

MÉTODOS DE PROTECCIÓN ACTIVOS

Los métodos de protección activos incluyen actividades que se realizan durante una noche de helada para mitigar los efectos de las temperaturas bajo cero. Estos métodos incluyen:

1. Estufas
2. Ventiladores
3. Helicópteros
4. Aspersores
5. Riego por superficie
6. Aislamiento con espumas
7. Nebulizadores
8. Combinaciones de métodos activos

El coste de cada método varía dependiendo de la disponibilidad local y de los precios. Por ejemplo, en la Tabla 7.1 se indica el intervalo de los costes para los sistemas normalmente utilizados. Sin embargo, los beneficios dependen, algunas veces, de los múltiples usos del sistema (e.g. Los aspersores también pueden utilizarse para el riego). El coste y los beneficios de seleccionar un sistema en particular se discuten en el Volumen II, Capítulo 2 en la “Evaluación económica de los métodos de protección.” En este capítulo se discuten la teoría del funcionamiento, el manejo correcto y las ventajas e inconvenientes de cada uno de los métodos activos de protección.

TABLA 7.1

Número de equipos de protección necesarios por hectárea e intervalo de costes estimados en dólares US por hectárea para el año 2000 para la instalación y funcionamiento en plantaciones de frutales de hoja caduca y en viñedos en el estado de Washington (EE.UU.) (R.G. Evans, comunicación personal)

METODO DE PROTECCION	NUM. POR Ha	INTERVALO DEL COSTE DE INSTALACION	COSTE DE FUNCIONAMIENTO
Estufas usadas de petróleo con chimenea de retorno	99	988 a 1 112 \$ ha ⁻¹	93,08 \$ h ⁻¹
Estufas nuevas de petróleo con chimenea de retorno	99	2 471 a 2 965 \$ ha ⁻¹	93,08 \$ h ⁻¹
Estufas a presión con propano	153	6 178 a 9 884 \$ ha ⁻¹	103,98 \$ h ⁻¹
Aspersores sobre las plantas		2 224 a 2 965 \$ ha ⁻¹	4,10 \$ h ⁻¹
Aspersores bajo las plantas		2 224 a 3 459 \$ ha ⁻¹	4,25 \$ h ⁻¹
Micro-aspersores bajo las plantas		2 471 a 3 706 \$ ha ⁻¹	4,25 \$ h ⁻¹

LAS ESTUFAS

Un método para reemplazar las pérdidas de energía desde un cultivo, en una situación de helada, es la compensación con un uso masivo de combustible (sólido, líquido o gas) quemado en estufas de varios tipos. Dependiendo de la orientación relativa a las plantas, parte de la radiación es interceptada directamente por las diferentes partes de las plantas, lo que provoca un aumento de la temperatura de la planta. Además el aire, que es calentado por el fuego, es transportado por la convección libre y forzada, si fluye el viento o se utilizan en combinación con ventiladores, hacia las plantas y al aire dentro y por encima de la cubierta vegetal. Las condiciones meteorológicas que favorecen la eficiencia de este método son las condiciones de calma, sin viento o muy poco, y la presencia de una inversión fuerte.

Las estufas se han utilizado para proteger los cultivos de la congelación por los menos durante 2 000 años y los efectos y la metodología son bien conocidos. Generalmente, las estufas se agrupan en dos categorías. Hay estufas que aumentan la temperatura de los objetos de metal (e.g. estufas con chimenea) y están aquellas que funcionan como fuegos abiertos. La protección con estufas es técnicamente segura y los agricultores prefieren estufas hasta que los problemas de contaminación y el elevado coste de los combustibles con relación al valor del cultivo hacen el método demasiado caro para muchos cultivos. Ahora las estufas son principalmente utilizadas para complementar otros métodos durante eventos de heladas extremas y para cultivos de valor elevado. En esta sección, se discuten los siguientes tópicos:

- Teoría del funcionamiento
- Efectos del humo
- Requerimientos de las estufas
- Colocación de las estufas y manejo
- Estufas de combustible líquido
- Estufas de propano y de gas natural
- Estufas de combustible sólido
- Estufas portátiles

Teoría del funcionamiento

Las pérdidas de energía naturales desde un cultivo son más grandes que las ganancias durante una noche de helada y esto causa la caída de la temperatura. La energía se pierde principalmente por la radiación neta y las pérdidas son parcialmente reemplazadas por los flujos de calor sensible y de calor del suelo hacia la superficie (Figura 7.1). Si se produce condensación (i.e. rocío o escarcha), entonces el calor latente que se libera también puede reemplazar parte de las

pérdidas de energía. Las estufas proporcionan energía suplementaria (Q) para ayudar a reemplazar la pérdida neta (Figura 7.1). Si se añade al volumen del cultivo el calor suficiente de forma que se reemplacen todas las pérdidas, no caerá la temperatura. Sin embargo, hay ineficiencia en el funcionamiento de las estufas y, bajo algunas condiciones, se hace prohibitivo el coste de introducir la energía suficiente para compensar la ineficiencia del sistema. El diseño y manejo apropiados puede mejorar la eficiencia hasta el nivel donde el cultivo está protegido bajo la mayoría de las condiciones de las heladas de radiación. Sin embargo, cuando hay una pequeña inversión o ésta no se da y el viento está fluyendo, puede que las estufas no proporcionen una protección adecuada.

Las estufas proporcionan protección contra las heladas por la radiación directa hacia las plantas a su alrededor y al causar una mezcla convectiva del aire en la capa de inversión (Figura 7.2). La mayor parte de la energía de las estufas es liberada como gases calientes y por el aire calentado que principalmente calienta el aire por convección. La energía radiante de las estufas viaja directamente cerca de las plantas que están a la vista inmediata de las estufas. Sin embargo, dependiendo de la densidad de la cubierta vegetal de los cultivos y de su estructura, únicamente se intercepta un pequeño porcentaje de la energía radiante de las estufas de chimenea.

El requerimiento de energía para prevenir el daño durante una helada de radiación es aproximadamente igual a la pérdida de radiación neta (e.g. entre -90 W m^{-2} y -50 W m^{-2}), menos el flujo de calor sensible hacia abajo y el flujo de calor del suelo hacia arriba. Ambas densidades de flujo de calor varían dependiendo de las condiciones locales, pero es probable que de 20 a 40 W m^{-2} sean aportadas por cada fuente. Por ello, el requerimiento de energía para prevenir el daño por helada está en el intervalo de 10 a 50 W m^{-2} . La producción de energía de una estufa está normalmente en el intervalo de 140 a 280 W m^{-2} ; dependiendo del combustible, el ritmo de quemado y del número de estufas. En consecuencia, gran parte de la producción de energía de las estufas se pierde y no contribuye a calentar el aire o las plantas y la eficiencia, que se define como el requerimiento de energía dividido por la producción de energía, tiende a ser bajo. Sin embargo, un manejo adecuado puede aumentar la eficiencia de la energía suministrada por las estufas.

La temperatura del aire que sale de una estufa de chimenea está entre $635 \text{ }^\circ\text{C}$ y $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, por lo que el aire calentado menos denso ascenderá rápidamente después de dejar la estufa. Conforme el aire calentado asciende debido a la entrada del aire de alrededor más frío, a la expansión de las parcelas de aire calentado y a la radiación, se enfría rápidamente hasta que alcanza la altura en que el aire del ambiente tiene casi la misma temperatura. Entonces el aire se esparce, mezclándose con el resto del aire de la parte superior. Eventualmente, el aire mezclado se enfriará, se hará más denso

FIGURA 7.1

Plantación frutal en una caja imaginaria, donde los flujos de energía representados son la radiación neta (R_n), el flujo de calor sensible vertical y horizontal (H), el flujo de calor conductivo desde el suelo (G), calor latente (LE) y la energía añadida por el calentamiento (Q)

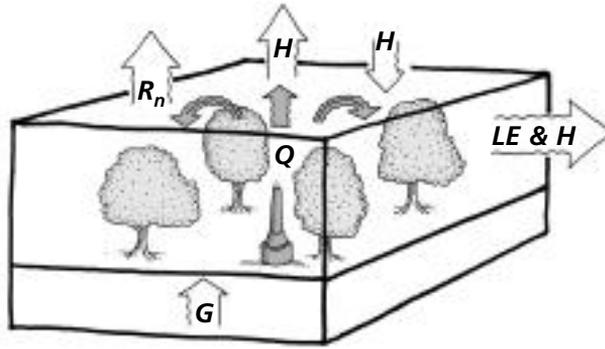
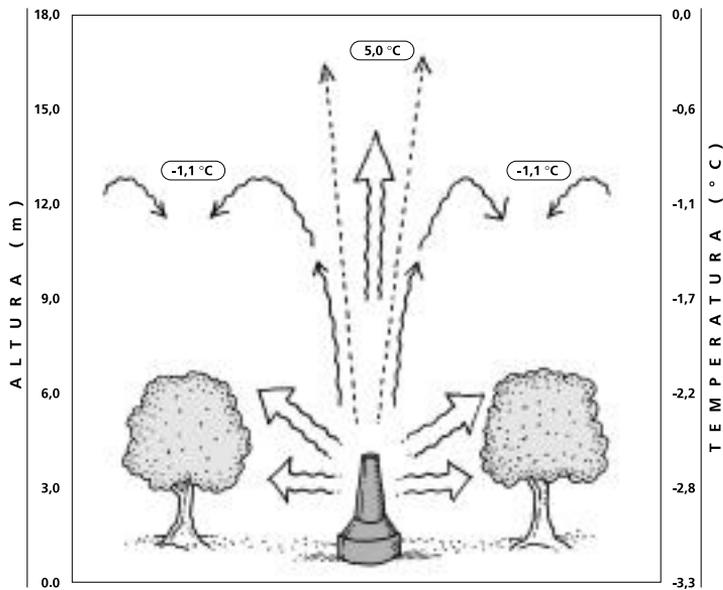


FIGURA 7.2

El aire caliente asciende y se enfría hasta casi la misma temperatura ambiente. Después se esparce y se enfría hasta que se hace más denso y descende. Esto crea un patrón de circulación



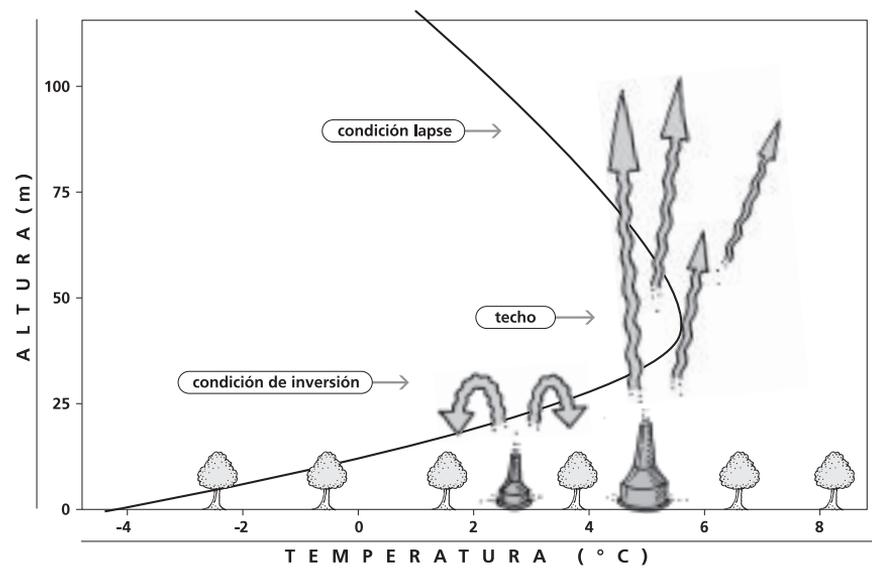
y descenderá, lo que crea un patrón de circulación dentro de la capa de inversión térmica (Figura 7.2). Si la inversión es débil o si los fuegos son demasiado grandes y calientes, el aire calentado asciende demasiado alto y el patrón de circulación dentro de la inversión no se produce. Las estufas modernas tienen más control sobre la temperatura de los gases emitidos para reducir las pérdidas por la ascensión y mejorar la eficiencia. Los sistemas más eficientes tienen poca llama por encima de la chimenea y no humean. Hacer funcionar las estufas a una temperatura demasiado alta también reducirá la vida media de las estufas.

Cuando hay una inversión fuerte (i.e. un techo bajo), el aire calentado asciende a una altura más baja y el volumen afectado por las estufas es más pequeño. Como el volumen calentado es más pequeño, las estufas son más efectivas en subir la temperatura del aire en condiciones de fuertes inversiones térmicas. El funcionamiento de una estufa es menos eficiente al aumentar la temperatura del aire en condiciones de una inversión térmica débil (i.e. techo alto) porque tienen un volumen más grande a calentar. Bajo condiciones de inversión térmica débil, usar un combustible con una fracción más alta de producción de energía respecto a la radiación que el calentamiento del aire mejorará la protección. Esta fracción se mejora normalmente teniendo más estufas y más pequeñas, con conductos de escape que retengan el calor. También, cuando los fuegos son demasiado grandes o calientes, el aire más caliente puede romper la parte superior de la inversión, hay menos circulación en la capa de inversión térmica y las estufas son menos eficientes en calentar el aire (Figura 7.3).

Como las estufas calientan el aire, el aire dentro de un cultivo protegido generalmente asciende y el aire frío de fuera va siendo empujado desde los bordes para reemplazar el aire ascendido. En consecuencia, ocurre más daño por helada y por ello se necesitan más estufas en los bordes. Kepner (1951) señaló la importancia de la fuerza de la inversión y de la colocación de más estufas en los bordes. Estudió una plantación de cítricos de 6,0 ha que se calentó con 112 estufas de chimenea quemando $2,8 \text{ l h}^{-1}$ con un consumo medio de $315 \text{ l ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$. La temperatura mínima del aire sin proteger fue de $1,7 \text{ }^\circ\text{C}$, pero los resultados son similares a los que se espera en una noche de helada de radiación. La plantación frutal era cuadrada y el viento del este varió desde $0,7 \text{ m s}^{-1}$ a $0,9 \text{ m s}^{-1}$ ($2,5 \text{ km h}^{-1}$ a $3,2 \text{ km h}^{-1}$). La Figura 7.4 muestra cómo la temperatura varió en transectos a lo largo del centro de la plantación. La dirección del viento venía de la izquierda. La gráfica superior (A) muestra los efectos del funcionamiento de la estufa sobre la temperatura durante dos noches con diferente fuerza de la inversión. El gráfico inferior (B) muestra los beneficios de utilizar el doble número de estufas en el borde contra el viento.

FIGURA 7.3

Diagrama de un perfil de temperatura de una noche helada y la influencia de la producción de la estufa en la distribución y pérdida de calor desde una plantación

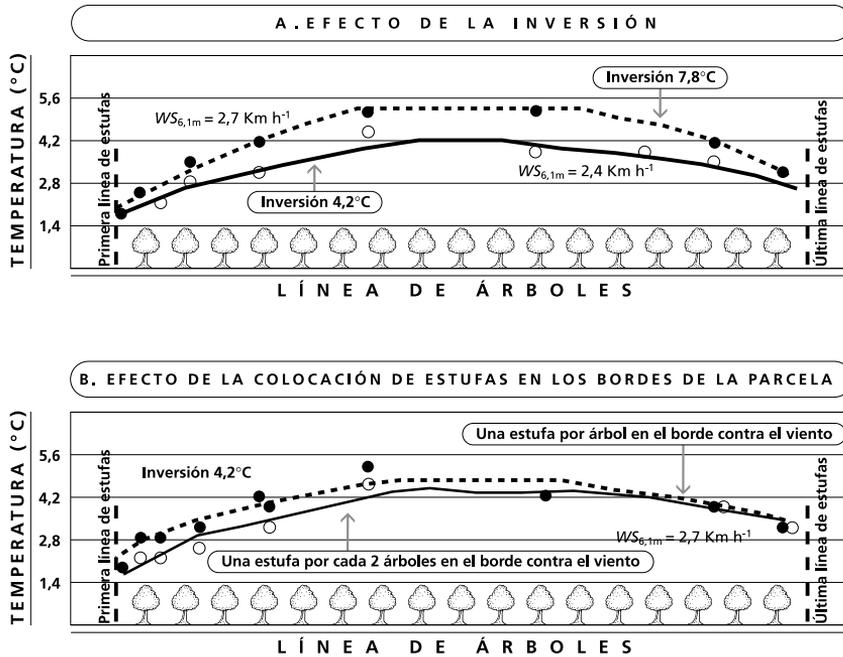


En la Figura 7.4, el aumento de la temperatura fue más alto en la parte central de la plantación frutal y los beneficios de calentar fueron menores cerca de los bordes contra el viento y a favor del viento. En la noche con 4,2 °C de fuerza de inversión, el aumento de temperatura en el borde contra el viento fue de un 40% del aumento en el centro de la plantación (Figura 7.4.A). El aumento de temperatura en el borde contra el viento fue de un 60% del aumento en el centro de la plantación frutal. En la noche con 7,8 °C de fuerza de inversión, la temperatura en la mitad de la plantación fue un 1,0 °C más caliente que en la noche con 4,2 °C de fuerza de inversión (Figura 7.4.A). La velocidad del viento fue ligeramente más alta durante la noche con 7,8 °C de fuerza de inversión, por ello la diferencia resultó con mayor probabilidad de un uso más eficiente del calor convectivo dentro de la capa de inversión más fuerte.

