en tomate la eliminación de las hojas adultas inferiores reduce la tasa transpiratoria un 30% sin efectos negativos en la producción (Adams *et al.*, 2002).

En sentido inverso, aumentar la consigna de humedad del ambiente contribuye a ahorrar energía y puede ser positivo para el cultivo en ambientes con humedad moderada (Elings *et al.*, 2005; Montero, 2006).

Para compensar circunstancias de baja humedad relativa, se puede: *i)* Hacer descender la temperatura, por ejemplo con ayuda de sombreado; *ii)* Aplicar aspersión o nebulización de agua; y *iii)* Aumentar la circulación de aire con el invernadero cerrado.

6. Enriquecimiento carbónico

El uso de CO₂ puro es caro. Si se dispone de gas natural se pueden usar los gases de la combustión de la calefacción. En las regiones cálidas no es fácil encontrar la oportunidad de aplicar esta técnica, debido a la necesidad de ventilar el invernadero en las horas en las que las tasas de fotosíntesis son

mayores y el aprovechamiento de la inyección de CO₂ podría ser interesante si no existiera el problema de perderlo por las ventanas abiertas.

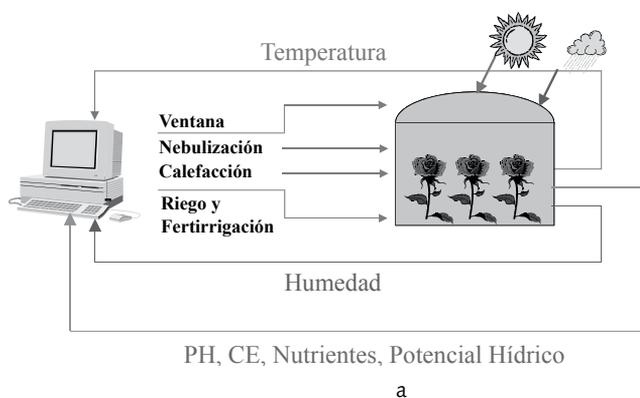
7. Regulación del fotoperiodo

Algunos cultivos son sensibles a la duración del día para desarrollar sus fases del desarrollo. Es interesante conocer estas cuestiones, ya que en invernadero es fácil tener la capacidad de regularlas. Cultivos como la *Gypsophilla*, el crisantemo y la poinsetia dependen de la duración del día para desarrollar sus fases de crecimiento vegetativo y de desarrollo floral, con lo cual es posible programar perfectamente el crecimiento y el calendario de recolección. El alargamiento del día se hace con lámparas de incandescencia con intensidad de unos 0,5 W.m⁻². Por ejemplo, para el crisantemo, que florece con día largo, durante el invierno se induce la floración encendiendo las lámparas a intervalos cortos (de 6 a 10 minutos) cada 30 minutos. En cambio para estimular el crecimiento vegetativo, se alarga la noche en verano cubriendo el cultivo con pantallas de polietileno de baja densidad, de color negro o de materiales negros en la capa interior y aluminizados por la capa externa, que no dejen pasar más de 0,1 W.m⁻² de PAR (Urban,1997). En el caso de la poinsetia, *Euphorbia pulcherrima*, la inducción de la floración se produce en condiciones de día corto, aunque en esta especie el proceso es más complejo porque también se ve afectado por la temperatura y asimismo por el tipo de cultivar. La iluminación se hace con lámparas de incandescencia de 60 a 100 vatios, como en el caso del crisantemo, separadas unos 2 m y a una altura de 1 a 1,2 m sobre las plantas. Los periodos de oscuridad deben ser de 14 a 14,5 horas a 16-20°C para conseguir una iniciación rápida.

8. Control automático del invernadero

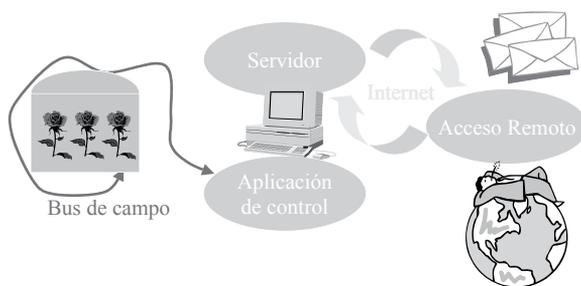
Los sistemas de control pueden mejorar sustancialmente si incorporan herramientas capaces de integrar modelos de comportamiento del clima y del cultivo, que permitan un control inteligente, multivariable, utilizando convenientemente las señales procedentes de los sensores, incluso efectuando predicciones que permitan anticipar las acciones de control (control predictivo), determinando las consignas de clima necesarias para la optimización de las condiciones climáticas (por ejemplo, a través de la calefacción o de la ventilación), o de un proceso del cultivo, por ejemplo la transpiración. El control integrado permite, asimismo, disponer de criterios para resolver acciones que pueden resultar conflictivas, porque interaccionan sobre diversas variables, caso de la ventilación o de la nebulización, que modifican tanto la temperatura como la humedad del aire. En estos casos, es interesante que las decisiones que se tomen para activar los equipos, no se basen en una variable, sino que, en función de todas las variables afectadas, el sistema decida la mejor acción de control sobre cada uno de los equipos. En la figura 6a se presenta un esquema de control integral de un invernadero.

El aislamiento tradicional de las instalaciones hortícolas, se puede solventar con facilidad actualmente gracias a la introducción de internet. Esto permite que el horticultor acceda de modo remoto a su instalación, para supervisar y teleoperar en tiempo real su invernadero desde cualquier lugar del mundo en que se encuentre, simplemente con su ordenador portátil o con su teléfono móvil, puede comprobar el estado de las variables de todo tipo del sistema, que son medidas por los sensores, y tiene capacidad para modificar las consignas de control de los equipos y efectuar las consiguientes acciones de corrección, sin necesidad de estar presente en su invernadero (figura 6b). Estos sistemas deben ser robustos para ser útiles en horticultura e incorporan además herramientas a prueba de fallos y de gestión de alarmas por internet a correo electrónico y a teléfonos móviles, que garantizan la seguridad, tanto de los equipos y las instalaciones, como del cultivo (Martínez *et al.*, 2002).



a

Figura 6a. Esquema de control integral de un invernadero (clima y fertirrigación).
Fuente: Martínez *et al.* (2002)



b

Figura 6b. Estructura del sistema de control basado en buses de campo y conexión remota desde internet.
Fuente: Martínez *et al.* (2002)

8.1 Señales del cultivo y su aprovechamiento

Para que en la actualidad se produzca un avance significativo en la tecnología del cultivo protegido, es necesario que las respuestas de las plantas entren a formar parte del procedimiento de control del invernadero, es el concepto de la “speaking plant” de Hashimoto *et al.* (1985), es decir, que hace ya casi tres décadas que se empezó a hablar de la conveniencia de atender a las señales que envía directamente la planta. Hacer intervenir variables del comportamiento de la planta, a través de técnicas de medida no destructivas y no invasivas significaría un avance tecnológico importante para la optimización del control del clima del invernadero (Takayama *et al.*, 2008). Registrar y comprender las respuestas de las plantas al microclima de su entorno ayudaría a identificar qué condiciones son las que provocan efectos negativos en el cultivo y, por ello, asimismo a actuar sobre la regulación climática y el manejo del cultivo, para resolver el problema (Murase, 2002; Kacira *et al.*, 2005). A lo largo de estos años se ha avanzado notablemente en esta dirección, para desarrollar sensores y técnicas que permiten medir la radiación interceptada por el cultivo (Jansen *et al.*, 2008), alteraciones del cultivo a través de microvariaciones de sus órganos o de su temperatura foliar (Abdelaziz *et al.*, 2009; Vermeulen *et al.*, 2008), etc.

