

M. M. GONZÁLEZ-REAL y A. BAILLE

Área de Ingeniería Agroforestal

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
Universidad Politécnica de Cartagena

Correo electrónico:

mayla.gonreal@upct.es

alain.baille@upct.es

PARTE III

LA CLIMATIZACIÓN



Contenido de la Parte III

Material de lectura:

- *Unidad .1. Los sistemas de calefacción*
- *Unidad 2. Enriquecimiento en CO₂*
- *Unidad 3. Climatización estival*

Referencias

Aplicaciones Unidad 1

Aplicaciones Unidad 2

Aplicaciones Unidad 2

Cartagena, 2005



Ventilación cenital y extractores

Distribuidores de aire caliente con conductos plásticos



Paneles evaporantes (“cooling pad”)

PARTE III. UNIDAD 1

LOS SISTEMAS DE CALEFACCIÓN



La calefacción es imprescindible en los invernaderos de los países septentrionales, con inviernos muy fríos, y es aconsejable en los países mediterráneos, aunque no es estrictamente necesaria. La baja inercia térmica del invernadero y su elevado coeficiente de pérdidas térmicas, debido a la pequeña espesor de las paredes, implican que se debe aportar una atención

especial a la elección, al diseño y al manejo de esta función de climatización, con el objeto de minimizar los gastos de calefacción que, en algunos casos, pueden representar hasta 30 % de los costes totales de producción. Esta Unidad presenta los principales sistemas de calefacción que se utilizan en invernadero.

1- INTRODUCCIÓN

En esta Unidad se enfoca la problemática de la calefacción de los invernaderos, es decir, de un medio de climatización que permite actuar a la vez sobre la temperatura y la higrometría del aire. La calefacción constituye la parte más importante de las entradas energéticas de un invernadero y conlleva, a la vez, una inversión y un coste de funcionamiento que pueden ser relativamente elevados. Se presentan primero los sistemas de uso corriente en invernadero, las características energéticas de los cambiadores de calor, al igual que su modo de acción (conducción, convección y convección/radiación) y la influencia que ejercen sobre el clima interno. Finalmente, se hace hincapié en la importancia que tiene el diseño y el manejo del sistema de calefacción, puesto que van determinar la eficiencia de los recursos energéticos disponibles (combustibles, energía solar, fuentes geotérmicas, etc.) y de los equipamientos utilizados (caldera y emisores de calor).



Vista 1. La baja inercia térmica del invernadero y su elevado coeficiente de pérdidas térmicas, debido a la pequeña espesor de las paredes, implican que se debe aportar una atención especial a la elección, diseño y manejo de esta función de climatización, con el objeto de minimizar los gastos de calefacción que, en algunos casos, pueden representar hasta 30 % de los costes totales de producción.

El desarrollo de los sistemas de climatización ha abierto la posibilidad de integrar un amplio abanico de herramientas (calefacción, enriquecimiento carbónico, pantallas de sombreado y térmicas, nebulización, control del fotoperiodo, etc.) que permiten al agricultor gestionar las variables que determinan el clima bajo invernadero (temperatura, humedad, CO₂, etc.) de manera más racional. Hasta ahora, el control de estas variables se ha basado en mantener un nivel fijo, previamente definido, de consignas climáticas. Actualmente, se tiende cada vez más a integrar la reacción a corto plazo del cultivo respecto al clima, con el fin de generar el juego de consignas climáticas que más se adapte a las necesidades de crecimiento y desarrollo del cultivo. En este aspecto, el control de la temperatura y de la humedad, por medio de la calefacción, de la ventilación y de los sistemas de enfriamiento por evaporación, es el soporte principal de la estrategia climática del productor

Se distinguen generalmente tres modos principales de calefacción (González-Real y Baille, 1998), que se van a detallar en los apartados siguientes:

- Calefacción por convección (aire pulsado).
- Calefacción por conducción en el suelo (o sustrato).
- Calefacción por convección-radiación.

2- Los sistemas de calefacción por convección

Los sistemas de calefacción por convección utilizan generadores de aire caliente. Su coste de inversión es moderado, su instalación es fácil y el tiempo de respuesta de este tipo de aparatos es relativamente corto. Además, ofrecen la ventaja de poder disminuir la humedad relativa del aire en período nocturno, excepto en el caso de generadores a inyección directa. Entre los inconvenientes, cabe resaltar que inducen fuertes gradientes térmicos. El aire caliente tiende a acumularse cerca de las paredes del techo, lo que conlleva un aumento sensible de las pérdidas térmicas del invernadero (González-Real y col., 1983c-d). Es ésta la razón por la que suelen equiparse con conductos de PE perforados (o politubos) para facilitar la distribución del aire caliente en las inmediaciones de la vegetación. En lo que sigue, abordaremos los aspectos relativos a las características energéticas de estos cambiadores.

En invernadero se utilizan dos tipos de calefacción por convección:

2.1- SISTEMAS CON CAMBIADOR DE CALOR

- Los aerotermos

Los aerotermos están compuestos por dos unidades funcionales:

- Un cambiador de calor que comporta una red de tubos metálicos, generalmente con aletas.
- Un ventilador.

El agua caliente, que proviene de una caldera, llega al interior de los tubos y un ventilador pulsa el aire del invernadero entre los tubos del cambiador calentándose antes de pasar de nuevo al invernadero.