En la Figura 7.4.B, la temperatura aumentó casi 1 °C en el borde contra el viento cuando había una estufa por árbol más que cuando había una estufa cada dos árboles a lo largo del borde contra el viento. Hubo menos beneficio de las estufas adicionales en el borde a favor del viento, pero, como la dirección del viento puede cambiar, es sensato colocar estufas adicionales en todos los bordes.

FIGURA 7.4

Efectos de la temperatura del funcionamiento de una estufa (A) bajo diferentes condiciones de inversión y (B) con diferentes concentraciones de estufas en el borde contra el viento (Kepner, 1951)



La plantación de cítricos de 6,0 ha tenía árboles que tenían unos 4,6 m de altura y 4,6 m diámetro plantados tanto en 6,7 x 6,7 m como en 6,1 x 7,3 m. Las estufas estaban colocadas en las hileras de los árboles con una estufa por cada dos árboles dentro de la plantación y una estufa por árbol en el borde contra el viento cuando se aumentó la concentración. La plantación se calentó con unas 112 estufas de chimenea quemando 2,8 l h⁻¹ con un consumo medio de 315 l ha⁻¹ h⁻¹. La dirección del viento venía de la izquierda.

Los efectos de los bordes son importantes y bien conocidos por los agricultores. De hecho, los agricultores extinguen algunos fuegos a veces cuando se enciende estufas en las plantaciones vecinas.

Efectos del humo

Actualmente, es bien conocido que la protección de las estufas viene del calor liberado por el fuego y no del humo producido (Collomb, 1966). El humo cubre el cielo y reduce la visibilidad, pero no tiene ningún efecto en la temperatura aparente del cielo. La dimensión de la partícula media del humo es menor de 1,0 μm de diámetro (Mee y Bartholic, 1979), que reduce la radiación en el intervalo visible (0,4-0,7 μm) pero tiene poco efecto en la transmisión de la radiación de onda

larga. Por tanto, la radiación de onda larga hacia arriba desde la superficie pasa principalmente a través del humo sin ser absorbida. En consecuencia, el humo tiene un efecto escaso en la radiación de onda larga hacia arriba o hacia abajo en la noche y por ello tiene un escaso efecto para la protección contra las heladas. Como el humo no ofrece ningún beneficio o es muy pequeño y contamina el aire, es mejor minimizar la producción de humo y maximizar la eficiencia térmica de la combustión. El humo a la salida del Sol bloquea la radiación solar y retrasa el calentamiento del cultivo, que puede conducir a un consumo más alto de combustible y posiblemente más daño. Hay informes que indican que un deshielo gradual de los cítricos congelados reduce el daño (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978), pero hay otros informes que indican que no hay evidencia de esta creencia (Burke *et al.*, 1977). Si fuera cierto, entonces el humo podría ser beneficioso, pero las leyes actuales sobre contaminación hacen que el uso de humo sea ilegal en la mayoría de localidades. Donde las plantaciones frutales son pequeñas y cercanas a las carreteras, se sabe que el humo de las estufas causa accidentes de automóvil, como en el norte de Italia, que ha conducido a problemas legales y de seguros importantes. En consecuencia, la producción de humo no se recomienda para la protección contra las heladas.

Requerimientos de las estufas

Las estufas de combustible líquido normalmente proporcionan unos 38 MJ de energía por litro de combustible y el requerimiento de producción de energía varía entre 140 y 280 W m⁻² (5,0 y 10 GJ ha⁻¹h⁻¹) dependiendo de las condiciones de la noche de helada (Blanc *et al.*, 1963). Dividiendo el requerimiento de energía en J ha⁻¹ h⁻¹ por la producción de energía J l⁻¹, el requerimiento de combustible varía entre 133 y 265 l ha⁻¹ h⁻¹. El número de quemadores necesarios depende del nivel deseado de protección y del ritmo de quemado de las estufas. Si cada estufa consume unos 1,0 l h⁻¹, entonces dividiendo el requerimiento de combustible por la tasa de consumo da un intervalo entre 133 y 265 estufas de combustible líquido por hectárea (H_H). Para una protección más eficiente, lo mejor es mantener bajo el consumo de combustible por estufa y utilizar más estufas.

La producción de energía para los combustibles líquidos y sólidos normalmente utilizados se proporciona en la Tabla 7.2. Observe que la producción de energía es en MJ l⁻¹ para el combustible líquido, MJ por metro cúbico para el gas y MJ por kilogramo para los combustibles sólidos. Si se conoce la tasa de consumo de combustible (F_C) y el requerimiento de energía (E_R), incluyendo la energía adicional requerida por ineficiencia, entonces puede determinarse el número de estufas por hectárea. Utilice la Ecuación 7.1 para determinar el número de estufas

TABLA 7.2

Producción de energía para una variedad de combustibles utilizados normalmente

COMBUSTIBLE	PRODUCCION POR UNIDAD	PRODUCCION RELATIVA A 1 L DE PETROLEO	PRODUCCION DEL SISTEMA
Líquido	MJ l ⁻¹	litro	MJ h ⁻¹ ha ⁻¹
Petróleo (2,8 litro h ⁻¹ H ⁻¹ x 100 H ha ⁻¹)	37,9	1,00	10 612
Queroseno (2,8 litro h ⁻¹ H ⁻¹ x 100 H ha ⁻¹)	37,3	1,02	10 444
Propano (2,8 litro h ⁻¹ H ⁻¹ x 150 H ha ⁻¹)	25,9	1,46	10 878
Gas	MJ m ³	m ³	MJ h ⁻¹ ha ⁻¹
Gas natural (1,0 m ³ h ⁻¹ H ⁻¹ x 265 H ha ⁻¹)	40,1	0,95	10 627
Sólido	MJ kg ⁻¹	kg	MJ h ⁻¹ ha ⁻¹
Madera	20,9	1,81	Ver nota ⁽¹⁾
Carbón (0,5 kg h ⁻¹ H ⁻¹ x 360 H ha ⁻¹)	30,2	1,25	5 436
Ladrillos de Coque (0,5 kg h ⁻¹ H ⁻¹ x 365 H ha ⁻¹)	29,1	1,30	5 311

NOTA: (1) La producción depende del tipo de madera, del contenido de agua del combustible, y del tamaño y número de fuegos. Las producciones de energía se expresan en MJ por litro, MJ m⁻³ o MJ por kg⁻¹ para combustibles líquidos, gas y sólidos, respectivamente.

de combustible líquido por hectárea a partir del requerimiento de energía (E_R) en $W m^{-2}$, de la producción de energía del combustible (E_O) en $MJ l^{-1}$ y de la tasa de consumo de combustible (F_C) en $l h^{-1}$ por estufa:

$$H_H = \frac{[E_R / (E_O \times 10^6)]}{F_C} (3,6 \times 10^7) \text{ estufas ha}^{-1} \quad \text{Ec. 7.1}$$

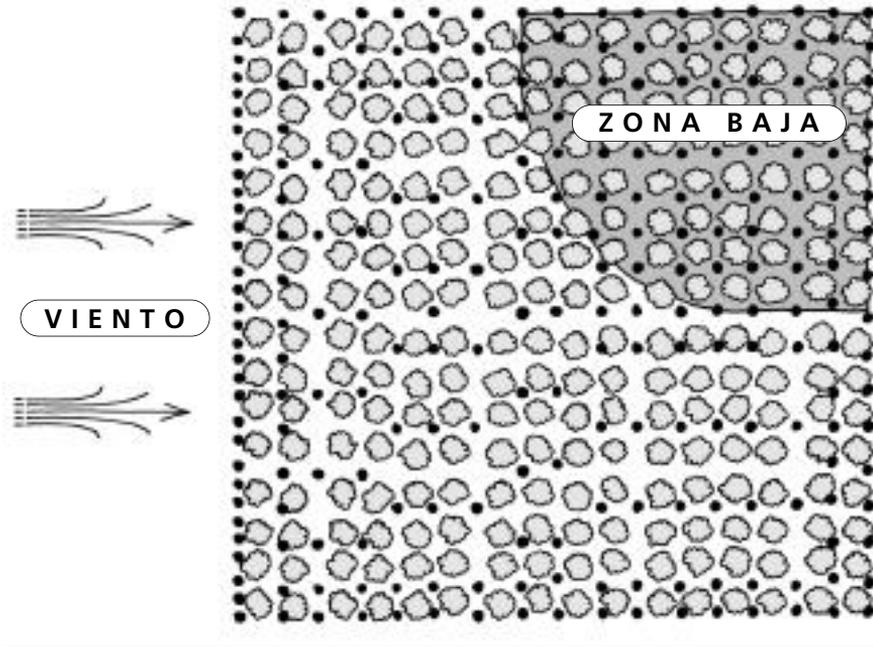
El coeficiente $3,6 \times 10^7$ convierte E_R en $W m^{-2}$ a $J h^{-1} ha^{-1}$. Para los combustibles sólidos, utilice la Ecuación 7.1 para determinar el número de estufas por hectárea (H_H) a partir del requerimiento de energía (E_R) en $W m^{-2}$, la producción de energía del combustible (E_O) en $MJ kg^{-1}$ y la tasa de consumo de combustible (F_C) en $kg h^{-1}$ por estufa. En el disco de ordenador se incluye un programa Excel "HeatReq.xls" para calcular tanto los requerimientos de las estufas de combustible líquido como las de combustible sólido.

Colocación de las estufas y manejo

La distribución de estufas debería ser relativamente uniforme con más estufas en los bordes, especialmente contra el viento y en las zonas bajas (Figura 7.5). Si el cultivo está localizado en una pendiente, entonces deberían colocarse más estufas en el borde superior de la pendiente donde el aire frío drena hacia el cultivo. Bajo condiciones de congelación, cuando la velocidad del viento excede los $2,2 m s^{-1}$

FIGURA 7.5

Ejemplo de distribución de estufas (pequeños puntos en la Figura), con concentraciones más altas a lo largo del borde contra el viento y en las zonas bajas (según Ballard y Proebsting, 1978)



(7,9 km h⁻¹), se produce una pérdida considerable de calor debido a la advección horizontal y se necesitan concentraciones más altas de estufas en el borde contra el viento. Las zonas bajas que son más frías, deberían tener también concentraciones más altas de estufas. En primer lugar deberían encenderse las estufas en los bordes y después encender más estufas conforme aumenta la necesidad (e.g. si aumenta la velocidad del viento o cae la temperatura). Las estufas son caras de funcionar, y por ello se utilizan en combinación con los ventiladores o como calor en los bordes en combinación con los aspersores.

Estufas de combustible líquido

Las estufas de combustible líquido se desarrollaron para la protección contra las heladas durante los primeros años del siglo XX. El uso del método disminuyó con el aumento de los precios del petróleo y las preocupaciones sobre la contaminación del aire. A pesar de que no se utilizaron ampliamente, el uso de las estufas de combustible líquido para la protección contra las heladas es todavía

un método viable en los casos donde las leyes no lo prohíben y el coste del combustible no es demasiado alto. Las estufas de combustible líquido requieren una cantidad considerable de mano de obra para la colocación, llenado del combustible y limpieza, además de los costes de capital para las estufas y para el combustible. Normalmente, hay de unas 75 a 100 estufas de chimenea de petróleo o de 150 a 175 estufas de combustible de propano por hectárea, y un sistema de estufas bien diseñado y con un buen funcionamiento producirá unos $1,23 \text{ MW ha}^{-1}$ (i.e. 123 W m^{-2}) de potencia. La tasa de consumo aproximada es $2,8 \text{ l h}^{-1}$ por estufa para las estufas con combustible de petróleo y queroseno y $1 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ para las estufas con combustible de propano. Más de la mitad de la producción de energía de las estufas se pierde como radiación hacia la atmósfera y como pérdidas de calor convectivo en una noche de helada de radiación típica, por ello, la producción de energía de la estufa es alta en relación con el calor ganado por el cultivo. Observe que estas recomendaciones son para la protección de plantaciones grandes de frutales de hoja caduca que están rodeadas por otras plantaciones que están siendo protegidas. Las plantaciones más pequeñas y aisladas pueden requerir más estufas.

Cuando se encienden las estufas, debe encenderse en primer lugar una de cada dos o tres estufas en una hilera. Después hay que volver atrás y encender las estufas restantes. Esto ayuda a reducir las pérdidas convectivas de calor a través de la parte superior de la capa de inversión. Las estufas de combustible de fuel oil deberían limpiarse después de cada 20 a 30 horas de funcionamiento, y las estufas deberían cerrarse para prevenir la entrada de lluvia que puede causar la pérdida de combustible hacia el suelo. La chimenea puede retirarse o se puede extinguir el fuego si se produce demasiado vapor. Hay que eliminar el fuel oil de las estufas al final de la estación. Las estufas tipo "llama libre" acumularán carbón y disminuirán el nivel de eficiencia del combustible. Los vaporizadores catalíticos pueden utilizarse para reducir la acumulación de carbón. Deberían rellenarse antes de que se salga el combustible y limpiarse con una vara o simplemente hay que golpearla para liberar la acumulación de hollín que reduce la eficiencia.

Para la protección contra las heladas están disponibles varios tipos de quemadores de combustibles. Una lista de combustibles y de estufas aprobadas para ser utilizadas en Florida (EE.UU.) se muestra en las Tablas 7.3 y 7.4. Como puede improvisarse con potes de pintura, de petróleo, etc., el tipo de llama libre (i.e. sin una chimenea) es más barato, más fácil de transportar y de llenar. Son más pequeños, y por ello la densidad de estufas puede ser más grande, dando una mejor mezcla y menos oportunidad para el efecto chimenea. Esto resulta a veces en una mejora de la protección. Sin embargo, son combustibles menos eficientes

TABLA 7.3

Combustibles líquidos y gaseosos aprobados por el *Florida Department of Environmental Protection* para la protección contra las heladas

Diesel Núm. 2	Butano
Fuel oil Núm. 2	Gas de petróleo líquido
Gas propano	Metano
Alcohol (etanol o metanol)	

TABLA 7.4

Estufas aprobadas por el *Florida Department of Environment* para la protección contra las heladas

MODELO Y FABRICANTE	MODELO Y FABRICANTE
HY-LO Return Stack, Scheu Products	Radiant Omni-Heater, New Draulics
HY-LO Large Cone, Scheu Products	HY-LO Lazy Flame Heater, Scheu Products
Brader Heater, Brader Heaters, Inc	Sun Heater Model 2, Fleming-Troutner
Georges Heater, Georges Enterprise	Self Vaporizing Model M.B.S.-1, Burners
Agri-Heat Heater, Agri-Heat, Inc	HY-LO Auto Clean Stack, Scheu Products
A conical heater, Fultoin-Cole Seed	Mobil Tree Heat, Mobil Oil Co.
Orchard-Rite Heater, Orchard Rite Ltd.	Fireball, Sebring Frost Products
Return Stack 2000 – W.H. Clark Food	

porque hay más volatilización y contaminan más. En algunas localidades, no son aprobados para ser usados en la protección contra las heladas.