A través del tratamiento de la imagen es posible medir el crecimiento y el desarrollo del cultivo, tanto en su fase adulta como en la de semillero (Lin *et al.*, 1998; Kim y Ryu, 1999). También el análisis de imágenes grabadas permite analizar la tasa de crecimiento del fruto del tomate, su forma y su color (Hatoh *et al.*, 1990), así como las primeras fases de un trastorno frecuente como es la necrosis apical. No es necesario decir la importancia que puede tener el manejo adecuado de estas informaciones para el control automático del invernadero.

El uso de las relaciones entre la luz solar y el comportamiento del cultivo como receptor que absorbe, refleja y transmite proporciones de ella, puede dar información del estado de la planta. Las hojas verdes absorben la banda visible del espectro, entre 380 y 780 nm y reflejan la mayor parte de la radiación infrarroja corta, entre 780 y 1.100 nm y media, entre 1.300 y 2.500 nm. La proporción de absorción de la banda visible depende de las concentraciones de clorofila y de caroteno presentes en el follaje. La **imagen de reflectancia** del dosel es el resultado de la reflectancia de las hojas, que depende de la combinación de pigmentos, clorofilas, carotenoides, flavonoides, etc., junto con la arquitectura de las plantas (Jones y Schofield, 2008). En el rango de luz visible se ha tratado de asociar estados de la planta con coloración foliar y cambios de tamaño, para relacionarlos con deficiencias nutritivas (Hetzroni y Miles, 1992). También en el rango IR corto se ha hecho lo mismo, empleando medidas de reflectancia (Graeff *et al.*, 2004). Igualmente se ha actuado con respecto al estado hídrico, a través de asociaciones del potencial hídrico

foliar con variaciones de color del dosel, por análisis de imagen (Murase *et al.*, 1995) y también tratando de relacionar el estado hídrico con la reflectancia de la planta, en las bandas de IR corto y medio (Yang y Ling, 2003).

La **imagen térmica** es otro instrumento que permite conocer la temperatura de la planta, determinada por la tasa de transpiración foliar, y a través de ella detectar precozmente síntomas de estrés (Lin *et al.*, 1999; Jones y Schofield, 2008). Asimismo, es posible medir en tiempo real la temperatura de la planta por medio de sensores de termometría IR, que transmiten la señal al ordenador de supervisión y control. Estos sensores tienen dos ventajas con respecto a los termistores, termopares, etc., por una parte no tocan la planta y, por lo tanto, no causan perturbación en los órganos en los que se mide y, por otra parte, la medida es más representativa al no limitarse a un solo punto. Sin embargo, tienen otros inconvenientes, uno de ellos es la posible interferencia de otros objetos en el campo de visión. La temperatura foliar depende de la tasa de transpiración y sintetiza la respuesta a un conjunto de variables (radiación neta absorbida, temperatura del aire, etc.), lo que dificulta el manejo directo de dicha temperatura en aplicaciones de control. Para evitar esta dificultad se propone utilizar índices de estrés, uno de los más conocidos es el de Jackson *et al.* (1981) (*crop water stress index*, CWSI), que es una estimación de la apertura estomática y tiene en cuenta las diferencias de temperatura entre el dosel y el aire, en condiciones conocidas de transpiración del cultivo y DPV, tipificando qué valores del índice CWSI se asocian a las diversas tasas de transpiración:

$$CWSI = \frac{T_{dosel} - T_{tr\ max}}{T_{seca} - T_{tr\ max}}$$

Donde: T_{dosel} , temperatura medida del dosel del cultivo; $T_{tr\ max}$, temperatura del dosel a transpiración máxima; T_{seca} , temperatura de una superficie seca

Dado que la fotosíntesis es un factor capital determinante de rendimiento y la calidad de un cultivo, detectar precozmente disfunciones de este proceso es importante para el control del manejo del cultivo. La **imagen de la fluorescencia** de la clorofila se ha ensayado como herramienta no invasiva, por ser un indicador sensible del comportamiento del sistema fotosintético, que puede relacionarse con deficiencias nutritivas y con respuestas a estrés térmico e hídrico. Un problema importante que tiene esta técnica es que su señal luminosa es muy débil y no es fiable en un ambiente iluminado de amplio espectro, como es el del invernadero, por lo cual no se puede aconsejar para plantas en estas condiciones de cultivo (Willits y Peet, 2001; Kacira *et al.*, 2005; Takayama *et al.*, 2008).

Debido a que cada tipo de sensor de imagen proporciona información limitada, que impide la interpretación y el diagnóstico precisos, es aconsejable el diagnóstico por imagen multisensorial, combinando dos o más tecno-

logías. Por lo tanto, medir de modo directo el comportamiento del cultivo puede dar oportunidades de hacer un uso mejor de los recursos y de las estrategias de control del invernadero. Si se detecta con rapidez cualquier situación que coloque al cultivo en estrés, se podrá reaccionar para remediar el problema antes de que afecte negativamente los intereses del productor. Por lo general, cuando se aprecian los síntomas ya es tarde, el daño ha ocurrido. Se necesitan sistemas que anticipen la información sobre las condiciones que afectan el cultivo para corregirlas con rapidez, causando las menores pérdidas posibles (Vermeulen *et al.*, 2008). Medidas como las microvariaciones de diámetro del tallo o de otros órganos, la tasa de flujo de savia por el xilema, la temperatura de las hojas (Jones, 2004; Vermeulen *et al.*, 2008), las relaciones entre las variaciones de temperatura del dosel y del aire (Qiu *et al.*, 2009), pueden advertir de condiciones negativas para el cultivo y dar oportunidad de intervención bien manual o bien automática, antes de que se produzcan síntomas visuales y evitar por lo tanto daños irreversibles.

8.2 Requisitos de los sensores

Para ser aplicables en horticultura, los sensores tienen que ser baratos, de pocas necesidades de mantenimiento y de preparación o calibrado, aparte de ser fiables y poco afectados por otras condiciones ambientales que no sean las que deben medir (Baas y Slootweg, 2004).

En la actualidad es posible la sustitución de los sistemas tradicionales de conexión de los sensores, por los sistemas de control distribuido en subsistemas, conectados por *bus de campo*, que simplifican el cableado de comunicación de la red de sensores y actuadores (figura 7). También es técnicamente posible suprimir el cableado totalmente con el uso de redes inalámbricas para ethernet sin cables (norma industrial WiFi), con lo que se simplifica al máximo tanto la instalación como la inclusión de nuevos sensores y actuadores en el sistema (Martínez *et al.*, 2002).

Las razones por las que estas tecnologías no se han incorporado de modo general a la horticultura protegida, son porque aún hay algunos problemas no resueltos que lo impiden. En el caso, por ejemplo, de los sensores y técnicas de visión de imagen, es que se trata de equipos caros, de manejo complicado y, algo importante en las aplicaciones en horticultura, la alta variabilidad de las condiciones de luz, incluso en intervalos muy cortos de tiempo, debido al movimiento del sol y de las nubes. Esta variación afecta a la calidad de la imagen y a la reflectancia, y limitan aún su posibilidad de empleo como herramienta de supervisión y control. También la dificultad para la interpretación acertada de los datos medidos, su asociación con los procesos del cultivo, la distinción entre los umbrales de respuesta de las plantas que pueden afectar a su productividad y otro tipo de desviaciones, esto aparte de las condiciones continuamente cambiantes tanto en cuanto al medio ambiente

del invernadero como en cuanto al cultivo que va creciendo y desarrollándose (Baas y Slootweg, 2004).