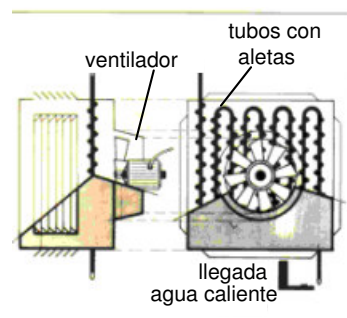


Figura 1. Aerotermo clásico.

Los aerotermos clásicos (Figura 1), de concepción más antigua, funcionan con niveles de temperatura de agua relativamente elevados (entre 60 y 100°C). Los aerotermos "baja temperatura" (Figuras 2, 3 y 4), de concepción más reciente, están dotados de un cambiador de calor cuya superficie de intercambio es superior a la de los aerotermos clásicos, lo que explica que funcionen con niveles de temperatura de agua mucho más bajos, en general inferiores a 60 °C.

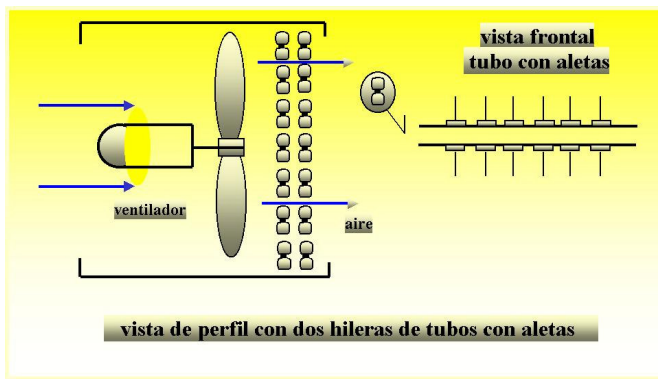


Figura 2. Esquema de un aerotermo baja temperatura con dos hileras de tubos con aletas.



Figura 3. Aerotermo baja temperatura con toma de aire vertical (arriba) y toma de aire horizontal (abajo).



Figura 4. Vista de la ubicación de un aerotermo en invernadero.

Entre las informaciones que se pueden deducir de los datos técnicos que proporcionan los fabricantes, cabe destacar la relación entre el flujo total disipado por el cambiador (ϕ_{cb}, W) y el caudal del agua para diferentes valores de la diferencia de temperatura entre el agua y el aire ($T_{ag}-T_a$). La Figura 5 muestra un ejemplo de este tipo de estas relaciones para un aerotermo baja temperatura, con una superficie total de intercambio de unos 20 m². Puede observarse que el flujo total disipado alcanza un nivel de meseta a partir de un caudal de agua de unos 0.7 kg s⁻¹. Este límite debe de tenerse en cuenta a la hora de dimensionar el sistema de calefacción ya que un aumento del caudal, en este caso, por encima de 0.7 kg s⁻¹, no tendrá repercusiones sensibles en el flujo total disipado.

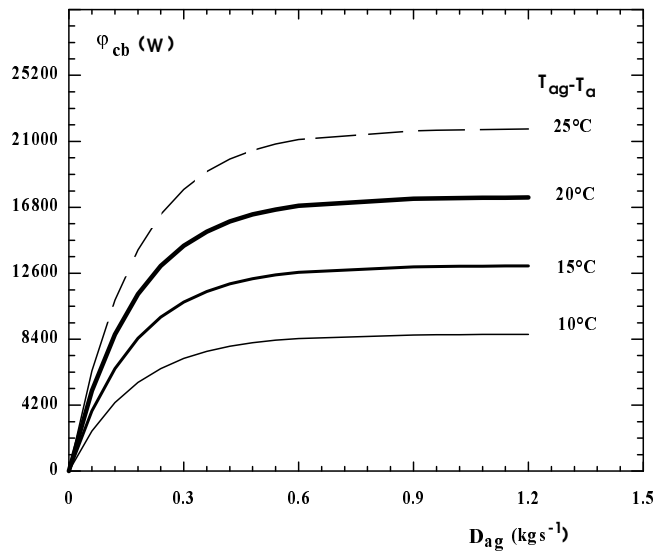


Figura 5. Flujo energético (Φ_{cb} en W) disipado por un aerotermo (superficie de intercambio $\approx 20 \text{ m}^2$) en función del caudal del agua (D_{ag}) y de la diferencia de temperatura entre el agua (T_{ag}) y el aire del invernadero (T_a).

- Los generadores de aire caliente

Los generadores de aire caliente (Figura 6) están integrados por tres unidades funcionales:

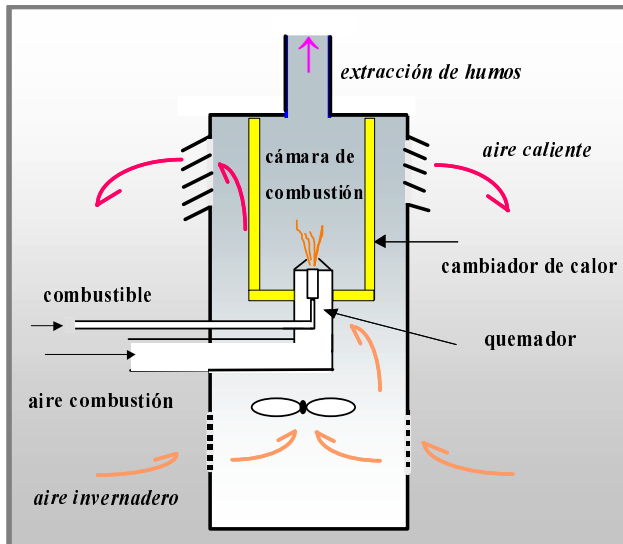


Figura 6. Esquema de un generador de aire caliente con cambiador de calor y vista del generador (arriba a la derecha) con la chimenea de extracción de gases de combustión (abajo a la derecha).