Las regulaciones sobre la contaminación del aire a menudo son bastante estrictas y deben revisarse las regulaciones locales antes de comprar o de utilizar las estufas. La mayoría de autoridades regionales tienen regulaciones similares sobre la quema de combustibles para la protección contra las heladas. Además, algunas autoridades tienen otros requerimientos para el uso de las estufas. Por ejemplo, la *Florida State Environmental Agency* requiere que, cuando se utilicen estufas para la protección contra las heladas, la temperatura del aire debe medirse utilizando una garita meteorológica estándar con rejilla o una protección meteorológica para heladas en frutales (Figuras 6.1 y 6.2). Antes de utilizar las estufas deberían de investigarse todas las regulaciones locales.

Una mezcla equivalente de fuel oil y de gasolina se utiliza para encender las estufas. Para rellenar las estufas después de una helada se utilizan recipientes o tanques arrastrados por un tractor, que permiten llenar dos líneas de quemadores de forma simultánea. Cuando se utiliza el calentamiento directo, para minimizar

el consumo de combustible la protección se inicia justo antes de alcanzar las temperaturas críticas de daño. La temperatura debería medirse en una garita tipo Stevenson, en una protección meteorológica para heladas en frutales o en una garita Gill que protege a los termómetros del cielo despejado.

Estufas de propano y de gas natural

Los requerimientos de mano de obra para rellenar las estufas de combustible líquido son altos, por ello algunos agricultores han pasado de usar estufas individuales a sistemas de distribución centralizados. Los sistemas utilizan tuberías para transportar el combustible a las estufas. El combustible puede ser gas natural, propano líquido o fuel oil. En los sistemas más elaborados, la ignición, la tasa de combustión y el cierre están automatizados además de la distribución del combustible. El coste de capital para instalar los sistemas centralizados es alto, pero los costes de funcionamiento son bajos. Las estufas de combustible de propano requieren menos limpieza y las tasas de quemado son más fáciles de controlar que las estufas de combustible fuel oil. Como la tasa de quemado es menor, se necesitan más estufas (e.g. unas 130–150 por hectárea), pero la protección es mejor. Bajo condiciones severas, el tanque de suministro de propano puede, en ocasiones, congelarse, por ello debería instalarse un vaporizador para prevenir que la línea de gas se congele.

Estufas de combustible sólido

Los combustibles sólidos se utilizaron como un método de protección contra las heladas antes que los combustibles líquidos o de gas. Conforme los combustibles líquidos caían de precio, hubo una sustitución de los combustibles sólidos por los líquidos, especialmente en Norte América. Cuando se descubrió que la relación entre la radiación respecto a la energía total liberada era un 40% para los combustibles de quemar sólidos (e.g. madera, carbón y coque) en comparación con el 25% para los combustibles de quemar líquidos (Kepner, 1951), hubo una reactivación en el uso de los combustibles sólidos. Tener una relación más alta de radiación respecto a la energía total liberada es importante conforme las condiciones se hacen más ventosas (e.g. durante una helada de advección). La principal desventaja de los combustibles sólidos es que la energía liberada disminuye conforme el combustible va siendo utilizado, y entonces la energía liberada se va haciendo limitante cuando más se necesita (Hensz, 1969a; Martsof, 1979b). Otro inconveniente es que los combustibles sólidos son difíciles de encender, y por ello deben encenderse con antelación. Son difíciles de extinguir, por ello el combustible a menudo se pierde si se encienden cuando no es necesario.

En la protección contra las heladas se utilizan una variedad de combustibles sólidos (e.g. madera, coque, neumáticos viejos de caucho, velas de parafina y carbón). Algunas compañías petroleras comercializan productos a partir de ceras de petróleo – un subproducto de refinería – y coque que se presenta en varias formas, que incluyen las velas y los lingotes.

Cuando se han comparado con los combustibles líquidos, los combustibles sólidos a menudo muestran un mejor resultado. Por ejemplo, utilizando dos velas de cera de petróleo bajo cada vid en un viñedo dio al fruto un aumento en promedio de 1,7 °C. La eficiencia energética (i.e. la temperatura del fruto dentro y fuera del follaje) por utilizar velas de cera fue más del doble que la de los combustibles líquidos (Miller, Turrell y Austin, 1966). Se observó un aumento de 2,2 °C a 1,1 m de altura con el uso de 375 lingotes de cera de petróleo y coque por hectárea (Parsons, Schultz y Lider, 1967). Los combustibles líquidos convencionales requieren el doble de producción de energía para ganar el mismo efecto en la temperatura del aire en la cubierta. Por ejemplo, las estufas con cera de petróleo utilizan únicamente un 60% de la energía normalmente necesaria para obtener la misma protección (Schultz, Lider y Parsons, 1968). La modificación de la temperatura dentro de la capa de inversión térmica fue mas concentrada cerca del suelo – donde está el cultivo – cuando se quemaban lingotes de cera de petróleo y coque comparado con los quemadores de chimenea retroalimentados (Gerber, 1969). Por consiguiente, para mejorar la eficiencia es claramente mejor tener muchos fuegos pequeños que unos pocos fuegos grandes.

Estufas portátiles

Como método para la protección contra las heladas hay disponible comercialmente una estufa portátil; sin embargo, no se han publicado todavía evaluaciones científicas de la máquina. La estufa portátil utiliza cuatro tanques de 45 kg de propano para suministrar el combustible a la estufa, que va montada en la parte trasera del tractor (Figura 7.6). La estufa utiliza un ventilador centrífugo para hacer viento (aire calentado) horizontalmente y perpendicular a la dirección del tractor conforme se mueve arriba y debajo de las hileras. Una vez en marcha la estufa, el combustible que suministra se ajusta para dar una temperatura de aproximadamente 100 °C donde el aire sopla desde la máquina. Cuando funciona, el flujo de aire se extiende de 50 a 75 m a ambos lados de la máquina. El tractor es conducido arriba y abajo de las hileras en pases lo suficientemente espaciados que permitan un solapamiento del área de influencia. El fabricante recomienda que el tractor haga un ciclo completo a través del cultivo cada 10 minutos, un periodo que permite cubrir unas 5–7 ha.

FIGURA 7.6

Estufa portátil para la protección contra las heladas montada en la parte trasera de un tractor

Foto: R.L. Snyder

En algunos experimentos no publicados, la estufa portátil mostró un efecto pequeño en las temperaturas mínimas registradas dentro de las plantaciones de frutales protegidas. Esto era esperable ya que la producción de energía desde la máquina es mucho menos que las pérdidas de energía desde un cultivo durante una noche de helada de radiación. Sin embargo, cada vez que la máquina pasaba por un punto dentro del cultivo, había un aumento de corta duración en la temperatura registrada con termopares expuestos. Es posible que estos aumentos de temperatura de corta duración tengan un efecto positivo y eviten la congelación del tejido de la planta; sin embargo, se necesita más investigación para verificar si esto es cierto. Recientemente, algunos investigadores han sugerido que la estufa portátil puede ser beneficiosa porque seca las superficies de las plantas. Como el agua normalmente se congela en el tejido exterior de las plantas y después se propaga dentro del tejido para causar la congelación en los espacios intercelulares, puede que haya alguna validez en esta teoría. Sin embargo, se necesita claramente más investigación para validar la eficacia de la máquina.

VENTILADORES**Ventiladores convencionales**

Los ventiladores que hacen viento casi horizontalmente se introdujeron como un método para la protección contra las heladas en California durante los años 20. Sin embargo, no fueron ampliamente aceptados hasta los años 40 y los años 50. Ahora son utilizados normalmente en muchas partes del mundo. Los

ventiladores se utilizan en una amplia variedad de cultivos que incluyen las viñas, los árboles de hoja caduca y los cítricos. Las plantaciones de cítricos de California están, casi todas, protegidas por ventiladores.

Los ventiladores consisten generalmente de una torre de acero con un gran ventilador rotatorio cerca de la parte superior. Normalmente hay una hélice con dos o cuatro hojas con un diámetro que normalmente varían de 3 a 6 m. La altura normal para los ventiladores es de unos 10–11 m por encima del nivel del suelo. Sin embargo, para cubiertas vegetales más bajas se han usado ventiladores con alturas más bajas. Se considera que la altura del ventilador se establece para evitar golpear los árboles y no hay una razón aerodinámica para seleccionar la altura. Los ventiladores más efectivos tienen unas velocidades de las hélices de unos 590 a 600 rpm. Los ventiladores giran alrededor de la torre con una revolución cada cuatro o cinco minutos. La mayoría de ventiladores hacen viento a un ángulo ligeramente inclinado hacia abajo (e.g. unos 7 °C) en la dirección de la torre, lo cual mejora su eficacia. Cuando funciona el ventilador, empuja aire de la parte superior y fluye a un ángulo ligeramente hacia abajo hacia la torre y el suelo. La potencia para hacer funcionar el ventilador la proporciona un motor instalado en la base de la torre; sin embargo, algunas de las máquinas más viejas tienen motores que giran con el ventilador en la parte superior de la torre. Se considera que hacer coincidir la rotación de los ventiladores alrededor de las torres, de forma que todos los ventiladores hacen viento en la misma dirección, mejora la eficacia de la mezcla.

Antes de invertir en ventiladores, hay que asegurarse investigando el clima local y los gastos locales. Por ejemplo, si la inversión térmica es pequeña o no existe, entonces no se recomiendan los ventiladores. En California, los ventiladores son ampliamente utilizados en plantaciones de cítricos, que son protegidos principalmente de diciembre hasta enero, pero no en plantaciones de hoja caduca, porque las inversiones térmicas tienden a ser fuertes durante los meses de invierno cuando los cítricos necesitan protección, pero no en el Valle Central en primavera cuando los árboles de hoja caduca necesitan la protección. Hay publicaciones que indican que los ventiladores funcionan mejor una vez que los árboles de hoja caduca sacan las hojas en primavera. Consecuentemente, los ventiladores no se usan a menudo en las plantaciones de almendros que normalmente necesitan protección antes de la salida de las hojas. Es aconsejable llevar a cabo reconocimientos de temperatura para medir la temperatura de las inversiones durante el periodo de protección contra las heladas antes de comprar los ventiladores. Si no existe inversión térmica o es muy pequeña, entonces se debe seleccionar un método distinto de protección. Localiza las

máquinas en lugares donde los ventiladores favorecen el arrastre del viento. En algunos casos, puede ser beneficioso instalar máquinas donde pueden empujar el aire frío fuera de las zonas bajas.

Los ventiladores generalmente tienen requerimientos de mano de obra y costes de funcionamiento más bajos que otros métodos. Esto es especialmente cierto para los ventiladores eléctricos. Sin embargo, cuando se instalan ventiladores eléctricos, el agricultor tiene que pagar a la compañía eléctrica cargas fijas que cubren el coste de la línea instalada y del mantenimiento. Las cargas fijas se pagan tanto si se usan como si no se usan los ventiladores. De hecho, debido al aumento de los costes de la energía eléctrica, el uso de los ventiladores eléctricos se ha vuelto marginal desde el punto de vista de la efectividad-coste para la protección de los cítricos en algunas regiones de California (Venner y Blank, 1995). Los ventiladores de combustión interna tienen mejor efectividad-coste debido a que no tienen cargas fijas con la electricidad. Sin embargo, requieren más mano de obra. El coste de capital para instalar ventiladores es similar a los sistemas de aspersión, pero los costes de funcionamiento son mucho más altos.

Generalmente, excepto por el ruido, los ventiladores son respetuosos con el ambiente. El ruido de los ventiladores es un gran problema para los agricultores con cultivos cerca de pueblos y ciudades. Esto debería tenerse en cuenta cuando se selecciona un método de protección contra heladas.

Teoría del funcionamiento

Los ventiladores proporcionan protección aumentando la densidad de flujo de calor sensible hacia abajo y rompiendo las capas límite a micro-escala sobre las superficies de las plantas. Los ventiladores no producen calor, sino que redistribuyen el calor sensible que ya está presente en el aire. Los ventiladores mezclan el aire caliente de la parte superior con el aire más frío cerca de la superficie (Figura 7.7). También ayudan a eliminar el aire más frío cercano a las hojas y lo sustituyen por el aire del ambiente ligeramente más cálido. La cantidad de protección a la que hace frente depende principalmente de la fuerza de la inversión térmica no protegida. La fuerza de la inversión térmica se calcula como la diferencia entre las temperaturas a 10 m y a 1,5 m en una plantación frutal no protegida. Dentro del área de influencia por un ventilador, la temperatura media del aire medida a 1,5 m aumenta 1/3 de la fuerza de la inversión térmica. Cerca de la torre del ventilador, la protección conseguida es mejor (Figura 7.8). El beneficio real depende de las características de la inversión térmica, las cuales no se pueden generalizar. Sin embargo, las mejores protecciones se obtienen en las inversiones térmicas más fuertes.

FIGURA 7.7

Diagrama esquemático que muestra el efecto de los ventiladores en el perfil de temperaturas durante una helada de radiación

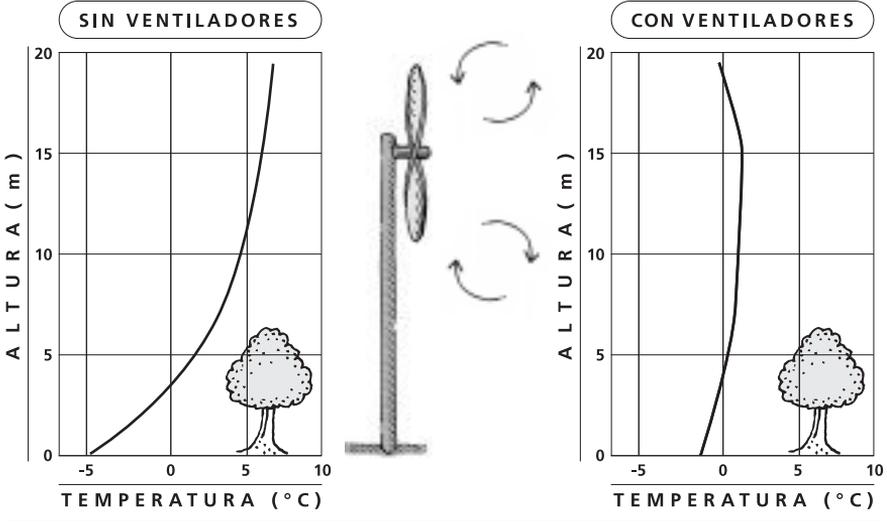
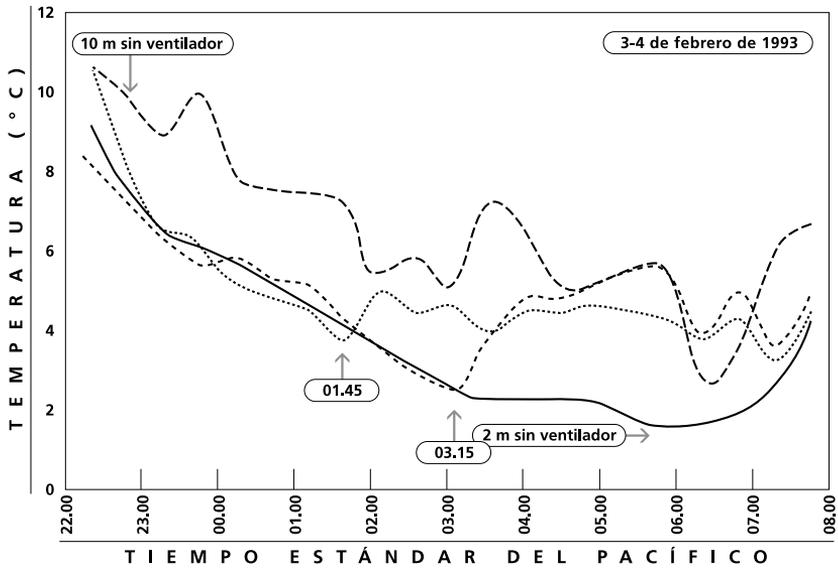


FIGURA 7.8

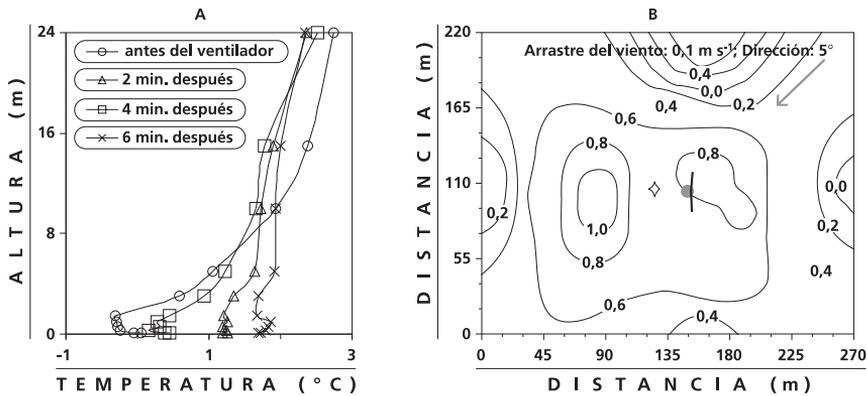
Trazas de tendencias de la temperatura a 10 m y a 2 m sin (w/o) un ventilador y tendencias de temperatura a 2 m medidas cerca de los ventiladores puestos en marcha a las 01.45 h y a las 03.15 h



Las medidas de temperatura se tomaron a 30 m de distancia del ventilador.