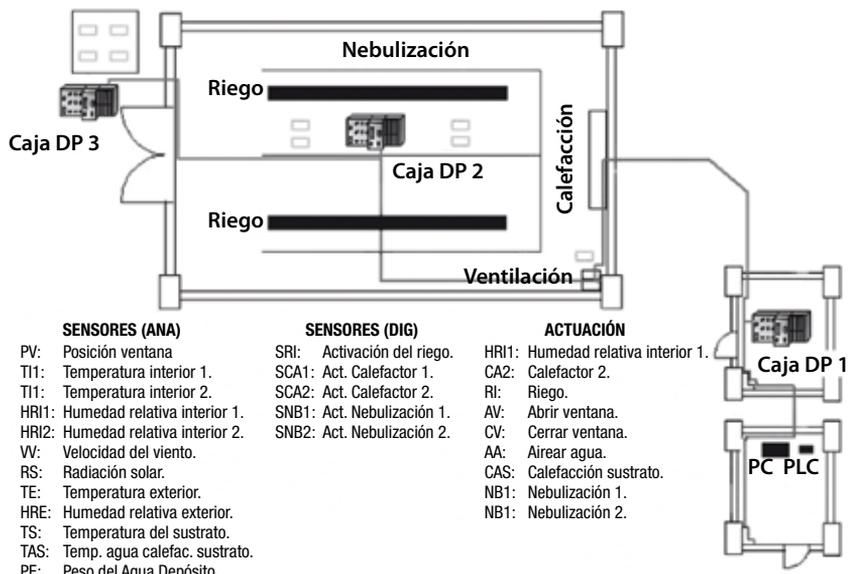


Figura 7. Sistema de control distribuido con uso del bus de campo en invernadero.
Fuente: Martínez *et al.* (2002).

8.3 Modelos

Los modelos son una herramienta de gran importancia para el avance tecnológico del sistema. Con la ayuda de modelos del cultivo es posible mejorar el control del clima del invernadero, para acercar las condiciones a un funcionamiento óptimo orientado a la producción. La combinación de los modelos con sensores, que les proveen de información sobre las condiciones en las que se encuentran las plantas y sobre la propia respuesta de éstas, forma una herramienta avanzada para el control, es el caso por ejemplo de los modelos de estimación de la tasa de transpiración de un cultivo (Baille *et al.*, 1994; Baille *et al.*, 1996; Stanghellini y van Meurs, 1992), que pueden ayudar a determinar el efecto de las consignas de manejo climático del invernadero sobre la respuesta fisiológica del cultivo.

Durante los años más recientes se dedica una actividad intensa al estudio de modelos, que tratan de representar y predecir el comportamiento de diversos cultivos, en términos de crecimiento a partir de la influencia de variables climáticas o de condiciones bien definidas de manejo del cultivo (Gómez *et al.*, 2004; Marcelis *et al.*, 1998, 2005, 2006; del Amor *et al.*, 2008; Roca, 2009; Roca y Martínez, 2009). Se ha dedicado mucho tiempo y esfuerzo humano a profundizar en los procesos que determinan la produc-

ción, como son la fotosíntesis, el crecimiento, las respuestas de estrés de las plantas, etc., pero el trabajo realizado aún no es suficiente para establecer modelos aplicables a escala práctica. La dificultad de obtener modelos mecanísticos aplicables, hace que se intensifique el trabajo sobre modelos empíricos, más simples, basados en pocas variables y parámetros, pero capaces de sintetizar el comportamiento global del sistema en estudio y, por todo ello, más fácilmente integrables en sistemas de regulación y control automático. Por lo tanto, para estos objetivos es necesaria una integración de la información aprovechando los datos que proporcionan, por un lado los sensores y, por otro, la conexión de los modelos representativos del cultivo y los modelos empleados para describir el comportamiento físico del clima del invernadero. La integración de estos modelos puede ayudar a determinar anticipadamente las consignas de manejo más convenientes y los resultados esperados, ayudando al horticultor en sus decisiones y haciendo de este modo posible anticipar las actuaciones de los equipos de control, dirigidas a optimizar tanto las condiciones climáticas como la respuesta del cultivo (tasa de transpiración, tasa fotosintética, etc.).

8.4 Redes inalámbricas de nodos de sensores

Las redes inalámbricas de sensores, RIS, están compuestas por transmisores y receptores de radiofrecuencia, sensores, microcontroladores, de bajo coste, baja necesidad de potencia, multifuncionales, pequeños, que pueden comunicarse a distancias cortas. Estas redes se organizan en pequeños nodos, que transmiten los datos a un elemento central y pueden tener capacidades para autoorganizarse, autoconfigurarse, autodiagnosticarse y autorrepararse y ser tolerantes a fallos y sin mantenimiento, por lo que es muy fácil para el usuario ampliar la red o cambiar las localizaciones de los sensores (Thaskani y Rammurthy, 2010). Actualmente, ya es posible hacer agregados multisensores inteligentes, capaces de medir un conjunto de variables relacionadas con un proceso, por ejemplo la transpiración de la planta, y efectuar el tratamiento de la información, por medio de filtros y algoritmos incorporados, que en tiempo real informan del estado del cultivo en relación con el proceso y pueden emplearse para activar respuestas de control (Millán-Almaraz, 2010). Los costes de esta tecnología son todavía altos, requieren excesiva potencia, mantenimiento y las distancias de comunicación son muy cortas (van Tuijl *et al.*, 2008; Carrara *et al.*, 2008), factores todos ellos limitantes para su aplicación en horticultura protegida.

En el mercado se ha extendido la disponibilidad de este tipo de sensores y de sistemas de comunicación sin hilos, que permiten construir redes distribuidas de sensores y actuadores para aplicaciones de supervisión, pero la mayor parte de esta tecnología no es suficientemente robusta ni fiable para obtener un buen comportamiento en las condiciones normales de uso en

los invernaderos, con oscilaciones y extremos amplios de temperatura y humedad, alta radiación UV, polvo, productos químicos agresivos, esto aparte del elevado coste actual de adquisición. Es necesario desarrollar aún más esta tecnología para hacerla aplicable en el campo de la horticultura. Para ello, los sensores deben permitir, entre otras cosas, mucha versatilidad en la colocación fácil y rápida en la zona que interese supervisar por cualquier problema, así como ser fácilmente ampliable. Asimismo, tener la capacidad de transmitir datos sin problemas de interferencias hasta por lo menos 1.000 metros, con baja necesidad de potencia (Lea-Cox *et al.*, 2007, 2008).

9. Conclusión

La alta competencia que se desprende de la globalización del mercado, por un lado, las exigencias de calidad, salubridad y suministro regular de productos frescos por los consumidores, por otro lado, la demanda de protección ambiental finalmente, acompañada por las legislaciones internacional y nacional, constituyen una exigencia de innovación en la tecnología y en su aplicación, para la cual es imprescindible, en primer lugar, atender a la formación del horticultor y, seguidamente, poner en marcha estrategias de producción sostenible y de comercialización basadas en una alta eficiencia de las instalaciones y los recursos, sin olvidar una buena situación respecto al mercado y una clara diferenciación del producto.