- Una cámara de combustión, generalmente alimentada con fuel-oil.
- Un cambiador de calor con una red de finos tubos metálicos.
- Un ventilador para pulsar el aire del invernadero entre los tubos del cambiador.

En este caso, debido a que los gases de combustión contienen generalmente derivados de azufre, el cambiador separa el aire caliente de los gases de combustión (Figura 6). Los derivados de azufre son fitotóxicos y no pueden inyectarse directamente en el invernadero, por lo que deben de extraerse hacia el exterior a través de una chimenea.

2.2- SISTEMAS SIN CAMBIADOR DE CALOR

En los sistemas sin cambiador de calor, el elemento calefactor utiliza combustibles, tipo gas natural o propano, cuyo contenido en azufre es muy bajo (Figuras 7 y 8). *En teoría, si la combustión fuese completa*, los productos que derivan de ésta serían solamente *el vapor de agua y el CO₂*, por lo que podrían inyectarse sin peligro alguno directamente en el invernadero, siendo este modo de inyección de CO₂ un método económico de enriquecimiento carbónico. Sin embargo, en la práctica (*combustión incompleta*), la inyección de CO₂ plantea el problema de la fitotoxicidad que conllevan los subproductos de la combustión. Los riesgos esenciales provienen:

- Del *monóxido de carbono* que se genera ya sea por combustión incompleta y/o debido a la puesta en marcha y paradas repetidas del quemador.
- De los *óxidos de nitrógeno* (NO, NO₂) que se forman en la atmósfera bajo el efecto de la temperatura de la llama.

Un aspecto importante a resaltar es que generan cantidades importantes *de vapor de agua* (≈ 1.6 kg por un m³ de gas). Esto explica que, en período de elevada demanda energética, la concentración de vapor de agua del aire del invernadero pueda alcanzar niveles muy elevados. Por consiguiente, estos aparatos deben dimensionarse de manera adecuada para evitar problemas fitosanitarios, inducidos por valores elevados de la higrometría del aire en período nocturno.

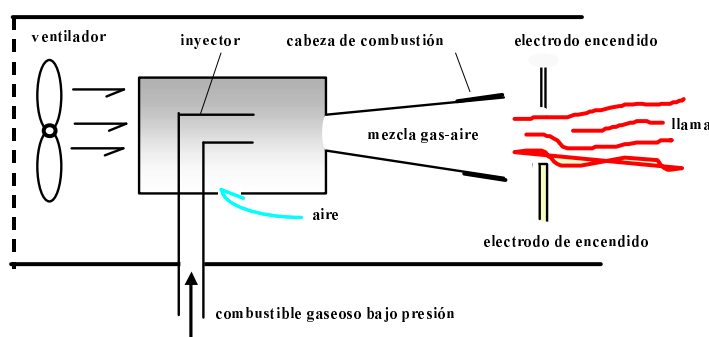


Figura 7. Esquema de un generador con inyección directa.

El nivel de producción de CO₂ representa, aproximadamente, 2 kg por m³ de gas. Desde un punto de vista práctico, los aparatos dotados con combustión directa son hoy día un medio económico para enriquecer la atmósfera en CO₂. No obstante, la formación de CO₂ tiene lugar esencialmente en período nocturno, por lo que no es concomitante con el proceso de absorción CO₂ del dosel vegetal. Esto implica que sea preciso también vigilar la concentración de CO₂, para evitar niveles elevados, y la concentración de monóxido de carbono con el objeto de evitar niveles tóxicos (González-Real y col., 1998). En la Figura 9 se puede observar el nivel de CO₂ que se establece bajo un invernadero estanco cuando el consumo energético es elevado, llegando a unos 5000 ppm para un consumo energético de 200 W m⁻². También se puede observar la caída brusca de la concentración de CO₂, que tiene lugar a la salida del sol, cuando se para el sistema de calefacción.

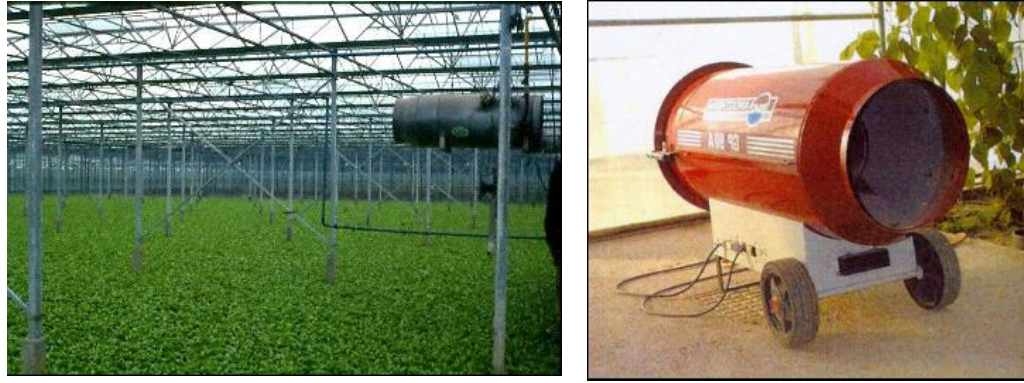


Figura 8. Vistas de generadores con inyección directa.