FIGURA 7.9

Respuesta de la temperatura medida en campo protegido con un ventilador el 26 de marzo de 2000 en el norte de Portugal



(A) Los perfiles de temperatura (a 30 m del ventilador) antes y después del ventilador; y (B) patrón de respuesta de la temperatura producido por el ventilador después de 2 giros completos alrededor de la torre (según Ribeiro *et al.*, 2002).

Generalmente, se necesita un ventilador de 75- kW por cada 4 a 5 ha (i.e. un radio de unos 120 m a 125 m). Si se utiliza un ventilador, normalmente se necesita un motor de unos 18,8 kW por hectárea. Se sugiere un motor de unos 15 kW de potencia por máquina por hectárea cuando se utilizan varias máquinas. La protección disminuye con la distancia a la torre, por ello algo de solapamiento en las áreas de protección la favorecerá. Normalmente el área de protección tiene una forma más oval que de círculo por el arrastre del viento. Por ejemplo, la Figura 7.9B muestra el patrón de respuesta de la temperatura a 1,5 m de altura al funcionamiento de un ventilador en una plantación de manzanos (Ribeiro *et al.*, 2002).

Puesta en marcha y parada

Los ventiladores normalmente se ponen en marcha cuando la temperatura del aire alcanza los 0 °C. Bajo condiciones de inversión térmica estable, el aire tiende a estratificarse cerca del suelo y se considera que la mezcla es menor. Sin embargo, ensayos en California (EE.UU.) y en Portugal han mostrado que poner en marcha los ventiladores después de que se hayan formado las inversiones térmicas tiene una escasa influencia en la eficacia del ventilador. En menos de media hora después de la puesta en marcha, la temperatura a 2 m normalmente sube, algunas veces alcanzando la temperatura a 10 m de una plantación no protegida (Figura 7.8). Sin embargo, como la temperatura de una superficie

radiante, durante una noche de helada, es normalmente más baja que la temperatura del aire, es prudente tener los ventiladores funcionando cuando la temperatura del aire alcanza la temperatura crítica de daño (T_c). Si el fruto está húmedo durante el día o al anochecer de una esperada noche de helada, los ventiladores (y estufas) deberían ponerse en marcha más temprano para intentar secar los frutos antes de que se pueda formar hielo sobre el fruto.

Los ventiladores no se recomiendan cuando el viento sopla a más de $2,5 \text{ m s}^{-1}$ (8 km h^{-1}) o cuando hay una niebla superenfriada. Cuando la velocidad del viento es superior a los $2,5 \text{ m s}^{-1}$, no es probable que este presente una inversión térmica y es posible que las aspas del ventilador puedan experimentar algún daño por el viento. Un método sencillo para estimar la velocidad del viento es colgar una cinta de plástico de una rama. Un ejemplo del tipo de plástico son las cintas que utiliza la policía para proteger el escenario de un crimen. Puede adquirirse en ferreterías. Si la velocidad del viento es superior a $2,5 \text{ m s}^{-1}$, la parte inferior de la cinta colgante debería irse hacia atrás y levantarse unos 30 cm de la horizontal.

En una niebla superenfriada, las gotas de agua pueden congelarse sobre el ventilador y puede producirse un daño importante en el ventilador si el hielo provoca la rotura de una hélice y no de la otra.

Ventiladores de flujo vertical

Se ha investigado el uso de ventiladores de flujo vertical para empujar hacia abajo el aire caliente de la parte superior; sin embargo, estos ventiladores por lo general no funcionan muy bien debido a que la turbulencia mecánica mezclada con los árboles reduce el área afectada por la ventilación. Además, la alta velocidad del viento cerca de la base de la torre puede dañar los cultivos hortícolas y ornamentales. Los ventiladores que producen viento verticalmente hacia arriba están disponibles comercialmente, habiéndose ensayado algunas máquinas. La idea es que el ventilador empujará el denso aire frío cerca del suelo hacia arriba donde puede mezclarse con el aire más caliente de la parte superior. En teoría, el aire frío se elimina de cerca de la superficie y el aire más caliente de la parte superior cae hacia abajo favoreciendo que baje la inversión térmica. Los pocos ensayos han mostrado que este método tiene un efecto positivo temporal sobre las temperaturas cerca del ventilador; sin embargo, todavía se desconoce la extensión de la influencia y la duración del efecto.

Que sepamos, el método sólo se ha utilizado en pequeños valles donde el aire frío empujado hacia arriba es probable que vuelva a caer hacia la superficie. En una localidad donde prevalezcan vientos en la parte superior que pueden mover el aire horizontalmente fuera del cultivo, podría proporcionar más protección. Sin embargo, hasta el momento no existe investigación conocida sobre esta evidencia.

Helicópteros

Los helicópteros mueven el aire caliente de la parte superior, en una inversión térmica, hacia la superficie. Los helicópteros no son efectivos si no existe inversión térmica o es muy pequeña. Debido al elevado coste de tener el helicóptero a punto y a los costes de funcionamiento, el uso de los helicópteros para la protección contra las heladas está limitado a cultivos de alto valor o emergencias (e.g. cuando tenemos avería en el método habitual).

Los distintos autores difieren en sus estimaciones del área protegida por los helicópteros. El área que cubre un único helicóptero depende de su peso y tamaño y de las condiciones meteorológicas. El área estimada que cubre un helicóptero varía entre 22 y 44 hectáreas (Evans, 2000; Powell y Himelrick, 2000). Se necesitan pases cada 30 a 60 minutos, con más pases bajo condiciones extremas. Si los tiempos entre pases se hacen demasiado largos permite que las plantas se enfríen demasiado y la agitación que produce el pase de un helicóptero puede causar una nucleación heterogénea y provocar un daño grave.

Los sensores de temperatura a menudo van montados en la parte exterior del helicóptero y los pilotos vuelan a una altura donde observan la lectura de temperatura más alta. La altura óptima es normalmente entre 20 y 30 m. Las velocidades normales de vuelo son de 25 a 40 km h⁻¹ (Powell y Himelrick, 2000) o de 8 a 16 km h⁻¹ (Evans, 2000). Velocidades más altas no mejoran la protección. Aumentos de temperatura entre 3,0 °C y 4,5 °C son normales para una helicóptero sobrevolando. A menudo los pilotos cargan los tanques del helicóptero con agua para aumentar el peso y aumentar el empuje. Bajo condiciones de heladas fuertes con una inversión térmica alta, un helicóptero puede volar sobre otro y favorecer la transferencia de calor hacia abajo.

Se utilizan unas luces controladas por termostatos en la parte superior de la cubierta vegetal para ayudar a los pilotos a ver donde se necesita realizar las pasadas. Conforme el helicóptero pasa sobre el cultivo, la temperatura sube y las luces se apagan. El enfriamiento de la temperatura del termostato provoca que se enciendan las luces. Esto ayuda al piloto a encontrar y a volar sobre las zonas frías. Alternativamente, un equipo en tierra debería controlar la temperatura en el cultivo y comunicar con el piloto donde se necesitan los vuelos.

En las pendientes de las colinas, la transferencia de calor se propaga pendiente abajo después de alcanzar la superficie. En consecuencia, volar sobre la parte superior de la pendiente, donde está situado un cultivo, normalmente proporciona más protección debido a que los efectos se sienten también a favor del viento. Los vuelos se detienen cuando la temperatura del aire contra el viento desde el cultivo ha aumentado por encima de la temperatura crítica de daño.

ASPERSORES

La ventaja, sobre otros métodos, de utilizar aspersores para la protección contra las heladas es que la aplicación de agua es en general menos cara. El consumo de energía es un 10% de la utilizada en la protección contra las heladas con estufas (Gerber y Martsolf, 1979) y, por ello, los costes de funcionamiento son bajos si se compara con las estufas e incluso con los ventiladores. Principalmente se necesita mano de obra para asegurarse de que el sistema no se detiene y que los cabezales no se hielan durante la noche. Además de la protección contra las heladas, se pueden utilizar los aspersores para el riego, para favorecer el color del fruto por el enfriamiento evaporativo sobre la planta, reducir el daño por el Sol regando encima de la planta, retrasar la floración antes del desborre, aplicación de fertilizantes y una combinación de todas estas aplicaciones. También hay que tener en cuenta que el método, relativamente, no contamina. La principal desventaja de utilizar aspersores es el elevado coste de instalación y las enormes cantidades de agua que se necesitan. En muchos casos, la falta de disponibilidad de agua limita el uso de los aspersores. En otros casos, el uso excesivo puede conducir a un encharcamiento del suelo, lo que puede causar problemas a las raíces así como impedir el cultivo y otras actividades de manejo. El lavado de nutrientes (principalmente nitrógeno) es un problema donde la aspersión se utiliza con frecuencia. En algunos casos, el uso excesivo de aspersores puede afectar a la actividad de las bacterias en el suelo y puede retrasar la maduración de frutas o de frutos secos (Blanc *et al.*, 1963). En esta sección sobre el uso de los aspersores, se discuten los siguientes tópicos.

1. Conceptos básicos
2. Aspersores por encima de las plantas
 - Aspersores de rotación convencionales
 - Puesta en marcha y detención
 - Requerimientos de caudal
 - Aspersores de caudal variable
 - Aspersores dirigidos de bajo volumen
3. Aspersión sobre cubiertas
4. Aspersores por debajo de las plantas
 - Aspersores de rotación convencionales
 - Micro-aspersores
 - Riego de bajo volumen (por goteo)
 - Agua calentada

Conceptos básicos

Igual que el aire, el agua tiene calor sensible que medimos con un termómetro y la temperatura del agua aumenta o disminuye dependiendo de los cambios en el contenido de calor sensible. Cuando la temperatura del agua cae, ocurre por (1) el calor sensible en el agua se transfiere a sus alrededores, (2) el agua vaporiza, lo cual consume calor sensible para romper los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua, o (3) hay una pérdida de radiación neta. Conforme las gotas de agua vuelan desde el cabezal de un aspersor a las superficies de las plantas y del suelo, parte del calor sensible se pierde como radiación, parte se transferirá desde el agua más caliente al aire más frío y parte se perderá como calor latente conforme el agua se evapora desde las gotas. La cantidad de evaporación es difícil de estimar ya que depende de la temperatura y calidad del agua, del tamaño de las gotas y de la longitud del camino recorrido, y de las condiciones meteorológicas.

Entender los cambios en el contenido de calor sensible del agua y las conversiones entre el calor sensible y el calor latente es crucial para entender la protección contra las heladas con los aspersores. La temperatura del agua es una medida del contenido de calor sensible del agua y del calor liberado al aire y a las plantas que proporciona como protección la caída de la temperatura del agua. Desde los pozos, el agua normalmente tiene una temperatura cercana a la temperatura media anual del aire en una localidad. Para que la temperatura del agua caiga de 20 °C a 0 °C, cada kg (o litro) debe perder 83,7 kJ de calor sensible. Este calor puede perderse por radiación; ser transferido al calor sensible en el aire, en las plantas o en el suelo; o puede contribuir a la evaporación. Cuando se congela 1,0 kg de agua a 0 °C, el cambio de fase convierte 334,5 kJ de calor latente a calor sensible. La cantidad total de energía liberada al enfriar el agua desde 20 °C y congelarla es de 418,3 kJ kg⁻¹. Si la temperatura inicial del agua fuese de 30 °C, entonces enfriarla a 0 °C proporcionaría 41,9 kJ kg⁻¹ adicionales, es decir un total de 460,1 kJ kg⁻¹. Sin embargo, enfriar 1,1 kg de agua a 20 °C y congelarla proporciona 460,9 kJ kg⁻¹, por ello aplicar un 10% más de agua proporciona la misma energía que calentar el agua unos 10 °C.

Enfriar y congelar el agua reemplaza la energía perdida durante una helada de radiación. Sin embargo, la evaporación desde la superficie elimina calor sensible y causa la caída de la temperatura del aire. Aunque las tasas de evaporación son bajas, las pérdidas de energía pueden ser altas. Para un cambio de fase de líquido a vapor de agua (i.e. evaporación), la pérdida es de 2 501 kJ kg⁻¹ a una temperatura de 0 °C. Para un cambio de fase desde hielo a vapor de agua (i.e. sublimación), la pérdida es de 2 825,5 kJ kg⁻¹ a 0 °C. Por ello, la energía liberada al enfriar 1,0 kg de agua a 20 °C hasta los 0 °C y su congelación es de 418,3 kJ kg⁻¹, por ello la

cantidad de agua enfriada y congelada debe ser más de 6,0 veces la cantidad evaporada (o 6,8 veces la cantidad sublimada) para no salir perdiendo. Se necesita energía adicional del proceso de enfriamiento y de congelación para compensar las pérdidas de energía neta que ocurrirían sin protección.

Cuando las gotas de agua golpean una flor, una yema o un fruto pequeño, el agua se congelará y liberará calor latente, que temporalmente sube la temperatura de la planta. Sin embargo, la energía se pierde como calor latente cuando el agua se vaporiza desde el tejido de la planta cubierto por hielo. Esto, junto a las pérdidas de radiación, causa la caída de temperatura hasta que giran los aspersores y golpean la planta con otro pulso de agua. El secreto de protección, con aspersores convencionales sobre las plantas, es volver a aplicar agua frecuentemente a un ritmo de aplicación suficiente para prevenir que la temperatura del tejido de las plantas caiga demasiado baja entre los pulsos de agua. Para los aspersores dirigidos sobre las plantas, de bajo volumen y que no giran, la idea es aplicar agua continuamente a una tasa de aplicación más baja, pero dirigida a un área de superficie más pequeña.

Para los aspersores bajo planta convencionales, la idea es aplicar agua a una frecuencia y tasa de aplicación que mantenga la superficie del suelo a una temperatura cercana a los 0 °C. Esto aumenta la radiación de onda larga y la transferencia de calor sensible a las plantas en relación con un cultivo no protegido. Para los micro-aspersores bajo las plantas, que aplican menos agua que los aspersores convencionales, el objetivo es únicamente mantener el suelo bajo las plantas cerca de 0 °C, para concentrar y favorecer la radiación y la transferencia de calor sensible hacia arriba en dirección a las plantas.

Aspersores por encima de las plantas

El riego por aspersión sobre las plantas se utiliza para proteger cultivos de crecimiento bajo y algunos árboles frutales de hoja caduca, pero no para los cultivos con ramas débiles (e.g. almendros), donde un peso excesivo del hielo sobre las plantas podría partir las ramas. Es usado poco frecuentemente en árboles subtropicales (e.g. cítricos) excepto para los limoneros jóvenes, que son más flexibles. Incluso durante las heladas de advección, la aspersión sobre las plantas proporciona una protección excelente contra las heladas hasta cerca de -7 °C si las tasas de aplicación son suficientes y la aplicación es uniforme. Bajo condiciones de viento o cuando la temperatura del aire cae tan baja que la tasa de aplicación es inadecuada para suministrar más calor que el que se pierde por evaporación, el método puede causar más daño que el que experimentaría un cultivo no protegido. Los inconvenientes a éste son el daño grave que puede

ocurrir si el sistema de aspersión falla, el método tiene grandes requerimientos de agua, el peso del hielo puede causar daño, y las enfermedades de las raíces pueden ser un problema en suelos pobremente drenados.