En otro orden de cosas, la horticultura protegida, con todas las capacidades tecnológicas que integra, es una herramienta de gran utilidad para la producción intensiva y sostenible de alimentos, un objetivo clave en las conclusiones del Día del Desarrollo Agrícola y Rural 2010 (ARDD, 2010), según las cuales la agricultura deberá adaptarse a condiciones cada vez más variables e impredecibles, al tiempo que debe satisfacer la necesidad del suministro de alimentos saludables para una población mundial prevista de 9.000 millones para la mitad del siglo XXI. Se trata, sin lugar a dudas, de un desafío para la ciencia y la tecnología, pero también para la solidaridad y la generosidad del ser humano.

Bibliografía

- Abdelaziz, M.E., Paschold, P.J. and Pokluda, R. 2009. Sensitivity of stem diameter variations for detecting water stress in tomato transplants. *Acta Horticulturae*, 807:189-194.
- Adams, S.R., Woodward, G.C. and Valdés, V.M. 2002. The effects of leaf removal and of modifying temperature set-points with solar radiation on tomato. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 77:733-738.
- ARDD. 2010. Statements of the Agriculture and Rural Development Day. Cancun, 3p.

- Arenas, M., Martínez, P.F., García, U. y González, A. 1982. Energía geotérmica para la agricultura. Ensayo piloto en España. *Agricultura*, 40:377-380.
- Arenas, M., Martínez, P.F. y Solesio, J. 1984. Viabilidad y gestión de aprovechamientos agrarios. Energía geotérmica. Instituto de la Ingeniería de España. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. pp. 215-232.
- Arenas, M. et Martínez, P.F. 1985. Perspective d'utilisation des rejets thermiques de la centrale electronucleaire d'Almaraz (Espagne). First Technical consultation on geothermal energy and industrial thermal effluents. FAO Roma. FAO/CNRE bull 6:43-44.
- ASHRAE. 1989. Fundamentals handbook. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc.
- Baas, R. and Slootweg, C. 2004. On-line acquisition of plant related and environmental parameters (plant monitoring) in gerbera: determining plant responses. *Acta Horticulturae*, 654:139-146.
- Baeza, E.J. 2007. Optimización del diseño de los sistemas de ventilación en invernadero tipo parral. Tesis Doctoral, Universidad de Almería, 204p.
- Baeza, E.J., Pérez-Parra, J. and Montero, J.I. 2005. Effect of ventilador size on natural ventilation in parral greenhouses by means of CFD simulations. *Acta Horticulturae*, 691:465-472.
- Baeza, E.J., Pérez-Parra, J.J., López, J.C. and Montero, J.I. 2006. CFD study of the natural ventilation performance of a parral type greenhouse with different numbers of spans and roof vent configurations. *Acta Horticulturae*, 719:333-340.
- Bailey, B. 1981. The evaluation of thermal screens in glasshouses on commercial nurseries. *Acta Horticulturae*, 115:663-670.
- Baille, A. 1988. Low temperature heating systems in greenhouse production. Technological aspects and thermal performances. En: "Utilization of solar and geothermal energy for heating greenhouses", FAO-CNRE Bull. 21:107-116.
- Baille, M., Rasset, E., Wacquand, C. et Musard, M. 1978. Essai de chauffage de serres par circulation d'eau tiède Dans des gaines posées au sol. *Acta Horticulturae*, 76:151-157.
- Baille, M., Baille, A. and Delmon, D. 1994. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71:83-97.
- Baille, M., Romero-Aranda, R. and Baille, A. 1996. Stomatal conductance of rose whole plants in greenhouse conditions. Analysis and modelling. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 71:957-970.

- Bakker, J.C., Adams, S.R., Boulard, T. and Montero J.I. 2008. Innovative technologies for an efficient use of energy. *Acta Horticulturae*, 801:49-62.
- Bartzanas, T., Boulard, T. and Kittas, C. 2002. Numerical simulation of the air flow and temperature patterns in a greenhouse equipped with insect proof screens in the openings. *Computer and Electronics in Agriculture*, 34:207-221.
- Bartzanas, T., Tchamitchian, M. and Kittas, C. 2005. Influence of the heating method on greenhouse microclimate and energy consumption. *Biosystems Engineering*, 91:487-499.
- Baudoin, W., Grafiadelis, M., Jiménez, R., la Malfa, G., Martínez, P.F., Monteiro, A.A., Nosen, A., Verlodt, H., de Villele, O., von Zabeltitz, C. y Garnaud, J.C. 2002. El cultivo protegido en clima mediterráneo. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal No. 90, FAO, Roma, 323p.
- Boulard, T. 2007. Greenhouse natural ventilation modelling: a survey of the different approaches. *Acta Horticulturae*, 719:29-40.
- Boulard, T. et Baille, A. 1984. Utilisation d'eau à basse température pour le forçage des cultures sous abri. I. Aspects microclimatique et énergétique. *Agronomie*, 4:213-220.
- Bournet, P.E., Ould Khaona, S.A., Boulard, T., Migeon, C. and Chasseriaux, G. 2007. Effect of roof and side opening combinations on the ventilation of a greenhouse using computer simulation. *Transactions of the ASABE*, 50(1):201-217.
- Cabrera, F.J., Lopez, J.C., Baeza, E.J. and Pérez-Parra, J.J. 2006. Efficiency of anti-insect screens placed in the vents of Almería greenhouses. *Acta Horticulturae*, 719:605-614.
- Campen, J.B. 2005. Greenhouse design applying CFD for Indonesian conditions. *Acta Horticulturae*, 691:419-424.
- Carrara, M., Catania, P., Pipitone, F., Vallone, M. and Paolino, C. 2008. Temperature and relative humidity distribution inside a greenhouse using wireless sensors. *Acta Horticulturae*, 801:595-599.
- Castilla, N. 2005. Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo. Madrid: Ed. Mundi-Prensa, 462p.
- Cockshull, K.E., Hand, D.W. and Langton, F.A. 1981. The effects of day and night temperature on flower initiation and development in chrysanthemum. *Acta Horticulturae*, 125:101-110.
- Courtois, N., Petit, V., Thiery, D., Grisey, A., Graselly, D. and Pommier, F. 2008. Reversible climatisation of greenhouse in France using aquifer thermal energy storage: pre-feasibility study. *Acta Horticulturae*, 801:819-826.