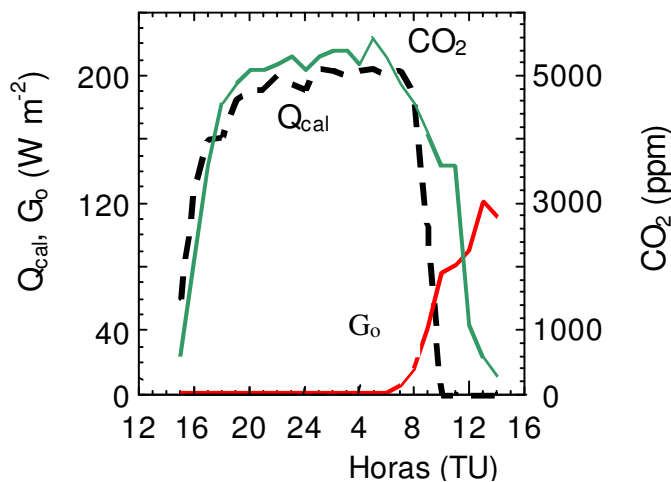


Figura 9. Evolución del consumo energético de la calefacción (Q_{cal}) y de la concentración de CO_2 del aire del invernadero en un sistema de calefacción con inyección de gases de combustión en el invernadero. G_o es la radiación solar global al exterior del invernadero. González-Real y col., 1998.

2.3- RED DE DISTRIBUCIÓN DE AIRE CALIENTE BAJO INVERNADERO

Los aerotermos suelen equiparse con conductos de PE perforados (conocidos como politubos) que están dotados de orificios calibrados para facilitar la distribución del aire caliente cerca de la vegetación (Figura 10).

El aire es forzado a través de los orificios bajo la presión que mantiene el ventilador dentro del politubo. En la práctica, se perforan dos hileras de orificios por conducto. La superficie total de los orificios de un politubo representa entre 1,2 y 2,0 veces su sección. El tamaño y la distribución de los orificios tienen que diseñarse de tal forma que la distribución del aire dentro del invernadero sea uniforme. En este caso, el flujo del aire en los orificios situados al principio del politubo tiene que ser, aproximadamente, la mitad del flujo correspondiente a los orificios situados al final. Este sistema ha tenido bastante éxito debido a su coste de inversión moderado.



Figura 10. Ejemplos de sistemas de distribución del aire caliente en el interior del invernadero

3- LOS SISTEMAS DE CALEFACCIÓN POR CONDUCCIÓN. CALEFACCIÓN ENTERRADA EN EL SUELO O SUSTRATO

La influencia de la calefacción del suelo sobre la actividad radicular, al igual que su repercusión en la producción de un gran número de especies cultivadas, se conoce desde hace tiempo. Sin embargo, esta práctica ha comenzado a desarrollarse a partir de la década de los 70 debido, en parte, a la posibilidad de recuperar, en áreas situadas en torno a industrias o centrales nucleares, aguas residuales a baja temperatura que pueden utilizarse en la calefacción del suelo ya que ésta no exige niveles térmicos muy elevados. Además, el desarrollo que han conocido las aplicaciones agrícolas de los materiales plásticos ha contribuido también a una expansión sensible de esta técnica, con la aparición de cambiadores de calor (por ejemplo, tubos de polietileno baja densidad) que exigen una inversión inicial inferior a la de los cambiadores metálicos.

Desde un punto de vista fisiológico, el interés de este sistema de calefacción deriva de la influencia que ejerce la temperatura de la zona radicular en un gran número de procesos. El uso racional de la calefacción de suelo genera, comparada con los sistemas de calefacción tradicionales, un equilibrio diferente en el régimen de temperaturas aire/suelo que tiene repercusiones positivas en la actividad de las raíces (absorción hidromineral y respiración radicular) y en las relaciones entre el sistema radicular y la parte aérea. Por ejemplo, el proceso de fotosíntesis, el reparto de asimilados entre los diferentes órganos de la planta, al igual que el proceso de desarrollo, son sensibles a las condiciones térmicas que reinan en las capas del suelo o sustrato cercanas a las raíces.

Desde un punto de vista físico, uno de los objetivos de este tipo de calefacción es utilizar, de manera indirecta, el suelo como un cambiador de calor, debido a que la

superficie de intercambio que presenta con el aire del invernadero es superior a la de los sistemas de calefacción aéreos tradicionales.

La calefacción de suelo se utiliza poco hoy día. Esto es debido a que exige mucha mano obra y maquinaria y a que dificulta los trabajos del suelo cuando los tubos no están enterrados a una profundidad importante. Además, el desarrollo que han experimentado los cultivos sin suelo ha impulsado un desarrollo importante de la calefacción de sustrato o de la calefacción localizada en banquetas de cultivo.