Los requerimientos de tasas de aplicación de los aspersores sobre las plantas difieren de los aspersores dirigidos de giro convencional, tasa variable y bajo volumen. Además la tasa de precipitación depende de (1) la velocidad del viento, de (2) la temperatura mínima no protegida, (3) del área superficial del cultivo a cubrir y de la (4) uniformidad de distribución del sistema de aspersión. Mientras haya una mezcla de líquido-hielo sobre las plantas, con agua goteando de los carámbanos, las partes de las plantas cubiertas mantendrán su temperatura cerca de los 0 °C. Sin embargo, si se utiliza una tasa de precipitación inadecuada o si el intervalo de giro de los aspersores es demasiado largo, toda el agua se puede congelar y la temperatura de las plantas cubiertas empezará a caer de nuevo.

Aspersores de rotación convencionales

Los sistemas de aspersión sobre las plantas convencionales utilizan aspersores de impacto estándar para humedecer completamente las plantas y el suelo de un cultivo. Las plantas más grandes tienen más área superficial, por ello se necesita una tasa de aplicación más alta para las plantas más altas que para las bajas. Para que los aspersores sobre las plantas sean efectivos, las partes de las plantas deben cubrirse con agua y volverlas a humedecer cada 30 a 60 segundos. Los intervalos de rotación más largos requieren tasas de aplicación más altas.

La uniformidad de distribución de los aspersores es importante para evitar una cobertura inadecuada, que puede resultar en daño. Una evaluación del sistema de aspersión (i.e. un ensayo de uniformidad de precipitación) debería llevarse a cabo antes de la estación de heladas para estar seguros de que la uniformidad de la aplicación es buena. La información de cómo llevar a cabo un ensayo de aspersores para la uniformidad de la precipitación se presenta normalmente en la mayoría de libros de texto sobre manejo del riego, y a menudo hay directrices disponibles de los agentes de extensión locales. Si se sabe que el aire frío es arrastrado desde una dirección específica, aumentar la densidad de aspersores en el borde contra el viento del cultivo, o incluso en un campo abierto contra el viento desde el cultivo, puede mejorar la protección. No hay que incluir el área de densidad más alta en el área de evaluación del sistema.

Cualquier sistema de riego sobre la planta que suministre una tasa de aplicación apropiada puede utilizarse para la protección contra las heladas, pero son mejores los sistemas diseñados específicamente para la protección contra las heladas (Rogers y Modlibowska, 1961; Raposo, 1979). Los sistemas deben estar

colocados durante la estación entera de heladas. Una vez colocados y en funcionamiento durante una noche de helada, el sistema no debe moverse. Generalmente, la uniformidad de la distribución se mejora utilizando un espaciamiento triangular más que uno rectangular. Los sistemas diseñados para el riego, más que para la protección contra las heladas, pueden usarse procurando que la uniformidad sea buena y que la tasa de precipitación sea la adecuada. En la mayoría de los casos, los cabezales de los aspersores deberían montarse a 0,3 m o más altos por encima de la parte superior de la cubierta vegetal para prevenir que las plantas bloqueen la vaporización. Para la protección contra las heladas, normalmente se utilizan muelles especialmente diseñados, que están protegidos para prevenir que se ponga hielo en los cabezales. Los filtros de limpieza se necesitan para estar seguros de que el sistema funciona correctamente, especialmente cuando se utiliza agua de ríos o de una laguna.

Pueden utilizarse sistemas de aspersores portátiles con los cabezales saliendo justo por encima de la parte superior de la cubierta vegetal para cultivos de crecimiento bajo como las fresas. Para los árboles de hoja caduca y las viñas, se usan sistemas de aspersión permanente con tuberías de subida tanto galvanizadas como de cloruro de polivinilo (PVC) que permiten disponer de los cabezales justo por encima de la parte superior de la cubierta vegetal. Postes de madera permiten dar apoyo a las tuberías de subida. Las presiones de los cabezales de aspersión son normalmente de 380 a 420 kPa con menos de una 10% de variación.

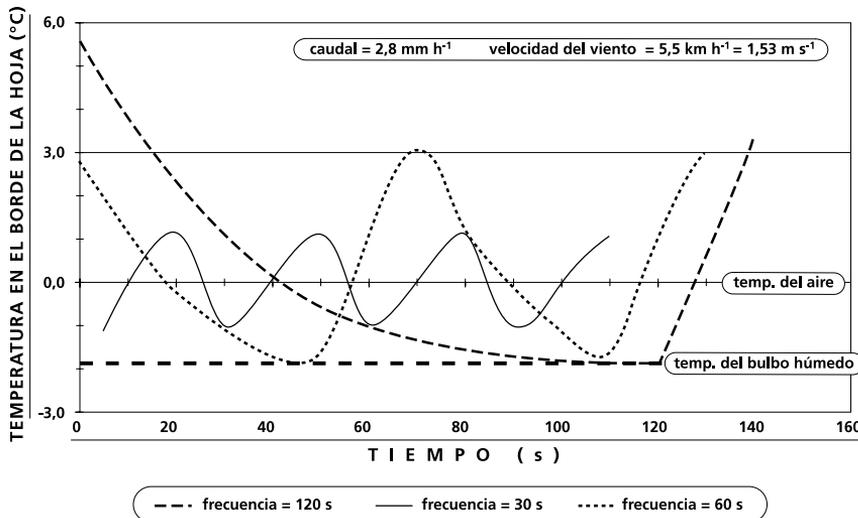
Puesta en marcha y parada

La puesta en marcha y parada de los aspersores para la protección contra las heladas depende de la temperatura y de la humedad en la plantación frutal. Cuando un sistema de aspersión se pone inicialmente en marcha, la temperatura del aire caerá; sin embargo, la temperatura del aire no caerá por debajo de la temperatura de las gotas de agua y normalmente subirá de nuevo una vez se empiece a congelar y a liberar calor latente.

El efecto de la aplicación de aspersores giratorios sobre las plantas está ilustrado en la Figura 7.10, que muestra la respuesta de la temperatura del borde la hoja a la humectación por los aspersores cada 120, 60 o 30 segundos (basado en Wheaton y Kidder, 1964). Entre las humectaciones, ocurre la evaporación (o sublimación) y el cambio de fase de líquido o hielo a vapor de agua convierte el calor sensible a calor latente. La extracción del calor sensible causa la caída de la temperatura del tejido húmedo de la planta. Como el tejido de la planta está húmedo, la temperatura caerá tan baja como la temperatura del bulbo húmedo.

FIGURA 7.10

Cambios en la temperatura del borde de la hoja cuando se humedece por un sistema de aspersión aplicando agua a $2,8 \text{ mm h}^{-1}$ con tasas de rotación de 120, 60 y 30 s, temperatura del aire cerca de $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, una temperatura del bulbo húmedo próxima a $-2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y una velocidad del viento cercana a los $5,5 \text{ km h}^{-1}$ (según Wheaton y Kidder, 1964)



Si la temperatura del punto de rocío (humedad) es baja, entonces la temperatura del bulbo húmedo puede ser considerablemente más baja que la temperatura del aire, por ello la temperatura del tejido húmedo de la planta puede caer por debajo de la temperatura del aire y causar daño si el agua aplicada es insuficiente. También si el ritmo de rotación es demasiado lento o si los aspersores se detienen demasiado pronto, las temperaturas pueden caer por debajo de la temperatura crítica de daño y causar daño.

En la literatura más antigua sobre el uso de los aspersores sobre las plantas, era normal advertir contra una caída brusca de la temperatura cuando se ponen en marcha los aspersores durante condiciones de punto de rocío bajo. Bajo condiciones de temperatura de punto de rocío baja y con viento cuando la temperatura del aire es relativamente alta (e.g. 10 a $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$), la evaporación de las gotas causa la caída rápida de la temperatura de las gotas de agua y también la del aire, cuando los aspersores se ponen en marcha. Sin embargo, la temperatura de las gotas de agua cae normalmente cerca de los $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ conforme pasan de los cabezales de los aspersores a las superficies de las plantas. Consecuentemente, no hay razón para que la temperatura del aire caiga por debajo de $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ cuando los

aspersores se ponen en marcha. Como se muestra en la Figura 7.10, la temperatura de la superficie de las plantas caerá por debajo de los 0 °C conforme el agua sublima en la superficie de las plantas. Pero la temperatura aumenta de nuevo cuando golpea de nuevo una gota de agua líquida.

Como las temperaturas críticas de daño (T_c) son algo cuestionables y como se basan más en las temperaturas de las plantas secas que en las húmedas, puede ser prudente poner en marcha los aspersores cuando la temperatura del bulbo húmedo es un poco más alta que T_c . Poner en marcha los aspersores cuando la temperatura del bulbo húmedo alcanza los 0 °C es menos arriesgado y puede ser prudente si no hay falta de agua y el encharcamiento y la carga del hielo no son un problema.

Incluso si el Sol está brillando sobre las plantas y la temperatura del aire está por encima de los 0 °C, los aspersores no deberían pararse a menos que la temperatura del bulbo húmedo contra el viento desde el cultivo esté por encima de T_c . Si el encharcamiento del suelo o la falta de agua no son problemas, permitir que la temperatura del bulbo húmedo exceda de 0 °C antes de detener los aspersores añade una medida extra de seguridad.

La temperatura del bulbo húmedo puede medirse directamente con un psicrómetro o puede deducirse a partir de la temperatura del punto de rocío y de la temperatura del aire. Para las medidas directas, una mecha de algodón en el termómetro del bulbo húmedo se humedece con agua destilada o desionizada y se ventila hasta que la temperatura del termómetro del bulbo húmedo se estabiliza. La ventilación se consigue agitando un psicrómetro con tirador o haciendo viento con un ventilador eléctrico utilizando un psicrómetro aspirado (Figura 3.9). Si la temperatura registrada está por debajo de los 0 °C, el agua de la mecha puede congelarse. Entonces la temperatura observada se denomina temperatura del “bulbo congelado” más que temperatura del bulbo húmedo. Sin embargo, hay poca diferencia entre la temperatura del bulbo congelado y la temperatura del bulbo húmedo en el intervalo importante para la protección contra las heladas.

Más que un psicrómetro con tirador o uno de aspirado con un termómetro de bulbo húmedo ventilado, puede utilizarse un termómetro sencillo con una mecha de algodón humedecida y sin ventilación para tener una aproximación de la temperatura del bulbo húmedo. Sin embargo, siempre que sea posible, es mejor ventilar la mecha de algodón con un ventilador. Se puede utilizar como mecha un cordón de algodón que se ajuste perfectamente al bulbo del termómetro.

Si se decide no medir el bulbo húmedo contra el viento desde el cultivo, una alternativa es utilizar la temperatura del punto de rocío de un servicio meteorológico o de una medida. Los sensores de punto de rocío son caros, pero un método sencillo es utilizar un cubo brillante, agua, sal y hielo (Figura 7.11).

FIGURA 7.11

Un método sencillo para estimar la temperatura del punto de rocío

Añada lentamente cubos de hielo al agua en un cubo brillante para disminuir su temperatura. Agitar el agua con un termómetro mientras se añaden los cubos de hielo para asegurar la misma temperatura del cubo y del agua. Cuando se produce la condensación en la parte exterior del cubo hay que anotar la temperatura del punto de rocío.

En primer lugar hay que poner algo de agua salada en un cubo brillante. A continuación añadir cubos de hielo en el cubo mientras se agita la mezcla con el termómetro. Vigilar el exterior del cubo para ver cuando se condensa el rocío (o depósitos de hielo) sobre la superficie. Si no hay condensación o deposición, añade más hielo y sal para conseguir una temperatura más baja. Cuando se ve depositar hielo, lee inmediatamente la temperatura del termómetro. El registro del termómetro es la temperatura “del punto de hielo”, que es un poco más alta, pero cercana, a la temperatura del punto de rocío. Encender una linterna sobre la superficie del cubo ayudará a ver la formación de hielo y leer el termómetro. Este método es menos preciso que utilizar un higrómetro de punto de rocío, pero a menudo es suficientemente preciso para determinar la temperatura de puesta en marcha y parada de los aspersores.

En la mayoría de la literatura sobre el uso de aspersores para la protección contra las heladas, las temperaturas del aire para poner en marcha y detener los aspersores se determinan con relación a las temperaturas del punto de rocío y del bulbo húmedo. En realidad, deberían basarse en las temperaturas del punto de formación de hielo y del bulbo congelado ya que las plantas cubiertas con hielo son más comunes que las plantas cubiertas de agua a temperaturas bajo cero. Sin embargo, una Tabla de las temperaturas del aire correspondientes a temperaturas del punto de rocío y temperatura del bulbo húmedo bajo cero es casi idéntica a la Tabla de temperaturas del aire correspondientes a las temperaturas del punto

de formación de hielo y del bulbo congelado. Por tanto sólo la temperatura del punto de rocío y la temperatura del bulbo húmedo se utilizan en la Tabla 7.5, para evitar confusión en la práctica corriente.

Para utilizar la Tabla 7.5, localice la temperatura del bulbo húmedo (T_w) en la fila superior que es más grande o igual que la temperatura crítica de daño (T_c) para el cultivo. A continuación localice la temperatura del punto de rocío (T_d) en la parte izquierda de la columna y encuentre la temperatura del aire que corresponde en la Tabla. Asegúrese de que los aspersores estén funcionando antes de que la temperatura del aire medida contra el viento desde el cultivo caiga a la temperatura del aire seleccionada. Los valores en la Tabla 7.5 son para el nivel del mar, pero son razonablemente precisos hasta los 500 m de elevación. Para una mayor precisión a elevaciones más altas, el programa SST.xls, que se incluye con este libro, hace estos cálculos y puede utilizarse para determinar con exactitud las temperaturas para poner en marcha y detener para cualquier entrada de la elevación.

Cuando se utiliza una alarma contra las heladas, establecer la alarma $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ más alto que la temperatura del aire para poner en marcha los aspersores identificada en la Tabla 7.5 para asegurar el tiempo suficiente para poner en marcha los aspersores. Si la puesta en marcha de los aspersores está automatizada con un termostato, la temperatura de puesta en marcha debería fijarse $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ más alta que la temperatura del aire de puesta en marcha de la Tabla 7.5, dependiendo de la precisión del termostato.

Si únicamente se dispone de la humedad relativa y de la temperatura del aire, entonces utilice la Tabla 7.6 para estimar la temperatura del punto de rocío. Entonces use la temperatura del punto de rocío y la temperatura del bulbo húmedo elegida correspondiente a la temperatura crítica de daño para decidir la temperatura del aire para poner en marcha y detener los aspersores.