- De Köning, A.N.M. 1990. Long term temperature integration of tomato. Growth and development under alternative temperature regimes. *Scientia Horticulturae*, 45:117-127.
- del Amor, F.M., Ortuño, G., Gómez, M.D., López, A. and García, A.J. 2008. Using growth functions to describe dry matter production of sweet pepper in greenhouse in Southern Spain. *Acta Horticulturae*, 801:1113-1119.
- Elings, A., Kempkes, F.L.K., Kaarsemaker, R.C., Ruijs, M.N.A., van de Braak, N.J. and Dueck, T.A. 2005. The energy balance and energy-saving measures in greenhouse tomato cultivation. *Acta Horticulturae*, 691:67-74.
- Fatnassi, H., Boulard, T., Poncet, C. and Chave, M. 2006. Optimisation of greenhouse insect screening with computational fluid dynamics. *Biosystem Engineering*, 93:301-312.
- Fernández-Zamudio, M.A., Pérez, A. y Caballero, P. 2006. Análisis económico de la tecnología de los invernaderos mediterráneos: aplicación en la producción del pimiento. ITEA, 102(3):260-277.
- Fernández-Zamudio, M.A., Caballero, P. y de Miguel, M.D. 2010. Costes de producción del tomate según el tipo de invernadero. *Vida Rural*, 319:40-43.
- Fuchs, M., Dayan, E. and Presnov, E. 2006. Evaporative cooling of a ventilated greenhouse rose crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138:203-215.
- Gázquez, J.C., López, J.C., Baeza, E., Sáez, M., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E. and Lorenzo, P. 2006. Yield response of a sweet pepper crop to different methods of greenhouse cooling. *Acta Horticulturae*, 719:507-513.
- Gázquez, J.C., López, J.C., Pérez-Parra, J.J., Baeza, E., Sáez, M. and Parra, A. 2008. Greenhouse cooling strategies for mediterranean climate areas. *Acta Horticulturae*, 801:425-429.
- Gbiorczyk, K., von Elsner, B., Sonneveld, P.J. and Bot, G.P.A. 2004. The effect of roof inclination on the condensation behaviour of plastic films used as greenhouse covering materials. *Acta Horticulturae*, 633:127-136.
- Gómez, M.D., Baille, A., González, M.M. and Mercader, J.M. 2004. Dynamics of dry matter and mineral nutrients accumulation by a glasshouse cucumber crop. *Acta Horticulturae*, 633:519-529.
- González Real, M.M. 1995. Estudio y modelización de intercambios gaseosos en cultivo de rosas bajo invernadero. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 192 p.
- Graeff, S., Claupein, W. and Schuter, L.S. 2004. Identification of nutrient deficiencies in corn using reflectance measurements. En: Digital

- imaging and spectral techniques: applications to precision agriculture and crop physiology. *American Society of Agronomy*, 66:165-175.
- Hashimoto, Y., Morimoto, T. and Fukuyama, T. 1985. The speaking plant approach to the sintesis of control system in the greenhouse. *Acta Horticulturae*, 174:219-226.
- Hao, X., Borhan, M.S. and Zheng, J. 2008. Effects of temperature integration regimes with low pre-night temperatures on energy consumption, microclimate and fruit yield in early greenhouse tomato production. *Acta Horticulturae*, 801:473-478.
- Hatoh, K., Nonami, H., Fukuyama, T. and Hashimoto, T. 1990. Physiological diagnosis of tomato plants Brown in hydroponic culture by using image análisis. *Acta Horticulturae*, 399:225-232.
- Hemming, S., Kempkes, F., van der Braak, N., Dueck, T. and Marissen, N. 2006. Greenhouse cooling by NIR reflexion. *Acta Horticulturae*, 719:97-105.
- Hetzroni, A. and Miles, G.E. 1992. Machine vision monitoring of plant health. ASAE paper 92-3574, 11p.
- Hurd, R.G. and Graves, C.J. 1984. The influence of different temperature patterns having the same integral on the earliness and yield of tomatoes. *Acta Horticulturae*, 148:547-554.
- Jackson, R.D., Idso, S.B. and Reginato, R.J. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17:1133-1138.
- Janssen, H.J.J., Sarlikioti, V., Gieling, T.H., Meurs, E.J.J., Ruijsch-van and Dugteren, J. 2008. A prototype sensor for light interception by plants in a greenhouse. *Acta Horticulturae*, 801:621-627.
- Jones, H.G. 2004. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research*, 41:107-163.
- Jones, H.G. and Schofield, P. 2008. Thermal and other remote sensing of plant stress. *General and Applied Plant Physiology*, 34(1-2):19-32.
- Kacira, M., Sase, S. and Okushima, L. 2004. Optimization of vent configuration by evaluating the greenhouse and plant canopy ventilation rates under wind induced ventilation. *Transactions of the ASAE*, 47(6):2059-2067.
- Kacira, M., Sase, S., Okushima, L. and Ling, P.P. 2005. Plant response-based sensing for control strategies in sustainable greenhouse production. *Journal of Agricultural Meteorology*, 61(1):15-22.
- Katsoulas, N., Kitta, E., Kittas, C., Tsirogiannis, I.L., Stamati, E. and Savvas, D. 2006. Greenhouse cooling by a fog system: effects on microclimate and on production and quality of soilless pepper crop. *Acta Horticulturae*, 719:455-461.

- Kavga, A., Pantelakis, S., Panidis, T. and Bontozoglou, V. 2008. Investigation of the potential of long wave radiation heating to reduce energy consumption for greenhouse heating. *Acta Horticulturae*, 801:741-748.
- Kempkes, F.L.K., van de Braak, N.J and Bakker, J.C. 2000. Effect of heating system position on vertical distribution of crop temperature and transpiration in greenhouse tomatoes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 75:57-64.
- Kim, G. and Ryu, K.H. 1999. Crop growth measurements by image processing for greenhouse automation. ASAE paper 99-5002, 17p.
- Klose, F. and Tantau, H.J. 2005. Test of insect screens. Measurements and evaluation of the air permeability and light transmission. *European Journal of Horticultural Science*, 69:235-242.
- Langhans, R.W., Wolfe, M. and Albright, L.D. 1985. Use of average night temperatures for plant growth for potential energy savings. *Acta Horticulturae*, 115:31-36.
- Langton, A. and Hamer, P. 2001. Crop scheduling and prediction. *The Grower*, 22:18-19.
- Lea-Cox, J.D. Kantor, G., Anhalt, J., Ristvey, A. and Ross, D.S. 2007. A wireless sensor network for the nursery and greenhouse industry. *SNA Research Conference*, 52:454-458.
- Lea-Cox, J.D., Ristvey, A.G., Arguedas, F., Ross, D.S. and Anhalt, J. 2008. A low-cost multihop wireless sensor network, enabling real-time management of environmental data for the greenhouse and nursery industry. *Acta Horticulturae*, 801:523-529.
- Lin, T.T., Cheng, S.F., Lin, T.H. and Tsai, M.R. 1998. Non destructive growth measurement of selected vegetable seedlings using machine vision. ASAE paper 98-3083, 10p.
- Lin, W.C., Block, G.S., Chen, S. and Ehret, D.L. 1999. Detection of water stress by using infrared imaging. *HortScience*, 34:532.
- Lund, J.B., Andreassen, A., Ottosen, C.O. and Aaslyng, J.M. 2006. Effect of a dynamic climate on energy consumption and production of Hibiscus rosa-sinensis L. in greenhouses. *HortScience*, 41:384-388.
- Marcelis, L.F.M., Heuvelink, E. and Goudriaan, J. 1998. Modelling of biomass production and yield of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae*, 74:83-111.
- Marcelis, L.F.M., Brajeul, E., Elings, A., Gárate, A., Heuvelink, E. and de Visser, P.H.B. 2005. Modelling nutrient uptake of sweet pepper. *Acta Horticulturae*, 691:285-292.
- Marcelis, L.F.M., Elings, A., Bakker, M.J., Brajeul, E., Dieleman, J.A., de Visser, P.H.B. and Heuvelink, E. 2006. Modelling dry matter