3.1- CALEFACCIÓN ENTERRADA EN EL SUELO

El principio de la calefacción enterrada en el suelo (Figura 11) es sencillo. Consiste en *hacer circular el agua al interior de una red de tubos, generalmente de un diámetro entre 15 y 30 mm, enterrados a profundidades que varían, en función de la temperatura del agua, entre unos 20 y 50 cm.*

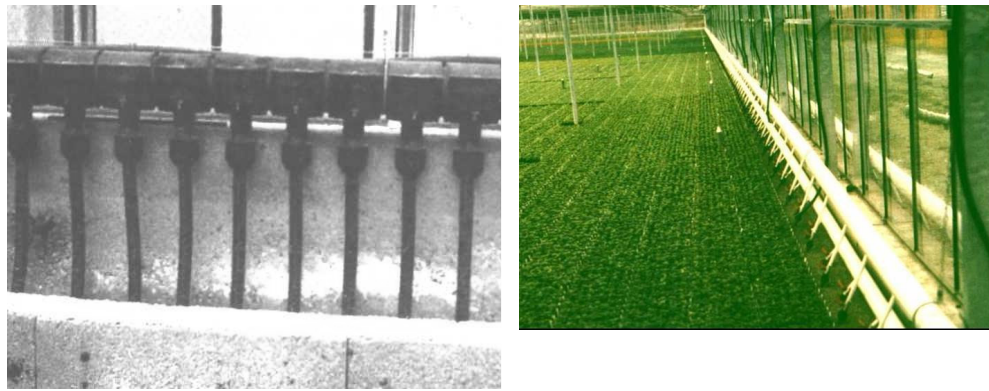


Figura 11. Vistas de la entrada de los tubos de calefacción enterrados en el suelo.

La transmisión de calor entre la pared del tubo y el suelo adyacente se efectúa por conducción. Este sistema de calefacción exige un diseño correcto de la profundidad y de la distancia entre los cambiadores, con el fin de evitar gradientes térmicos importantes entre las capas del suelo. La profundidad a la que se entierran los tubos depende, en parte, del desarrollo radicular de la especie cultivada. En la práctica, los *cambiadores* suelen *enterrarse a una profundidad equivalente a la mitad del espesor de la capa de suelo que se desea calentar y con una distancia entre cambiadores aproximadamente igual a la profundidad.*

La temperatura del agua en el interior de los tubos es generalmente inferior a 40°C. Esto evita que el suelo se deseeque y que se formen, como consecuencia, capas aislantes que limitarán la conducción del calor. Cuando los cambiadores se dimensionan de forma correcta, *el flujo total disipado suele ser inferior a 60 W m⁻² de suelo, habida cuenta de las exigencias en temperatura de las raíces de la mayor parte de especies cultivadas en invernadero.*

3.2- CALEFACCIÓN DE SUSTRATO EN CULTIVOS FUERA DE SUELO

La distribución de los cambiadores de calor en cultivos fuera de suelo presenta generalmente dos o tres configuraciones (Figura 12). Los tubos (polietileno alta densidad o polipropileno, de diámetro en torno a unos 25 mm), suelen disponerse ya sea bajo el sustrato, al interior del sustrato y/o sobre su superficie.



Figura 12. Ejemplos de sistemas de calefacción de sustrato en cultivos fuera de suelo

La densidad de la red de cambiadores de calor depende del objetivo planteado, es decir, de la temperatura de consigna que se desea fijar en el sustrato que depende de las exigencias térmicas de la especie cultivada. Además, la temperatura de sustrato varía en función de la temperatura del aire a la que está sometida la parte aérea del cultivo. En la práctica, la gama de temperatura a la que se mantiene el sustrato varía entre unos 10 y 25°C (por ejemplo: $\approx 14^\circ\text{C}$ el calabacín, ≈ 16 a 18°C el tomate, $\approx 18^\circ\text{C}$ el melón y de 18 - 20°C el pepino) y la gama de temperatura del agua varía según que los tubos estén situados bajo el sustrato y/o sobre el sustrato (Figura 13).

Cuando los tubos se sitúan bajo el sustrato (Figura 13a), la temperatura del agua está comprendida, según la especie cultivada, entre 20 y 30 °C. En este caso, la potencia instalada de la red de cambiadores varía de 20 a 30 W m^{-2} de suelo. Cuando los tubos se sitúan sobre la superficie del sustrato (Figura 13b) se puede utilizar una densidad superior de tubos y también niveles de temperatura de agua más elevados (entre 30 y 35 °C). La potencia instalada varía, en función la densidad de los tubos, entre unos 40 y 60 W m^{-2} . En este último caso, solamente una pequeña parte de la energía aportada por los tubos se disipa por conducción hacia el sustrato.

Puede observarse (Figura 13) que, *en los diferentes casos estudiados, la potencia instalada es inferior a 60 W m^{-2} de suelo*. Esto explica que *la red de cambiadores de calor localizados en el suelo o en el sustrato se utilice sobre todo como una calefacción de apoyo*. Este sistema permite mantener la zona radicular dentro de la gama de temperatura deseada y, al mismo tiempo, elevar la temperatura del aire de unos pocos grados. Sin embargo, los niveles de consigna de temperatura de aire, corrientemente practicados bajo invernadero, exigen que se asocie con un sistema de calefacción aéreo (por ejemplo, aerotermos) cuando las necesidades energéticas del invernadero son más elevadas.