Para los que prefieren utilizar ecuaciones para estimar las temperaturas del aire de puesta en marcha y detención, la presión de vapor (e_d en kPa) a la temperatura del punto de rocío (T_d en $^{\circ}\text{C}$) se estima a partir de la temperatura del bulbo húmedo (T_w en $^{\circ}\text{C}$) como:

$$e_d = e_w - 0,000660 (1 + 0,00115T_w) (T_d - T_w) P_b \quad \text{kPa} \quad \text{Ec. 7.2}$$

donde la presión de vapor a saturación a la temperatura del bulbo húmedo es:

$$e_w = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T_w}{T_w + 237,3} \right) \text{ kPa} \quad \text{Ec. 7.3}$$

TABLA 7.5

Temperaturas (°C) mínimas del aire para poner en marcha y parar para la protección contra las heladas con aspersores como una función de la temperatura del bulbo húmedo y del punto de rocío (°C) al nivel medio del mar

TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCÍO °C	TEMPERATURA DEL BULBO HUMEDO (°C)						
	-3,0	-2,5	-2,0	-1,5	-1,0	-0,5	0,0
0,0							0,0
-0,5						-0,5	0,3
-1,0					-1,0	-0,2	0,6
-1,5				-1,5	-0,7	0,1	1,0
-2,0			-2,0	-1,2	-0,4	0,4	1,2
-2,5		-2,5	-1,7	-0,9	-0,1	0,7	1,5
-3,0	-3,0	-2,2	-1,4	-0,6	0,2	1,0	1,8
-3,5	-2,7	-2,0	-1,2	-0,4	0,4	1,3	2,1
-4,0	-2,5	-1,7	-0,9	-0,1	0,7	1,5	2,3
-4,5	-2,2	-1,4	-0,7	0,1	1,0	1,8	2,6
-5,0	-2,0	-1,2	-0,4	0,4	1,2	2,0	2,8
-5,5	-1,7	-1,0	-0,2	0,6	1,4	2,2	3,1
-6,0	-1,5	-0,7	0,1	0,9	1,7	2,5	3,3
-6,5	-1,3	-0,5	0,3	1,1	1,9	2,7	3,5
-7,0	-1,1	-0,3	0,5	1,3	2,1	2,9	3,7
-7,5	-0,9	-0,1	0,7	1,5	2,3	3,1	3,9
-8,0	-0,7	0,1	0,9	1,7	2,5	3,3	4,1
-8,5	-0,5	0,3	1,1	1,9	2,7	3,5	4,3
-9,0	-0,3	0,5	1,3	2,1	2,9	3,7	4,5
-9,5	-0,1	0,7	1,5	2,2	3,1	3,9	4,7
-10,0	0,1	0,8	1,6	2,4	3,2	4,0	4,9

NOTA: Seleccione una temperatura del bulbo húmedo que esté por encima de la temperatura crítica de daño para el cultivo y localice la columna apropiada. A continuación escoja la hilera con la temperatura correcta del punto de rocío y lea la temperatura del aire correspondiente de la Tabla para abrir o cerrar los aspersores. Esta Tabla es para el nivel medio del mar, que debería ser razonablemente precisa hasta unos 500 m de elevación.

TABLA 7.6

Temperatura del punto de rocío (°C) correspondiente a la temperatura del aire y a la humedad relativa

HUMEDAD RELATIVA (%)	TEMPERATURA DEL AIRE (°C)							
	-2,0	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
100	-2,0	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0	12,0
90	-3,4	-1,4	0,5	2,5	4,5	6,5	8,4	10,4
80	-5,0	-3,0	-1,1	0,9	2,8	4,8	6,7	8,7
70	-6,7	-4,8	-2,9	-1,0	1,0	2,9	4,8	6,7
60	-8,7	-6,8	-4,9	-3,0	-1,2	0,7	2,6	4,5
50	-11,0	-9,2	-7,3	-5,5	-3,6	-1,8	0,1	1,9
40	-13,8	-12,0	-10,2	-8,4	-6,6	-4,8	-3,0	-1,2
30	-17,2	-15,5	-13,7	-12,0	-10,2	-8,5	-6,8	-5,0
20	-21,9	-20,2	-18,6	-16,9	-15,2	-13,6	-11,9	-10,2
10	-29,5	-27,9	-26,4	-24,8	-23,3	-21,7	-20,2	-18,6

NOTA: Seleccione una humedad relativa en la columna izquierda y la temperatura del aire en la fila superior. Entonces encuentre la correspondiente temperatura del punto de rocío en la Tabla.

y la presión barométrica (P_b) como una función de la elevación (E_L) en metros es:

$$P_b = 101,3 \left[\frac{293 - 0,0065 E_L}{293} \right]^{5,26} \text{ kPa} \quad \text{Ec. 7.4}$$

Entonces, la correspondiente temperatura del aire (T_a) puede calcularse como:

$$T_a = T_w + \frac{e_w - e_d}{0,00066 (1 + 0,00115 T_w) P_b} \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 7.5}$$

donde la presión de vapor a saturación a la temperatura del punto de rocío es:

$$e_d = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T_d}{T_d + 237,3} \right) \text{ kPa} \quad \text{Ec. 7.6}$$

Requerimientos de caudales de aplicación

Los requerimientos de tasas de aplicación para la aspersión sobre planta con aspersores convencionales dependen de la velocidad de rotación, de la velocidad del viento y de la temperatura mínima no protegida. Cuando la velocidad del viento es más alta, hay más evaporación, y unas pérdidas de calor sensible más altas desde las superficies de las plantas. Por ello debe congelarse más agua para compensar estas pérdidas. Cuando la temperatura mínima no protegida es más baja, entonces se necesita más energía del proceso de congelación para compensar el déficit de calor sensible. La velocidad de rotación del aspersor es importante porque la temperatura de las partes de la planta humedecidas sube cuando el agua se congela, pero cae conforme el agua se vaporiza y las pérdidas radiativas continúan entre los pulsos de agua que golpean a las plantas (Figura 7.10).

Se necesita mojar con frecuencia un cultivo para reducir el intervalo de tiempo cuando la temperatura de la planta cae por debajo de $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Figura 7.10). Generalmente, la velocidad de rotación no debería ser superior a los 60 segundos y mejor si son 30 segundos. Por ejemplo, las recomendaciones, ampliamente utilizadas, de caudales de aspersión para viñas para velocidades del viento de $0,0$ a $0,5 \text{ m s}^{-1}$ (Tabla 7.7) y para velocidades del viento de $0,9$ a $1,4 \text{ m s}^{-1}$ (Tabla 7.8) dependen de la velocidad de rotación de aspersor y de la temperatura mínima así como de la velocidad del viento. Gerber y Martsolf (1979) presentaron un modelo teórico de caudales de aspersión para la protección de una hoja de árbol de 20 mm de diámetro. Utilizando este modelo, una ecuación sencilla empírica que da casi el mismo caudal de aspersor (R_A) viene dado por:

$$R_A = (0,0538 u^2 - 0,5404 u - 0,4732) T_l \quad \text{mm h}^{-1} \quad \text{Ec. 7.7}$$

donde u (m s^{-1}) es la velocidad del viento y T_l ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura de una hoja seca sin proteger.

Utilizando la aproximación descrita por Campbell y Norman (1998), la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura de una hoja de 0,02 m diámetro en una noche de helada típica, con una resistencia estomática alta, puede estimarse como:

$$T_a - T_l = 1,4458 u^{-0,4568} \text{ } ^{\circ}\text{C} \quad \text{Ec. 7.8}$$

para $0,1 \leq u \leq 5 \text{ m s}^{-1}$. Combinando las dos ecuaciones, una ecuación sencilla para el caudal del aspersor en términos de la velocidad del viento (u) en m s^{-1} y la temperatura del aire (T_a) en $^{\circ}\text{C}$ viene dada por:

$$R_A = (T_a - 1,4458 u^{-0,4568}) (0,0538 u^2 - 0,5404 u - 0,4732) \text{ mm h}^{-1} \quad \text{Ec. 7.9}$$

A efectos prácticos, la velocidad del viento utilizada en la ecuación 7.9 debería estar entre 0,5 y 5 m s^{-1} . Una cantidad a aplicar adicional debería añadirse al resultado de la ecuación 7.10 para asegurarse una buena humectación de las hojas. La cantidad adicional varía desde aproximadamente 0 mm h^{-1} para sistemas de aspersión con cobertura uniforme sobre un cultivo con una cubierta dispersa hasta los 2,0 mm h^{-1} para cubiertas con un follaje denso y/o con una cobertura de aspersión menos uniforme.

Las tasas de aplicación generadas por la ecuación 7.9, con las correcciones que permiten asegurar una humectación adecuada, caen en el intervalo de las tasas de aplicación recomendadas para los cultivos altos en la Figura 7.12. Los valores de las Tablas 7.7 y 7.8 para viñedos altos también caen dentro de los intervalos de las tasas de aplicación en la Figura 7.12. Las tasas de aplicación son menores para los cultivos bajos ya que hay menos área superficial a cubrir, entonces tiende a haber menos evaporación y es más fácil obtener una humectación uniforme de la vegetación cuando es más bajo (Figura 7.13). Las tasas en la Figura 7.13 son típicas para fresas y tasas ligeramente más altas se aplican para patatas y tomates. Otros cultivos de tamaño intermedio tienen tasas entre las mostradas en las Figuras 7.12 y 7.13.

La eficacia de los aspersores depende principalmente de la tasa de evaporación, que está fuertemente influenciada por la velocidad del viento. Sin embargo, la temperatura mínima es una indicación del déficit de calor sensible en el aire, y por ello se necesita también una tasa de aplicación más alta si la temperatura mínima es baja. Si hay una mezcla clara de líquido-hielo cubriendo las plantas y el agua gotea desde el hielo, entonces la tasa de aplicación es suficiente para prevenir el

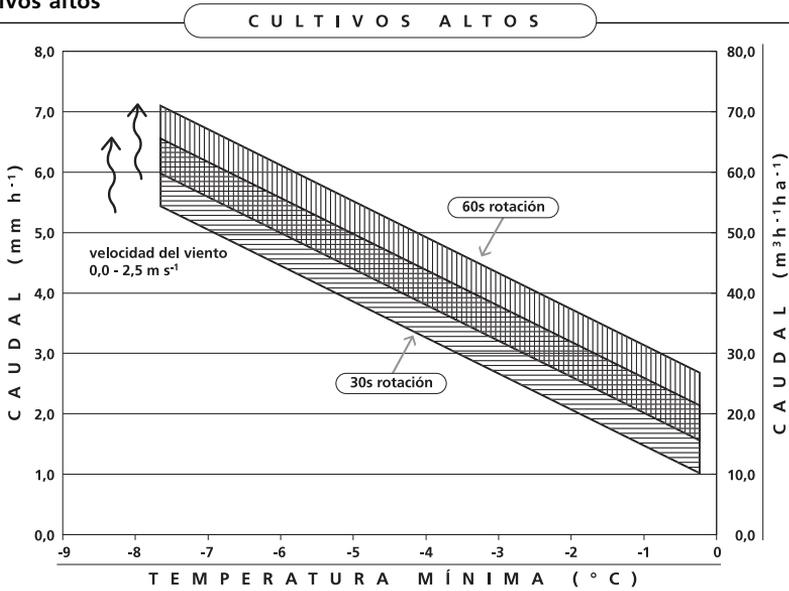
TABLA 7.7

Tasas de aplicación de aspersores convencionales sobre planta para la protección de viñas basadas en la temperatura mínima y la velocidad de rotación para velocidades del viento de 0,0 a 0,5 m s⁻¹ (según Schultz y Lider, 1968)

TEMPERATURA	ROTACION DE 30 s	ROTACION DE 60 s	ROTACION DE 30 s	ROTACION DE 60 s
°C	mm h ⁻¹	mm h ⁻¹	litros min ⁻¹ ha ⁻¹	litros min ⁻¹ ha ⁻¹
-1,7	2,0	2,5	333	417
-3,3	2,8	3,3	467	550
-5,0	3,8	4,3	633	717

FIGURA 7.12

Cultivos altos



Requerimientos de tasas de aplicación de aspersores convencionales por encima de las plantas para la protección contra las heladas de cultivos altos con tasas de rotación de los cabezales de 30 s (sombreado vertical) y 60 s (sombreado horizontal). Intervalos de velocidad del viento desde 0,0 m s⁻¹ en la parte inferior hasta 2,5 m s⁻¹ en la parte superior.

daño. Si se congela toda el agua y tiene una apariencia lechosa blanca como escarcha, entonces la tasa de aplicación es demasiado baja para las condiciones meteorológicas. Si el caudal es insuficiente para cubrir adecuadamente todo el follaje, entonces puede producirse daño en partes de las plantas que no están adecuadamente humedecidas. Por ejemplo, los árboles pueden sufrir poco daño

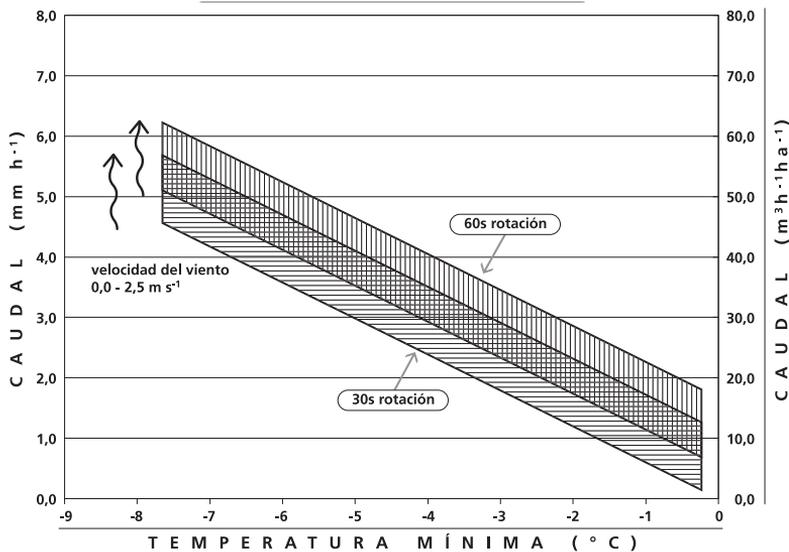
TABLA 7.8

Tasas de aplicación de aspersores convencionales sobre planta para la protección de viñas basadas en la temperatura mínima y velocidad de rotación para velocidades del viento de 0,9 a 1,4 m s⁻¹ (según Schultz y Lider, 1968)

TEMPERATURA	ROTACION DE 30 s	ROTACION DE 60 s	ROTACION DE 30 s	ROTACION DE 60 s
°C	mm h ⁻¹	mm h ⁻¹	litros min ⁻¹ ha ⁻¹	litros min ⁻¹ ha ⁻¹
-1,7	2,5	3,0	417	500
-3,3	3,3	3,8	550	633
-5,0	4,6	5,1	767	850

FIGURA 7.13

Cultivos bajos



Requerimientos de tasas de precipitación de aspersores convencionales sobre planta para la protección contra las heladas de cultivos bajos con tasas de rotación de los cabezales de 30 s (sombreado vertical) y 60 s (sombreado horizontal). Intervalos de velocidad del viento desde 0,0 m s⁻¹ en la parte inferior a los 2,5 m s⁻¹ en la parte superior.

en las ramas superiores mientras que el daño ocurre en las ramas más bajas donde las yemas, las inflorescencias, las frutas o los frutos secos no se han humedecido adecuadamente. Conforme las condiciones empeoran, más daño ocurrirá. Bajo condiciones de viento, y alta evaporación, las tasas de aplicación inadecuadas pueden producir más daño que si no se usan los aspersores.

Aspersores de caudal variable

Para la mayoría de agricultores, la selección de la tasa de precipitación de un aspersor se realiza una sola vez y cuando se ha instalado el sistema ya no es fácil cambiarla. La mayoría de sistemas se han diseñado para aplicar la cantidad necesaria para las peores condiciones en una región. Esto conduce a una aplicación en exceso en las noches en las que las condiciones son menos graves. Para evitar este problema, algunos agricultores diseñan sistemas con cabezales que se puedan cambiar para permitir tasas de aplicación más altas o más bajas. Además, se han estudiado extensivamente (Gerber y Martsolf, 1979; Proebsting, 1975; Hamer, 1980) aspersores con caudal variable, que se abren o se cierran, como un método para reducir las tasas de aplicación. Por ejemplo, utilizando un sistema de aspersión de caudal variable automatizado, Hamer (1980) obtuvo una protección eficiente durante una noche de helada utilizando únicamente la mitad de la cantidad normal de agua. El agua se aplicó cada vez que la temperatura de un sensor electrónico colocado en una plantación frutal imitando una yema de una planta caía a -1 °C. Sin embargo, observó que, debido a la aplicación no uniforme, la colocación del sensor de temperatura fue crítica. Además, al final de largos periodos de protección contra las heladas, la acumulación de hielo disminuía la respuesta de temperatura del sensor y conducía a aplicaciones excesivas de agua. Más que medir la temperatura de un sensor cubierto de hielo, NZAEI (1987) aplicó aspersión por pulsos durante un minuto si y otro no, cada vez que la temperatura mínima medida por un sensor expuesto a 1,0 m en un área no protegida estaba por encima de $-2,0$ °C y hacía funcionar los aspersores continuamente para las temperaturas más bajas. Ello resultó en un ahorro del 18% de agua durante una estación. Un modelo para predecir los requerimientos de caudal para sistemas de aspersión con tasas variables (i.e. pulsos) se publicó en Kalma *et al.* (1992). Un artículo reciente de Koc *et al.* (2000) reportó que se habían obtenido ahorros de hasta el 75% de agua haciendo circular agua de forma alterna con solenoides durante la aspersión sobre los árboles para la protección contra las heladas de una plantación de manzanos. Se utilizaron parámetros ambientales y temperaturas de yemas para modelizar los periodos en los que se aplicaba o no agua.