- production and partitioning in sweet pepper. *Acta Horticulturae*, 718:121-128.
- Markvart, J., Kalita, S., Jorgensen, B., Aaslyng, J. and Ottosen, C.O. 2008. IntelliGrow 2.0. - A greenhouse component-based climate control system. *Acta Horticulturae*, 801:507-513.
- Martínez, P.F. 1979. Comportamiento reproductivo del tomate sometido a diferentes mínimos térmicos en el semillero. *Anales INIA, Serie Producción Vegetal*, 11:171-177.
- Martínez, P.F. 1980. Calefacción de invernaderos por energía solar. Hoja Técnica INIA, No 33. INIA. Madrid. 21p.
- Martínez, P.F. 1994. The influence of environmental conditions of mild winter climate on the physiological behaviour of protected crops. *Acta Horticulturae*, 357:29-48.
- Martínez, P.F., González, A. y Aragón, R. 1982. Calefacción de invernaderos por energía solar. Resultados experimentales. Actas del I Congreso Ibérico de Energía Solar, International Solar Energy Society, Madrid, 3(8):38-52.
- Martínez, P.F., Arenas, M., González, A. y Aragón, R. 1983. Calefacción de invernadero a baja temperatura por energía geotérmica. *Actas de Horticultura*, 1:863-873.
- Martínez, P.F. and Abdel Fattah, Y.M.M. 1995. Effects of substrate warming in soilless culture on gerbera crop performance under seasonal variations. *Acta Horticulturae*, 408:31-40.
- Martínez, P.F.; González, A.; Aragón, R. and García, U. 1985. Technical application of geothermal energy for heating plastic greenhouses in Spain. First technical consultation on geothermal energy and industrial thermal effluents. FAO. Roma. FAO/CNRE Bull. 6:25-30.
- Martínez, P.F., Catalá, M.M., Romero, R., Solves, M.J. and Díaz, R. 1989. Root-zone heating of gerbera in rockwool. *Acta Horticulturae*, 246:45-52.
- Martínez, P.F. y Bimbo, B. 1992. Materiales plásticos para cubierta de invernadero. Datos para la selección y efectos sobre los cultivos. *Horticultura*, 79:13-31.
- Martínez, P.F., Roca, D., Suay, R., Martínez, M., Blasco, X., Herrero, J.M. y Ramos, C. 2002. Avances en el control de los factores del clima para el cultivo en invernadero. *Revista Técnica Comunitat Valenciana Agraria*, 20:29-47.
- Millán-Almaraz, J.R. 2010. FPGA-based fused smart sensor for real-time plant-transpiration dynamic estimation. *Sensors*, 10:8316-8331.
- Molina, F.D., Valera, D.L. and Álvarez, A.J. 2004. Measurement and simulation of climate inside Almeria type greenhouse using CFD. *Agricultural and Forest Meteorology*, 125:33-51.

- Montero, J.I. 2006. Evaporative cooling in greenhouses: effect on microclimate, water use efficiency and plant response. *Acta Horticulturae*, 719:373-383.
- Montero, J.I., Bretones, F. y Castilla, N. 1986. Comparación del microclima en invernadero de cubierta doble y sencilla en Almería. Actas II Congreso Sociedad Española de Ciencias Hortícolas, Vol 1:628-635.
- Montero, J.I., Antón, A., Biel, C. and Franquet, A. 1990. Cooling of greenhouses with compressed air fogging nozzles. *Acta Horticulturae*, 281:199-209.
- Montero, J.I., Antón, A. y Muñoz, P. 1998. Tecnología de invernaderos. Eds. J. Pérez-Parra y Ciadrado, I. Almería: FIAPA, Consejería de Agricultura y Cajamar, 253-266.
- Montero, J.I., Muñoz, P., Antón, A. and Iglesias, N. 2005. Computational fluid dynamic modelling of night time energy fluxes in unheated greenhouses. *Acta Horticulturae*, 691:403-409.
- Montero, J.I., Antón, A., Melé, M., Muñoz, P., Cid, M.C. and Raya, V. 2008. Suggestions to improve leeward ventilation of large span greenhouses. *Acta Horticulturae*, 801:949-954.
- Morel, P., Laury, J.C., Baille, M. 1992. The control of greenhouse temperatures in summer. Francia: Publicación CNIH Station Angers. 15p.
- Murase, H. 2002. Precision technologies for protected agriculture. ASAE paper 023034.
- Murase, H., Honami, N. and Nishira, Y. 1995. A neural network estimations technique for plant water status using the texture features of pictorial data of plant canopy. *Acta Horticulturae*, 399:255-262.
- Mutwiwa, U.N., von Elsner, B., Tantau, H.J. and Max, J.F.J. 2008. Cooling naturally ventilated greenhouses in the tropics by near-infrared reflection. *Acta Horticulturae*, 801:259-265.
- Nisen, A. et Deltour, J. 1986. Considérations pratiques sur la transmission du rayonnement solaire et la chaleur pour les matériaux utilisés en serres comme couverture, ombrage et écran thermique. IRSIA, 94p.
- Qiu, G.Y., Omasa, K. and Sase, S. 2009. An infrared-based coefficient to screen plant environmental stress: concept, test and applications. *Functional Plant Biology*, 36:990-997.
- Roca, D. 2009. Absorción de nitrato en cultivo sin suelo. Estudio de las implicaciones agronómicas y fisiológicas como base para optimizar el manejo de la fertilización. Aplicación a un cultivo de rosas. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 270p.
- Roca, D., Martínez, P.F. y Tartoura, S.A.A. 1999. Factores culturales que afectan al desarrollo de la necrosis apical en el pimiento. *Actas de Horticultura*, 24:25-31.

- Roca, D. y Martínez, P.F. 2001. Efectos de la humedad del aire y de la salinidad de la solución nutritiva sobre el transporte mineral al fruto del pimiento. *Actas de Horticultura*, 30:889-896.
- Roca, D., Martínez, P.F., Carbonell, E., Pérez-Panadés, J. y Belda, R.M. 2005. Cinética de absorción de nitrato en el cultivo hidropónico de rosal cv. Dallas y su aplicación a la gestión automática de la fertilización nitrogenada. *Actas de Horticultura*, 44:211-218.
- Roca, D. y Martínez, P.F. 2009. Análisis del crecimiento y estimación de la producción de rosas para flor cortada basada en variables climáticas. *Actas de Horticultura*, 54:709-714.
- Romero-Aranda, R. and Martínez, P.F. 1993. Diurnal course of gaseous exchange behaviour and leaf water potential in relation to substrate heating of Gerbera. *Photosynthetica*, 29(1):95-101.
- Romero-Aranda, R., Soria, T. and Cuartero, J. 2002. Greenhouse mist improves yield of tomato plants grown under saline conditions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127(4):644-648.
- Roy, J.C. and Boulard, T. 2004. CFD predictions of natural ventilation and climate in a tunnel type greenhouse using a transpiration active crop model. *Acta Horticulturae*, 633:205-212.
- Sabeh, N.C., Giacomelli, G.A. and Kubota, C. 2006. Water use for pad and fan evaporative cooling of a greenhouse in a semi-arid climate. *Acta Horticulturae*, 719:409-416.
- Sase, S. 1989. The effects of plant arrangement on airflow characteristics in a naturally ventilated glasshouse. *Acta Horticulturae*, 245:429-435.
- Sase, S. 2006. Air movement and climate uniformity in ventilated greenhouses. *Acta Horticulturae*, 719:313-324.
- Sase, S., Ishii, M., Moriyama, H., Kubota, C., Kurata, K., Hayashi, M., Sabeh, N., Romero, P. and Giacomelli, G.A. 2006. Effect of natural ventilation rate on relative humidity and water use for fog cooling in a semiarid greenhouse. *Acta Horticulturae*, 719:385-392.
- Stanghellini, C. and van Meurs, T.M. 1992. Environmental control of greenhouse crop transpiration. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 51:297-311.
- Takayama, K., Nishina, H. and Sakai, Y. 2008. Detection of water stress induced photosynthetic dysfunction in tomato plant leaf with PRI measurement. *Acta Horticulturae*, 801:1213-1219.
- Teitel, M. 2006. The effect of screens on the microclimate of greenhouses and screenhouses. A review. *Acta Horticulturae*, 719:575-586.
- Tesi, R. 1972. Moderne tecniche di protezione in horticultura, floricultura e frutticoltura. Edagricole, Italia. 282p.