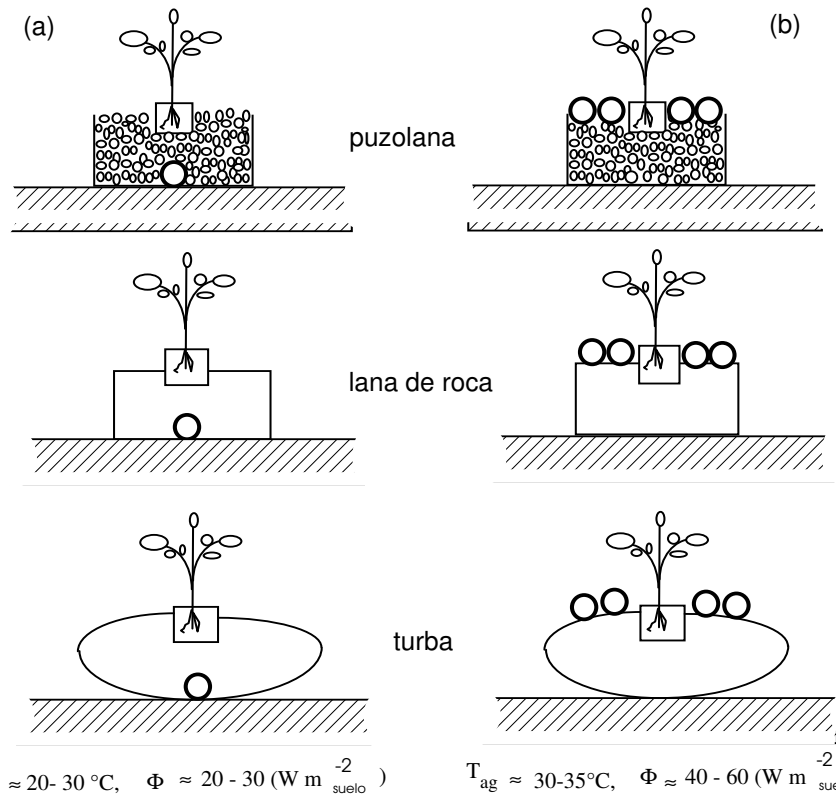


Figura 13. Temperatura del agua t_{ag} y potencia instalada (Φ) en los sistemas de calefacción de sustrato con tubos de PE o de polipropileno. González-Real, 1998.

4- LOS SISTEMAS DE CALEFACCIÓN POR CONVECCIÓN/RADIACIÓN

La calefacción por convección/radiación integra aquellos sistemas que comportan dos unidades funcionales:

- Una fuente de calor con una caldera central situada, en general, fuera del invernadero.
- Una red de distribución de cambiadores de calor.

en este caso, la red de distribución de calor es aérea. Está formada por superficies cilíndricas, ya sea por tubos de acero, de aluminio o bien de plástico por los que circula el agua a temperatura superior a la ambiente (Figura 14).

La cantidad de energía que se transfiere por convección y por radiación alcanza, aproximadamente, el mismo orden de magnitud, lo que justifica el nombre de este tipo de calefacción (convección/radiación). No obstante, los intercambios por convección y radiación no ejercen la misma influencia sobre el nivel al que se establece la temperatura de las superficies del invernadero (pared de cubierta, dosel vegetal, suelo), por lo que es necesario evaluar de manera correcta la cantidad de energía que se transfiere por estos dos modos.



Figura 14. Ejemplos de sistemas de calefacción por convección/radiación con tubos aéreos.

La localización de los tubos al interior del invernadero va a determinar, en gran parte, los perfiles de temperatura del aire al igual que las pérdidas térmicas totales. Dado que el objetivo principal de un sistema de calefacción es mantener la temperatura de las plantas a los niveles que exige la especie, con un costo mínimo, la tendencia que se observa desde hace unos años es localizar la red de cambiadores de calor lo más cerca posible de la vegetación. En efecto, la localización de la red de cambiadores cerca de la vegetación mejora la eficiencia del sistema de calefacción y permite además utilizar niveles más bajos de temperatura de agua. Sin embargo, el uso de agua a baja temperatura se consigue en detrimento de la cantidad de energía total disipada por la red de distribución. Esto explica que la disminución de la temperatura del agua tenga que compensarse ya sea con una superficie de intercambio superior o bien mejorando el coeficiente de intercambio de los elementos de la red (uso de materiales a elevada conductividad, ver Cuadro 1).

Cuadro 1. Coeficiente global de transferencia de calor (h'_{cb} , expresado por metro lineal de tubo) de diferentes cambiadores utilizados bajo invernadero. λ es la conductividad térmica del material y d el diámetro exterior.

Tipo de cambiador de calor	T° máxi	λ (W m ⁻¹ K ⁻¹)	d (m)	h'_{cb} (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Tubos de acero bajo cubierta y bajo mesas de cultivo	120	58	0.060	2.69
Tubos de acero	120	58	0.022-0.028	1.25
Tubos de aluminio con aletas	120	221	0.018-0.022	1.0-2.5
Tubos corrugados de polipropileno sobre tela metálica en mesas de cultivo	120	0.22	0.025	1.33
Tubos corrugados de polipropileno sobre fibrocemento en mesas de cultivo	120	0.22-0.30	0.025	0.94
Tubos corrugados de polipropileno	120	0.22-0.30	0.025	1.0
Tubos PE	50	0.45	0.027	0.75
Tubos PE	50	0.45	0.032	1.0

Una de las *desventajas que presentan estos sistemas es su inercia térmica* relativamente importante, sobre todo en las redes dotadas con tubos de gran diámetro y un elevado contenido de agua. Esto *puede ser un inconveniente cuando se trata de intervenir rápidamente sobre la temperatura* para disminuir, por ejemplo, la humedad del aire.