Aspersores de bajo volumen (dirigidos)

Se ha publicado que el uso de un micro-aspersor sobre planta por árbol proporciona una buena protección con el uso de menos agua en el sudeste de los EE.UU. (Powell y Himelrick, 2000). Sin embargo, observaron que los costes de instalación son altos y el método no ha sido ampliamente aceptado por los

agricultores. Evans (2000) publicó que un micro-aspersor sobre planta por árbol reducirá el requerimiento de la tasa de aplicación de entre 3,8 y 4,6 mm h⁻¹ para los aspersores convencionales a entre 2,8 y 3,1 mm h⁻¹ para el área de superficie cubierta por los árboles. Sin embargo, bajo condiciones de viento, se pueden necesitar tasas tan altas como 5,6 mm h⁻¹ para proteger las plantaciones frutales.

Jorgensen *et al.* (1996) investigó el uso de micro-aspersores dirigidos sobre planta para la protección contra las heladas de los viñedos para uva de mesa. Evaluaron la acción de aplicar pulsos que produce gotas de diámetro grande mientras se mantienen tasas de aplicación más bajas, comparado con lo encontrado en diseños de micro-aspersores convencionales. El micro-aspersor aplica una banda de agua de aproximadamente 0,6 m de ancho dirigida sobre la hilera de vides. Los micro-aspersores se instalaron en cada hilera de viña un medio metro por encima del cordón en cada dos estacas del emparrado (o espaldera), con aproximadamente 3,6 m entre cabezales. El sistema dirigido se comparó con un sistema de aspersión de impacto convencional con espaciamiento de 15,6 m por 12,8 m utilizando boquillas de 2,78 mm de diámetro. El sistema dirigido proporcionó ahorros del 80% de agua; sin embargo, no hubo heladas graves durante el experimento de dos años.

Los aspersores dirigidos se utilizaron para proteger viñedos en zonas de mayor altitud (820 m) en el norte de California (EE.UU.) y los resultados fueron prometedores. En esta localidad, había escasez de agua, lo que obligó al viticultor a buscar una alternativa a los aspersores sobre planta convencionales. El sistema de bajo volumen aplicó aproximadamente 140 l min⁻¹ ha⁻¹ comparado con el sistema convencional del viticultor con una aplicación de 515 a 560 l min⁻¹ ha⁻¹. Durante el primer año del ensayo, la temperatura más baja observada fue de -3,9 °C, pero no se observaron diferencias en las cargas del cultivo o en el peso de las podas entre los bloques de protección convencional y de bajo volumen. En el segundo año, las temperaturas del aire cayeron hasta -5,8 °C en una noche, que fue lo bastante baja para que algunos de los cabezales de los aspersores se congelaran y pararan de girar. Aunque hubo una considerable carga de hielo, el viticultor observó que las pérdidas por daño debido a las heladas fueron similares en ambos bloques de protección. El sistema de aspersión de bajo volumen se diseñó para aplicar el agua directamente sobre las hileras de viña y poca se aplicó en el suelo entre las hileras. El viticultor señaló que era importante orientar los cabezales de los aspersores que no giraban para obtener una cobertura uniforme de las hileras del viñado. También fue importante poner en marcha los aspersores cuando la temperatura del bulbo húmedo estaba por encima de los 0 °C y no parar hasta que la temperatura ascendió de nuevo por encima de los 0 °C.

Aspersión sobre cubiertas

La aspersión sobre cultivos protegidos en invernaderos y otras estructuras proporciona una protección considerable. De la misma manera que la aspersión sobre las plantas, la aplicación continuada de agua suficiente a las cubiertas de las plantas mantiene las cubiertas cerca de los 0 °C. La delgada capa de agua intercepta la radiación terrestre hacia arriba y radia hacia abajo a una temperatura de casi 0 °C, que es considerablemente más alta que la temperatura aparente del cielo. Como resultado la radiación neta sobre la cubierta vegetal es considerablemente más alta que la de una cubierta expuesta al cielo despejado. Hogg (1964), en un ensayo de dos años, publicó una protección promedio de 2,4 °C utilizando riego por aspersión sobre una estructura Holandesa (i.e. con cubierta de vidrio). Durante las noches más frías, la protección estuvo más cerca de los 4,5 °C. Sin embargo, la tasa de precipitación de 7,3 mm h⁻¹ es alta. El uso de aspersores en invernaderos con cubiertas de plástico de 0,2 mm de grosor mantuvo las temperaturas dentro hasta los 7,1 °C más que las temperaturas bajo cero que se registraron en el exterior (Pergola, Ranieri y Grassotti, 1983). En relación con un invernadero de plástico idéntico que fue calentado a la misma diferencia de temperatura, los aspersores ahorraron hasta un 80% en costes de energía. Los aspersores funcionaron intermitentemente y las de precipitación medias en las noches más frías fueron cercanas a los 10 mm h⁻¹, que es una tasa elevada. Sin embargo, se necesita más investigación para determinar si son posibles tasas de precipitación más bajas y para estudiar los efectos de la calidad del agua sobre el plástico. Como la superficie a cubrir es menor, la tasa de precipitación debería ser similar o posiblemente menor que la utilizada sobre las cubiertas de cultivos altos. Sin embargo, esto necesita de estudios posteriores. El uso de aspersores sobre invernaderos de plástico también se ha utilizado en el Sur de Portugal con resultados positivos (Abreu, 1985).

Aspersores por debajo de las plantas

Los aspersores bajo los árboles se usan normalmente para la protección contra las heladas de los árboles de hoja caduca en las regiones donde las temperaturas mínimas no son demasiado bajas y donde sólo se necesitan unos pocos grados de protección. Además del bajo coste de funcionamiento, también se puede utilizar el sistema para el riego, con menos problemas por enfermedades, por ello tienen algunas ventajas con relación a los aspersores sobre planta. Además, la rotura de los limbos debido a la carga del hielo y al fallo del sistema de aspersión no es un problema con los sistemas de aspersión bajo planta. En los sistemas de aspersión bajo planta se necesitan tasas de aplicación más bajas (2,0 a 3,0 mm h⁻¹). La

protección que ofrecen depende de la gravedad de la helada nocturna y de las tasas de aplicación. Por ejemplo, Anconelli *et al.* (2002) encontraron pocas diferencias beneficiosas entre las tasas de aplicación y los tipos de cabezales de aspersión para temperatura mínimas por encima de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por debajo de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, un flujo de salida de 65 l h^{-1} dio un mejor comportamiento que uno de 45 l h^{-1} .

Cuando se utilizan aspersores bajo planta, el principal objetivo es mantener la temperatura de la superficie humedecida cerca de los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. La protección proviene parcialmente del aumento de radiación de la superficie cubierta de líquido-hielo, que está más caliente que la superficie no protegida. En una plantación frutal no protegida, la temperatura del aire es generalmente más fría (i.e. a menudo más baja de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) cerca de la superficie y aumenta con la altura. Como el funcionamiento del aspersor aumenta la temperatura de la superficie hasta casi los $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, el aire cercano a la superficie también está más caliente que en un cultivo sin protección. El aire más caliente cerca de la superficie crea inestabilidad atmosférica cerca del suelo y causa un flujo de calor sensible hacia arriba para calentar el aire y las plantas. Además, el contenido de vapor de agua del aire en la plantación frutal aumenta por el funcionamiento del aspersor y la condensación o la sublimación del vapor de agua en las superficies frías de las plantas que liberan algo de calor latente y proporcionan protección.

La eficacia de los aspersores depende de nuevo de la tasa de evaporación, que aumenta con la velocidad del viento. La mejor manera de analizar nuestro sistema es hacer funcionar los aspersores durante varias condiciones de congelación durante la dormancia para identificar las condiciones en que se congela toda el agua. Si el suelo se cubre con una mezcla líquido-hielo y la temperatura de la superficie está a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, la tasa de aplicación es adecuada. Si se congela toda el agua y la temperatura de la superficie cae por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, entonces la tasa de aplicación es demasiado baja para esas condiciones. Hay que tener cuidado en evitar humedecer las ramas más bajas de los árboles.

Aspersores de rotación convencionales

Perry (1994) sugirió que cabe esperar aumentos de temperatura de entre $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta una altura de unos $3,6\text{ m}$ durante una helada típica de radiación cuando se usan aspersores giratorios bajo planta. Evans (2000) indica que aumentos de la temperatura hasta casi $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ son posibles a $2,0\text{ m}$ de altura en una plantación frutal protegida con agua fría. Connell y Snyder (1988) encontraron un aumento de casi $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $2,0\text{ m}$ de altura en una plantación protegida de almendros con un sistema de aspersión con cabezales giratorios más que los aspersores de impacto. La temperatura del agua que salía de los cabezales de aspersión era de unos $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la

tasa de aplicación era de 2,0 mm h⁻¹. Los sistemas de aspersión típicos bajo planta utilizan cabezales de 2,0 a 2,4 mm de diámetro, de baja trayectoria con una presión de 276 a 345 kPa y tasas de aplicación entre 2,0 y 3,0 mm h⁻¹.

Una vez en marcha, los aspersores deberían funcionar continuamente sin interrupción. Si el suministro de agua es limitado, hay que regar las áreas más dadas a las heladas o las áreas contra el viento desde plantaciones frutales no protegidas. Es mejor concentrar el agua en áreas que necesitan más protección que aplicar poca agua sobre un área más grande. Una buena uniformidad de aplicación mejora la protección. Los sistemas de aspersión que se trasladan a mano no se pueden parar y moverse durante una noche de helada. Sin embargo, bajo condiciones de helada moderada ($T_n > -2,0$ °C), las líneas de aspersores pueden colocarse cada dos hileras más que en cada hilera para cubrir un área más grande. Para heladas entre moderadas y severas, puede ser necesario un espaciamiento más cercano entre las líneas de aspersores.

Varios investigadores (Perry, 1994) han recomendado que tener un cultivo de cobertura es beneficioso para la protección cuando se utilizan aspersores bajo los árboles para la protección contra las heladas. Esta recomendación esta basada parcialmente en la idea que la presencia de un cultivo de cobertura proporciona más área superficial para que se congele encima el agua y conseguir que se libere más calor (Perry, 1994; Evans, 2000) y parcialmente en la idea que la altura de la mezcla líquido-hielo y con ello la altura donde la temperatura de la superficie se mantiene a 0 °C se eleva más cerca de las flores de los árboles, a las yemas o a los frutos que están siendo protegidos (Rossi *et al.*, 2002). La dificultad de tener un cultivo de cobertura es que, aunque pueda haber una protección adicional cuando se utiliza el sistema, también es más probable que se necesite más protección activa si un cultivo de cobertura esta presente. Donde los recursos de agua y de energía están limitados y las heladas son poco frecuentes, puede ser prudente eliminar el cultivo de cobertura y reducir la necesidad de protección activa. En climas donde las heladas son más frecuentes y existen recursos adecuados para hacer funcionar los aspersores bajo planta, se puede mejorar la protección manteniendo un cultivo de cobertura. Sin embargo, el consumo de energía y de agua aumentará.

Micro-aspersores

En los últimos años, los micro-aspersores bajo planta se han hecho populares para el riego entre los agricultores y a continuación ha venido el interés de su utilización para la protección contra las heladas. Rieger, Davies y Jackson (1986) publicaron sobre el uso de micro-aspersores con tasas de aplicación de 38, 57 y 87 l h⁻¹ por árbol y dos patrones de aplicación (90° y 360°) para la protección contra las

heladas de cítricos de dos años cuyos troncos también fueron envueltos con una lámina fina aislante forrada de fibra de vidrio. Los árboles estaban plantados en un marco de $4,6 \times 6,2$ m, por ello las tasas de aplicación equivalente fueron 218, 328 y $500 \text{ l min}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ o 1,3, 2,0 y $3,0 \text{ mm h}^{-1}$. En una noche cuando la temperatura cayó a $-12 \text{ }^\circ\text{C}$, los troncos de los árboles en los tratamientos regados estaban $1,0$ a $5,0 \text{ }^\circ\text{C}$ más altas que las temperaturas del control no regado. La diferencia de temperatura entre las tasas de aplicación 57 y 87 l h^{-1} fue insignificante, pero las temperaturas del tronco fueron un poco más altas que para la tasa de aplicación de 38 l h^{-1} . Sin embargo, incluso las temperaturas del tronco para el tratamiento de 38 l h^{-1} cayeron únicamente a $-2,5 \text{ }^\circ\text{C}$ cuando la temperatura del aire cayó hasta $-12 \text{ }^\circ\text{C}$, por ello, claramente, la combinación de micro-aspersores con envolturas de los troncos fue beneficiosa. Los autores también publicaron que el patrón de aplicación de 90° dio mejor protección que el patrón de 360° . No hubo diferencias que se pudieran medir entre las temperaturas del aire o la humedad entre los tratamientos regados y los no regados, pero la radiación de onda larga hacia arriba fue más alta en las parcelas regadas.

Se afronta más protección cubriendo con agua un área más grande; sin embargo, existe un beneficio adicional que viene del agua aplicada bajo las plantas donde la radiación y la convección son más beneficiosas que el agua aplicada entre las hileras del cultivo. Sin embargo, si se aplica la misma cantidad de agua sobre un área más grande, es probable que el hielo enfríe más que si el agua se concentra en un área más pequeña. De nuevo, la mejor práctica es suministrar el agua suficiente para cubrir la mayor área que sea posible y asegurarse que existe una mezcla líquido-hielo sobre superficie bajo las peores condiciones que es probable que ocurran.

Powell y Himelrick (2000) publicaron el uso exitoso de aspersores bajo los árboles con micro-aspersores en Alabama y Louisiana en mandarinos Satsuma. Su objetivo era encontrar un método que proporcionara una protección completa contra las heladas moderadas y la protección del tronco y de las ramas más bajas durante las heladas graves. La protección parcial durante heladas severas ayuda a los árboles dañados a recuperarse más rápidamente. Publicaron que dos alturas de aspersor por árbol (i.e. una a $0,75 \text{ m}$ y otra a $1,5 \text{ m}$), con una tasa de $90,8 \text{ l h}^{-1}$ por cabezal de aspersor, dio los mejores resultados.

Riego de bajo volumen (por goteo)

Los sistemas de riego de bajo volumen (por goteo) se utilizan a veces para la protección contra las heladas con resultados diversos. Cualquier beneficio de aplicar agua proviene principalmente del agua congelada sobre la superficie, que libera calor

latente. Sin embargo, si las tasas de evaporación son suficientemente altas, es posible que más energía pueda perderse para vaporizar el agua que se ha ganado por el proceso de congelación. Debido a la amplia variedad de componentes del sistema y de tasas de aplicación, es difícil generalizar sobre la eficacia de los sistemas de bajo volumen. De nuevo, la mejor aproximación es analizar el sistema durante la estación de dormancia y observar que ocurre bajo un intervalo de condiciones meteorológicas. Si el agua en la superficie del suelo es una mezcla líquido-hielo a 0 °C, entonces el sistema es beneficioso. Sin embargo, si toda el agua se congela y tiene una apariencia blanca lechosa, el sistema fue ineficiente para esas condiciones. Debería tenerse en cuenta que hacer funcionar un sistema de bajo volumen bajo condiciones de una helada severa puede dañar el sistema de riego. Si se calienta el agua se reducen los riesgos de daño y se proporciona más protección. Sin embargo, calentar el agua puede que no sea efectivo desde el punto de vista del coste.