- Thaskani, S., Rammurthy, G. 2010. Application of topology under control wireless sensor networks in precision agriculture. IETE 41st Mid Term Symposium Report IIIT/TR/2010/55. 4p.
- Urban, L. 1997. Introduction a la production sous serre, 2 vols. Ed Tech-Doc, Paris. 210p.
- Valera, D.L., Molina, F.D., Álvarez, A.J., López, J.A., Terres-Nicoli, J.M. and Madueño, A. 2005. Contribution to characterisation of insect proof net screens: experimental measurements in wind tunnel and CFD simulation. *Acta Horticulturae*, 691:441-448.
- van Tuijl, B., van Os, E. and van Henten, E. 2008. Wireless sensor networks: state of the art and future perspective. *Acta Horticulturae*, 801:547-554.
- Verlodt, I., Daponte, T. and Verschaeren, P. 1995. Interference pigments for greenhouse films. *Plasticulture*, 108:13-26.
- Verlodt, I. and Verschaeren, P. 1997. New interference film for climate control. *Plasticulture*, 115:27-35.
- Vermeulen, K., Steppe, K., Linh, N.S., Lemeur, R., de Backer, L., Bleyaert, P., Dekock, J., Aerts, J.M. and Berckmans, D. 2008. Simultaneous response of stem diameter, sap flow rate and leaf temperature of tomato plants to drought stress. *Acta Horticulturae*, 801:1259-1265.
- von Elsner, B. 2005. Interference pigments in photoselective shading paint for greenhouses. *Acta Horticulturae*, 711:417-422.
- Willits, D.H. and Peet, M.M. 2001. Measurement of chlorophyll fluorescence as a heat stress indicator in tomato. Laboratory and greenhouse comparison. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126:188-194.
- Winspear, R.W. and Bailey, B. 1978. Thermal screens for greenhouse energy effectiveness. *Acta Horticulturae*, 87: 111-117.
- Yang, Y. and Ling, P.P. 2003. Improved model inversion procedure for plant water status assessment under artificial lighting using PROSPECT-SAIL model. ASAE paper 033118.
- Zwart, H.F. and Kempkes, F.L.K. 2008. Characteizing of cooling equipment for closed greenhouse. *Acta Horticulturae*, 801:409-415.

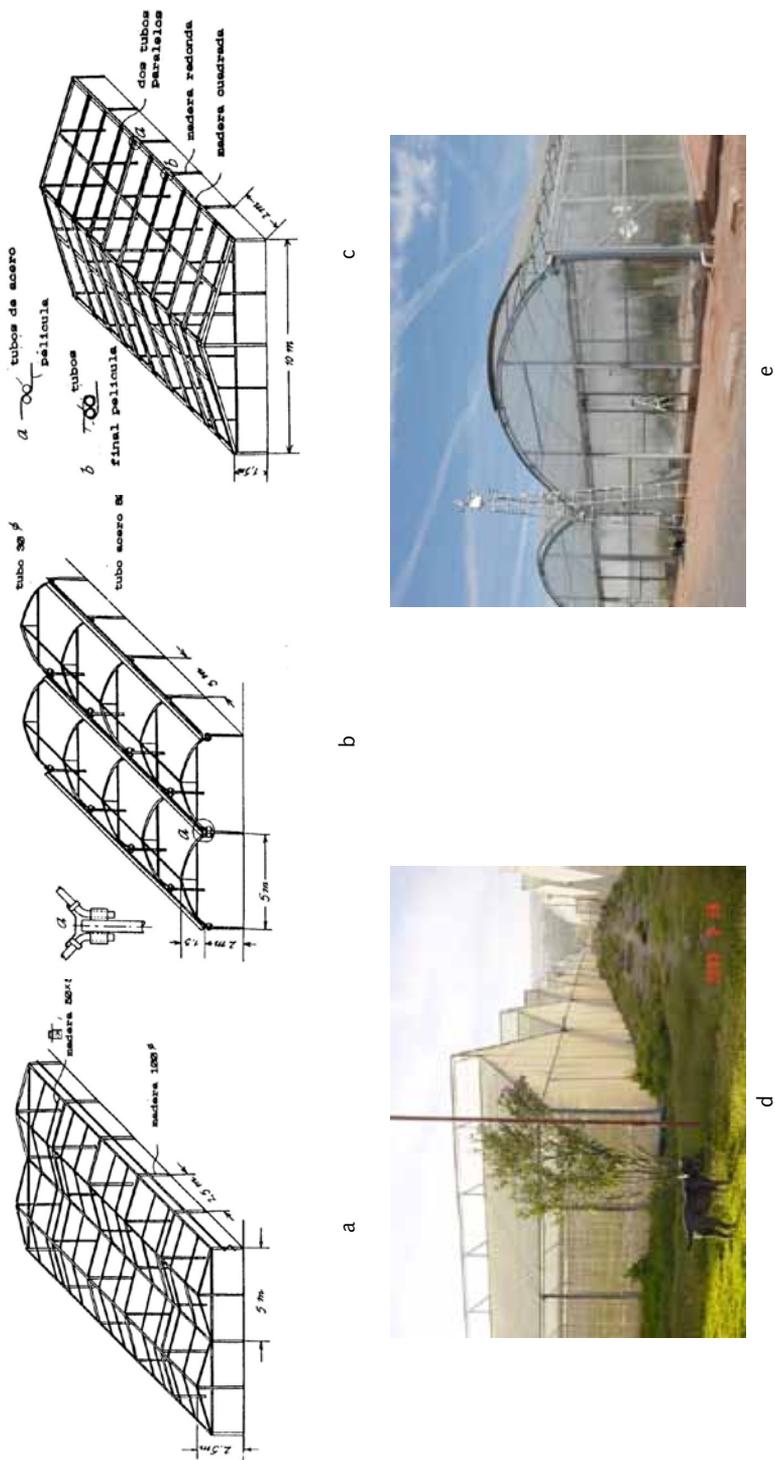


Figura 1. a) Invernadero artesano de estructura de madera, b) Invernadero multinave de estructura metálica ligera y c) Invernadero artesano mixto de madera y acero (Baudoin *et al.*, 2002). d) Invernadero artesano multinave con ventilación cenital y e) Invernadero metálico de techo curvo y ventanas basculantes.