5- CALEFACCIÓN LOCALIZADA SOBRE EL SUELO O EN BANQUETAS DE CULTIVO

Los cambiadores de calor de tipo placas o tubos de plástico se utilizan corrientemente bajo invernadero, ubicados sobre banquetas de cultivo o bien sobre el suelo (Figura 15). El nivel de la temperatura del agua que circula por el interior de los cambiadores es, en general, inferior a 50 °C y el cociente entre la superficie del cambiador y la superficie de suelo varía, en función de las necesidades energéticas del invernadero, entre un 40 % y un 60%. Los valores experimentales de los coeficientes de intercambio (h_{cb}) de este tipo de cambiadores son del orden de 10-14 W m⁻² K⁻¹, cuando se expresan por metro cuadrado de cambiador (Figura 15a).

Cabe resaltar que, con esta configuración de los cambiadores, la mayor parte de la potencia se disipa hacia el aire por convección y hacia las superficies del invernadero por convección y radiación (Figura 15b).

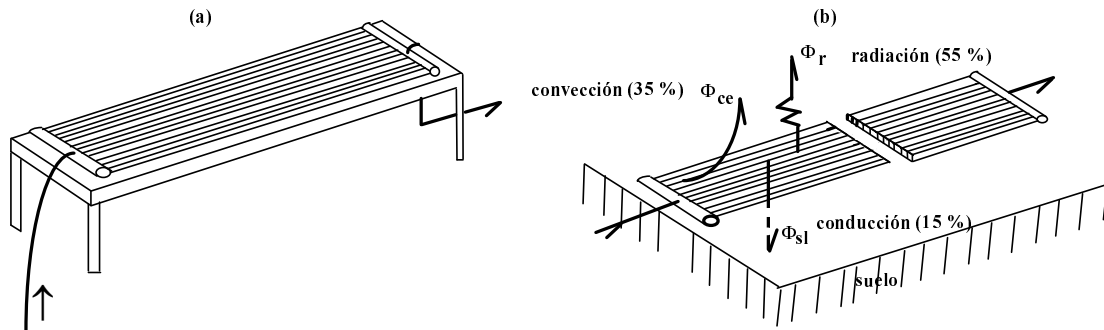


Figura 15. Cambiadores de calor tipo placas o tubos de plástico dispuestos directamente sobre (a) banquetas de cultivo; (b) sobre el suelo. Reparto del flujo total disipado por el cambiador ($\Phi_{cb} = (\Phi_{ce} + \Phi_{re} + \Phi_{sl})$): por convección (Φ_{ce}), por radiación (Φ_{re}) y por conducción (Φ_{sl}).

En la práctica; la potencia disipada hacia el suelo viene determinada por la resistencia de contacto que se establece entre la placa o el tubo y el suelo. La Figura 16 da dos ejemplos de calefacción localizada en mesas de cultivo.



Figura 16. Sistemas de calefacción para banquetas de cultivo (plantas en macetas).

6- INFLUENCIA DEL MODO DE CALEFACCIÓN EN EL GRADIENTE DE TEMPERATURA

A la hora de elegir el sistema de calefacción, son criterios de calidad:

- La distribución espacial de la temperatura al interior del invernadero, que depende del sistema de calefacción y de la ubicación de los cambiadores de calor.
- Los valores de la temperatura de superficie foliar que se alcanzan para una determinada temperatura de consigna de aire.

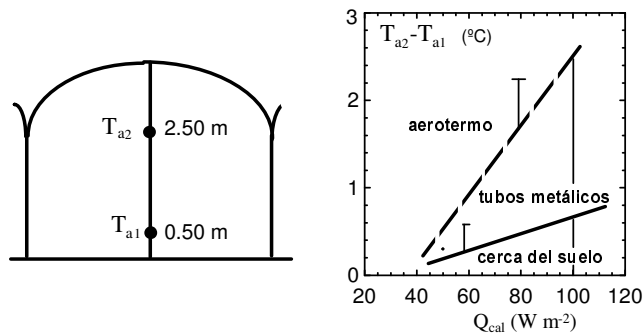


Figura 17. Gradiente de temperatura entre 2.50 m y 0.50 m ($T_{as2} - T_{as1}$) en función del consumo de calefacción, Q_{cal} , para dos sistemas de calefacción (aerotermino y tubos metálicos cerca del suelo). González-Real y col., 1983c-d.

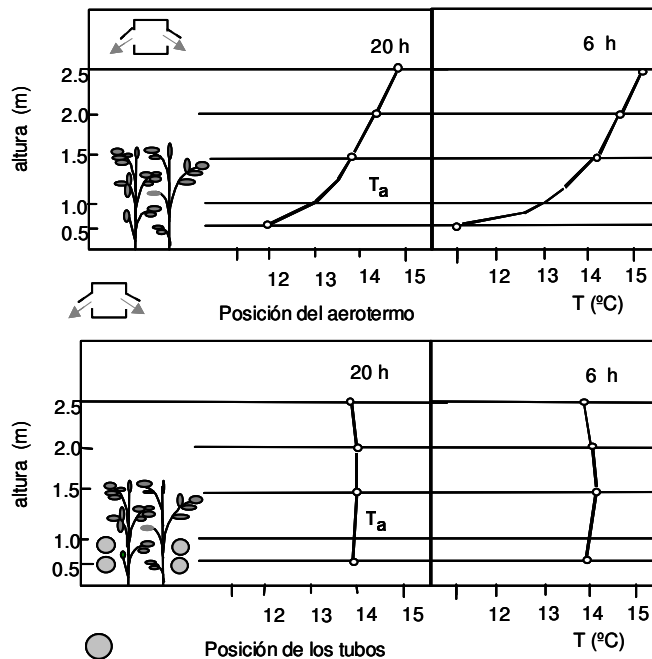


Figura 18. Evolución del perfil vertical de temperatura del aire (T_a) bajo invernadero con un sistema de calefacción por aeroterminos y por tubos metálicos localizados cerca de la vegetación. González-Real y col., 1983c-d.