El control del clima de los invernaderos de plástico.
Un enfoque actualizado

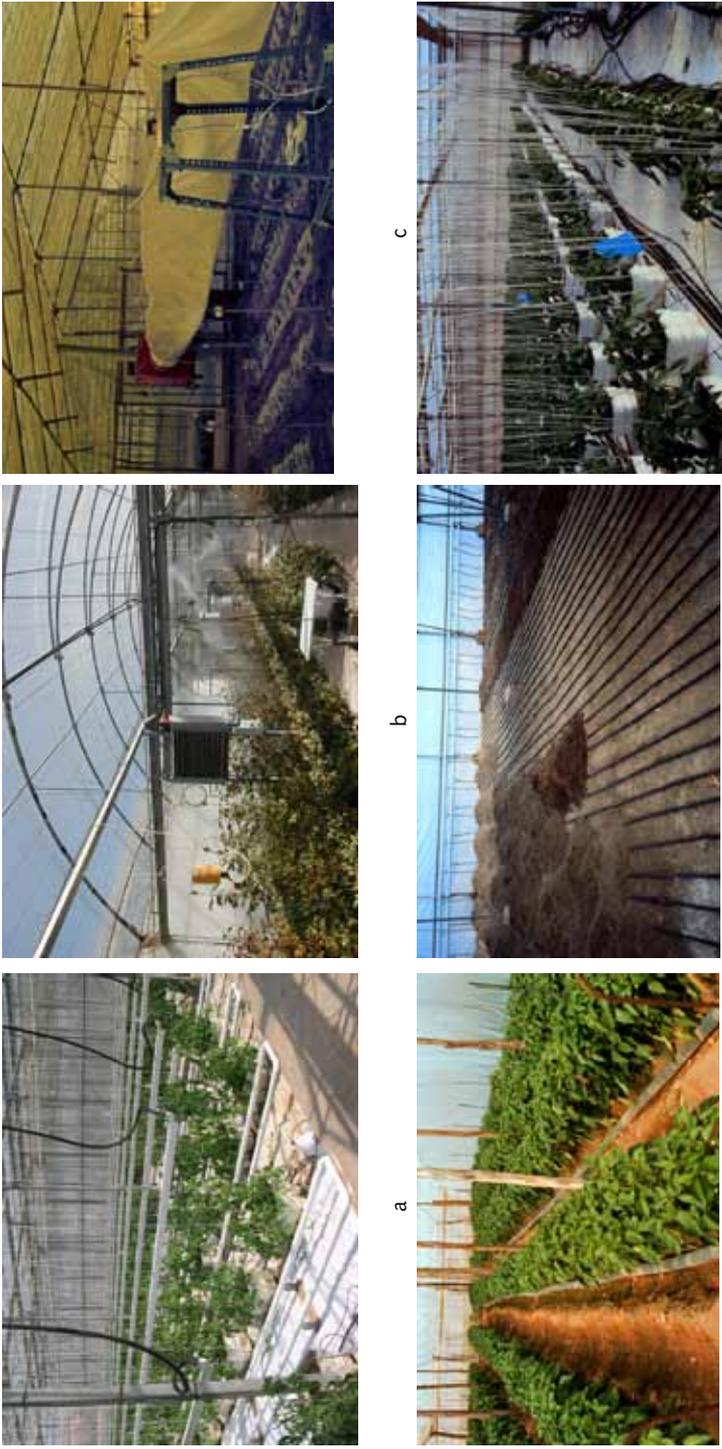


Figura 3. a) Calefacción por tubos metálicos junto al suelo y móviles junto al cultivo; b) Aerotermo de salida libre; c) Generador de aire caliente con manga distribuidora en posición baja; d) Calefacción por mangas sobre el suelo con agua templada; e) Preparación de calefacción por suelo radiante; y f) Calefacción por tubos de polipropileno sobre el suelo.

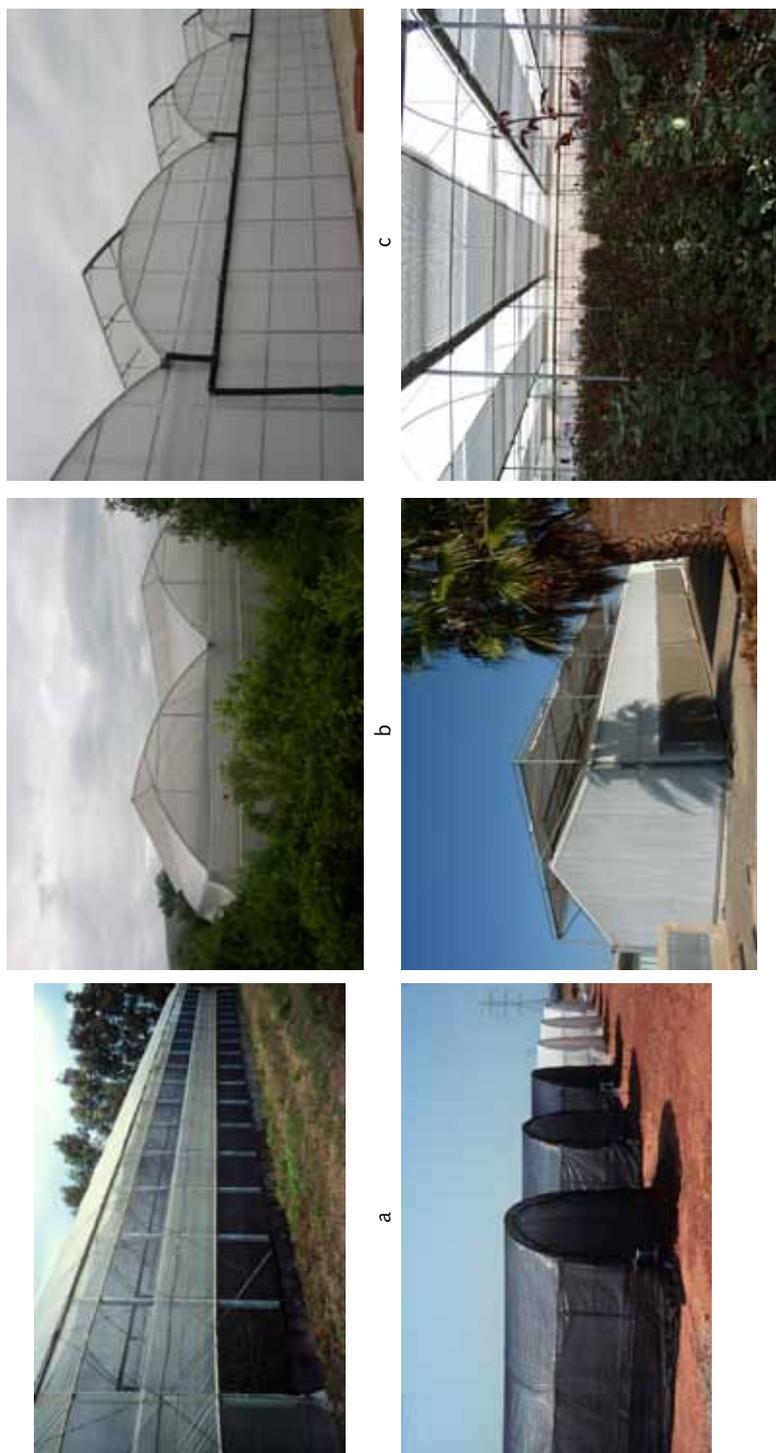


Figura 4. a) Ventilación natural con mallas en las ventanas; b) Ventanas laterales y cenitales con malla; c) Sombreado con pintura de cal sobre el plástico; d) Mallas de sombreado exteriores; e) Sombreado externo; y f) Malla metalizada interior, medio plegada.



a) Nebulización fina de alta presión; b) Refrigeración evaporativa por panel húmedo; y c) Refrigeración evaporativa por panel húmedo. Extractores.