Como puede observarse en las Figuras 17 y 18, el sistema de calefacción tiene una influencia determinante sobre la homogeneidad vertical de la temperatura. La calefacción por convección induce gradientes térmicos importantes dentro del invernadero. El aire caliente tiende a acumularse bajo cumbre, lo que redonda en un aumento de las pérdidas térmicas. Esto explica que los sistemas por convección se utilicen asociados a politubos de PE perforados para facilitar la distribución del aire caliente en las inmediaciones de la vegetación y reducir el consumo de calefacción.

7- TRANSFERENCIA DE ENERGÍA ENTRE EL SISTEMA DE CALEFACCIÓN Y LOS ELEMENTOS DEL INVERNADERO

- Calefacción por convección (Figura 19):

La energía que disipa un sistema de calefacción por convección (en el ejemplo de la Figura 19, $150 W/m^2$) se utiliza en su totalidad para calentar el aire que, a su vez, calienta por convección las superficies del invernadero (pared de cubierta, plantas y suelo). Esto explica que, con estos sistemas, la temperatura que alcanza la superficie foliar sea inferior a la del aire, situación menos frecuente en los sistemas por tubos aéreos que intercambian energía por radiación con las superficies que le rodean. En el ejemplo de la Figura 19, con un cultivo desarrollado, un 18 % se transfiere por

convección hacia las plantas (27 W/m^2) y solamente una pequeña parte hacia el suelo (unos 2 W/m^2). La energía que recuperan las plantas por convección es utilizada en parte en el proceso de transpiración (aproximadamente, un 22 %).

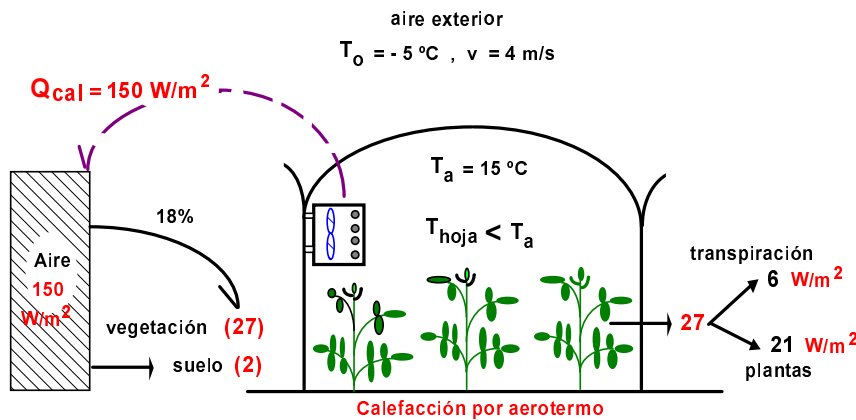


Figura 19. Diferentes modos de transferencia de energía entre un sistema de calefacción por convección y las diferentes componentes del invernadero.

- Calefacción por convección/radiación bajo cubierta (Figura 20):

En este sistema de calefacción, los tubos intercambian energía (a) por radiación con las superficies del invernadero (pared de cubierta, suelo y plantas) y (b) por convección con el aire. En el ejemplo que se da en la Figura 20, las plantas reciben aproximadamente un 17 % (37 W/m^2) de la energía suministrada por el sistema de calefacción (en este ejemplo, 220 W m^{-2}). Un 20 % (8 W/m^2) de la energía total que reciben las plantas es utilizada en el proceso de transpiración. La calefacción por convección/radiación induce temperaturas de hojas similares a las del aire.

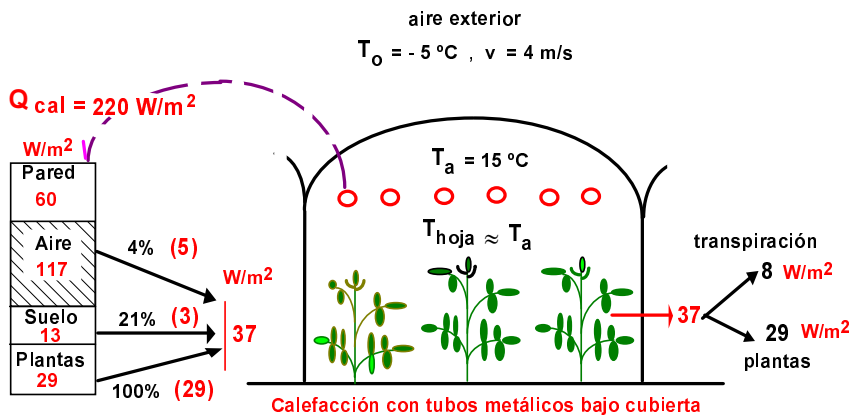


Figura 20. Diferentes modos de transferencia de energía entre un sistema de calefacción por tubos aéreos bajo cubierta y las diferentes componentes del invernadero.