Agua calentada

Davies *et al.* (1988) reportaron que el enfriamiento de una gota de agua al volar por el aire es el principal mecanismo de suministro de calor a las plantaciones frutales durante la aspersión bajo las plantas. Establecieron la hipótesis que el agua congelada sobre la superficie para liberar el calor latente de fusión proporciona poco calor sensible al aire (i.e. no eleva la temperatura del aire). Debido a la baja trayectoria de la aplicación bajo planta, la evaporación es reducida respecto a los sistemas sobre planta y calentar el agua previamente puede proporcionar algún beneficio para los aspersores bajo planta. Martsof (1989) aplicó agua calentada hasta 70 °C a través de un sistema micro-aspersor a una plantación de cítricos en Florida y encontró poco efecto en la temperatura de las hojas que estaban a 3 m de los cabezales de aspersión. Sin embargo, encontró un aumento de 4 °C en la temperatura de las hojas en las cubiertas densas de los árboles directamente por encima de los cabezales. En promedio, las subidas de temperatura variaron entre 1 °C y 2 °C dependiendo de la proximidad a los cabezales de los aspersores. Sin embargo, la eficiencia resultante de la utilización de un intercambiador de calor para calentar el agua y la resultante distribución uniforme de energía dentro de la plantación frutal se mejoró mucho sobre el uso de estufas como focos puntuales en plantaciones frutales. También, como la temperatura del agua es baja con relación a las temperaturas de las estufas, la fuerza de la inversión térmica es menos importante. Donde haya disponibilidad de energía que no sea cara y/o el agua sea limitada, recomiendan utilizar un sistema económico de calefacción para calentar el agua a unos 50 °C. Esto bajará la tasa de aplicación requerida por los fruticultores con suministros de agua inadecuados.

Cuando el agua es calentada hasta 50 °C, la energía liberada por enfriamiento hasta 0 °C y congelación es de 544 kJ kg⁻¹. Sin embargo, a 2,0 mm h⁻¹ la tasa de aplicación de agua a 50 °C da la misma cantidad de energía que una tasa de aplicación de 2,6 mm h⁻¹ a 20 °C si toda el agua es enfriada y congelada. Como la transferencia de calor sensible se ve favorecida por la transferencia de las gotas de agua más calientes al aire, calentar el agua subirá la temperatura del aire en el cultivo independientemente de las condiciones de la helada. Sin embargo, para los agricultores con un suministro adecuado de agua y con condiciones de heladas poco rigurosas a moderadas, es probablemente más efectivo desde el punto de vista del coste diseñar el sistema de aspersión con tasas de aplicación más altas para pagar los costes adicionales de los sistemas de calefacción, combustible y mano de obra. Sin embargo, el uso de agua calentada puede ser una alternativa útil para los agricultores con problemas de heladas importantes, con una fuente de energía de bajo coste o con un suministro de agua limitado. Evans (2000) estima un coste en el intervalo de 6 180 \$ a 8 650 \$ ha⁻¹ para un intercambiador de calor para calentar el agua con los aspersores bajo las plantas, que es equivalente a aproximadamente al doble del coste de los ventiladores.

RIEGO DE SUPERFICIE

Uno de los métodos más comunes de protección contra las heladas es aplicar directamente agua al suelo utilizando surcos, con tablares a nivel, o riego por inundación. La referencia Jones (1924), es la primera investigación conocida sobre el uso de agua en superficie, encontró un aumento de 1 °C en la temperatura del aire en cítricos regados con agua a 23 °C. En este método, el agua es aplicada al campo y el calor del agua es liberado al aire conforme se enfría. La temperatura del agua es importante ya que el agua más caliente liberará más calor al enfriarse. La protección es mejor en la primera noche después de la inundación y se vuelve menos eficiente conforme el suelo se va saturando. El agua puede aplicarse hasta que hay una sumersión parcial o total de las plantas tolerantes; sin embargo, las enfermedades fúngicas y la asfixia de las raíces son a veces un problema. Generalmente, el método trabaja mejor para cultivos de árboles que crecen bajos y de viña durante las heladas de radiación. En un experimento con tomates, las plantas no protegidas mostraron daño completo (Rosenberg, Blad y Verma, 1983). Utilizar riego por aspersión sobre las plantas dio una mejor protección que el riego por surcos, pero el daño fue menor con ambos métodos.

Inundación

La inundación directa se utiliza normalmente para la protección contra las heladas en muchos países. Por ejemplo, en Portugal y en España, los agricultores aplican un flujo continuo de agua al campo que sumerge las plantas parcial o totalmente (Cunha, 1952; Díaz-Queralto, 1971). En Portugal, se ha utilizado mayoritariamente para proteger pastizales de raygras y hierba de Castilla (Cunha, 1952), y ha sido utilizado satisfactoriamente en una variedad de cultivos en California y en otras localidades en los EE.UU. Como el coste de riego por inundación es relativamente bajo, el beneficio económico que resulta de utilizar para la protección contra las heladas es alto. El volumen de agua a aplicar depende de la gravedad de la helada y de la temperatura del agua. Businger (1965) indica que puede obtenerse una protección de 4 °C con este método si el riego se realiza con antelación a la helada; mientras que Georg (1979) publicó que la inundación directa subió la temperatura cerca de 3 °C en un cultivo de pimiento en una noche de helada.

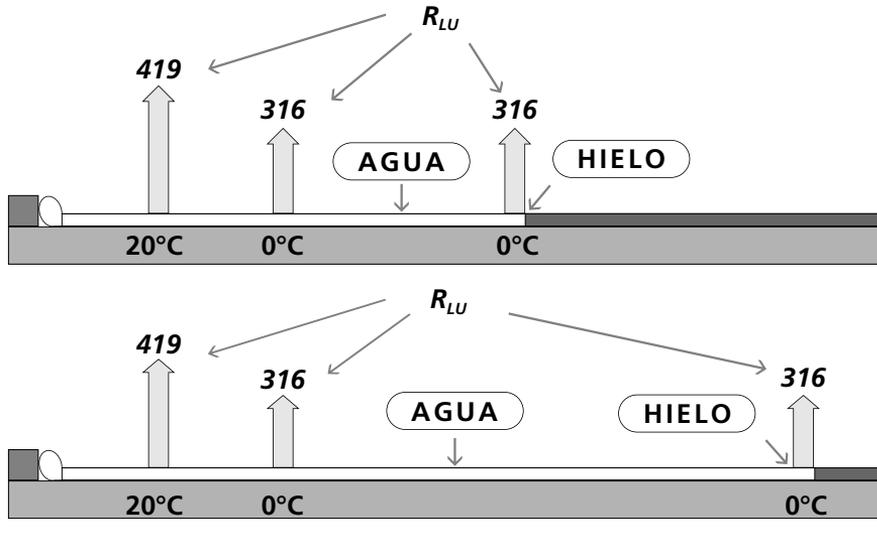
El agua líquida es más densa cuando la temperatura es cercana a 4 °C que a temperaturas más bajas, por ello el agua a temperaturas menores de 4 °C subirá hasta la superficie y favorecerá que el agua se congele de arriba abajo. Una vez se ha formado hielo sobre la superficie, se desarrolla un espacio de aire entre el agua líquida por debajo y el hielo por encima que aísla contra la transferencia de calor desde abajo. Entonces la temperatura de la superficie cubierta de hielo cae por debajo de los 0 °C y conduce a temperaturas, de la superficie y del aire, más frías.

Riego por surcos

El riego por surcos se usa normalmente para la protección contra las heladas y los conceptos básicos son similares al riego por inundación. Tanto la convección libre del aire calentado por el agua y la radiación hacia arriba se ven favorecidos por el flujo de agua más caliente por dentro de los surcos. La dirección principal de la radiación y del flujo de calor sensible es vertical, por ello los mejores resultados se consiguen cuando los surcos están directamente bajo las plantas a proteger. Por ejemplo, se necesitan surcos en los bordes de las hileras de cítricos de forma que al aire calentado por la transferencia de agua del surco hacia arriba a lo largo de los bordes de los árboles más que bajo los árboles donde el aire ya está más caliente o en medio entre las hileras donde el aire asciende sin interceptar los árboles. Para los árboles de hoja caduca, el agua debería correr bajo la cubierta, donde el aire más caliente se transferirá hacia arriba para calentar las yemas, las flores, las frutas o los frutos secos. Los surcos deberían ser amplios de forma que representen un área superficial más grande de agua. La energía emitida

FIGURA 7,14

Radiación de onda larga (R_{LU}) hacia arriba ($W m^{-2}$) desde el agua de un surco de riego mientras se enfría y se congela conforme fluye por el campo durante una noche con helada de radiación. En la Figura superior, el agua se enfría más rápidamente y se forma hielo más cerca de la salida del agua



es en $W m^{-2}$, por ello ampliar la amplitud de los surcos proporciona una área superficial más grande para la energía radiada para calentar el aire.

El riego por surcos debería iniciarse con suficiente antelación para que el agua alcance el final del campo antes de que la temperatura del aire caiga a la temperatura crítica de daño. El agua a $20^{\circ}C$ radiará $419 W m^{-2}$ de energía, mientras que el agua o el hielo a $0^{\circ}C$ radia $316 W m^{-2}$ de energía. También, el agua más caliente transferirá más calor al aire más cercano, que transferirá verticalmente en la cubierta vegetal. La formación de hielo en la superficie de agua aislará la transferencia de calor desde el agua y reduce la protección. Con una tasa de flujo más alta, la formación de hielo ocurrirá más abajo del surco (Figura 7.14), por ello tasas de aplicación altas proporcionarán una mejor protección. El agua fría de escorrentía no debería ser recirculada. El hecho de calentar el agua es definitivamente beneficioso para la protección; sin embargo, calentar puede ser o no efectivo desde el punto de vista del coste. Depende del coste del capital, de la energía y de la mano de obra, comparado con el valor potencial del cultivo.

AISLAMIENTO CON ESPUMAS

La aplicación de aislamientos con espumas para cultivos de crecimiento bajo para la protección contra las heladas ha sido ampliamente estudiado principalmente en América del Norte y se ha mostrado que aumenta la temperatura mínima tanto como 12 °C (Braud, Chesness y Hawthorne, 1968). Sin embargo, el método no ha sido ampliamente adoptado por los agricultores por el coste de los materiales y de la mano de obra, así como por el problema de cubrir áreas grandes en periodos cortos de tiempo debido a la inexactitud de los pronósticos de heladas (Bartholic, 1979). Las espumas están hechas de una variedad de materiales, pero es principalmente aire, lo que proporciona las propiedades de aislamiento. Cuando se aplica, la espuma previene de las pérdidas de radiación desde las plantas y atrapa la energía conducida hacia arriba desde el suelo. La protección es mejor en la primera noche y disminuye con el tiempo porque la espuma también bloquea la energía para calentar las plantas y el suelo durante el día y se rompe con el tiempo. El secreto para producir espuma con una baja conductividad térmica es mezclar aire y materiales líquidos en la proporción correcta para crear pequeñas burbujas. Algunos métodos para producir espumas y aplicarlos están publicados en Bartholic (1979). Sin embargo, Bartholic (1979) observa que los agricultores muestran interés después de sufrir daño por helada, pero raras veces adoptan el uso de espuma a largo plazo. Recientemente, Krasovitski et al. (1999) han publicado sobre las propiedades térmicas de las espumas y los métodos de aplicación.

LOS NEBULIZADORES

Se sabe que la niebla natural proporciona protección contra la congelación, por ello también se han estudiado las nieblas artificiales como posibles métodos contra el daño por helada. Se ha publicado que líneas de niebla (Figura 7.15) que utilizan tuberías de alta presión y boquillas especiales para producir pequeñas gotas de niebla (i.e. 10 a 20 μm de diámetro) proporcionan una buena protección bajo condiciones de viento débil (Mee y Bartholic, 1979). La protección proviene principalmente de las gotas de agua que absorben la radiación de onda larga desde la superficie y emiten de nuevo radiación de onda larga hacia abajo a la temperatura de la gota de agua, que es considerablemente más alta que la temperatura aparente del cielo despejado. Las gotas de agua deben tener diámetros de unos 8 μm para optimizar la absorción de la radiación y evitar que las gotas de agua caigan al suelo. Se necesita una densa nube de niebla gruesa que cubra completamente el cultivo para que exista protección. Ello depende de la presencia de un viento ligero y una humedad relativamente alta. Por ejemplo, Brewer, Burns y Opitz (1974) y, Itier, Huber y Brun (1987) encontraron dificultades con la producción de suficientes

gotas de agua y con el arrastre del viento. Mee y Bartholic (1979) publicaron que los Nebulizadores Mee tienen unos requerimientos de energía que son inferiores al 1% de los requerimientos de las estufas, un 10% de los ventiladores y un 20% de los aspersores. También publicaron una mejor protección bajo algunas condiciones que con el uso de las estufas.

El coste del capital para los sistemas de nebulización lineales es alto, pero los costes de funcionamiento son bajos. Sin embargo, de acuerdo con las comunicaciones personales de los agricultores e investigadores que han probado los nebulizadores lineales en localidades con heladas de moderadas a severas, la niebla evitó que se murieran los árboles pero no salvó la cosecha. En consecuencia, los nebulizadores lineales deberían utilizarse únicamente para la protección contra heladas poco severas. Además, el arrastre de la niebla puede ser aleatorio, por ello los nebulizadores no deberían utilizarse en áreas en las que se puede afectar al tráfico de vehículos.

FIGURA 7.15

Un sistema de tuberías de nebulización artificial funcionando en una plantación de almendros en California



Se ha observado que las nieblas naturales que se han creado al vaporizar agua con reactores proporcionan protección. La niebla creada por el cañón de vapor saturado (SV) de Gill (Figura 7.16) se considera más de tipo natural que de tipo artificial. El cañón SV añade vapor de agua al aire hasta que se satura y causa la

formación de niebla. El reactor tiene la ventaja que puede orientarse frente a la cara contra el viento del cultivo a proteger. Además, el coste de capital del cañón SV es considerablemente menor que el de un sistema de nebulización lineal. Sin embargo, debido al reactor, un problema importante es el ruido que produce. También existe el mismo problema de arrastre de la niebla, por ello el cañón SV no debería utilizarse donde existe tráfico de vehículos. El funcionamiento de la máquina es un poco complicado y los resultados de los ensayos de campo han sido diversos.

FIGURA 7.16

Un cañón de vapor a saturación Gill para la generación de niebla natural



LOS MÉTODOS COMBINADOS

Los ventiladores y los aspersores por debajo de la planta

Los aspersores bajo planta con ángulos de trayectoria bajos pueden utilizarse conjuntamente con los ventiladores para la protección contra las heladas. Además del calor suministrado por las gotas de agua al desplazarse desde los cabezales de los aspersores hasta el suelo, el agua congelada en el suelo libera calor latente y calienta el aire cerca de la superficie. Mientras, este aire calentado se transferirá naturalmente a través del cultivo, y el funcionamiento de los

ventiladores con los aspersores favorecerá la transferencia de calor y de vapor de agua dentro de la capa mezclada de aire y de las plantas. Normalmente, los agricultores empiezan con los aspersores, que tienen un coste de funcionamiento más bajo, y después, si se necesita más protección, se ponen en marcha los ventiladores. A diferencia de utilizar las estufas con los ventiladores, los cabezales de aspersión cerca de los ventiladores pueden dejarse en funcionamiento. Evans (2000) reporta que el uso combinado de ventiladores y agua puede doblar el beneficio de utilizar cualquiera de los dos métodos de forma aislada. También, observa que la combinación de métodos reduce los requerimientos de agua. Como el funcionamiento de los ventiladores aumenta artificialmente la velocidad del viento, las tasas de evaporación son más altas. En consecuencia, la combinación de ventiladores y de aspersores por encima de las plantas sobre planta es probable que sea perjudicial para la protección contra las heladas y no debería utilizarse.

Los ventiladores y el riego por superficie

La combinación de ventiladores y de riego por superficie es ampliamente utilizada en California y en otras localidades de Norte América, especialmente en plantaciones de cítricos. Los agricultores normalmente empiezan con el agua aplicada por superficie y más tarde ponen en marcha los ventiladores para complementar la protección en caso de que sea necesaria. Igual que con los aspersores bajo planta, los ventiladores facilitan la transferencia, al aire y a los árboles, del calor y del vapor de agua liberado por el agua dentro de la capa mezclada. Es bien conocido por los agricultores que la combinación de ventiladores y la aplicación de agua por la superficie del suelo mejora la protección contra las heladas. Sin embargo, se desconoce la cantidad adicional de protección conseguida.

Los ventiladores y las estufas

La combinación de ventiladores y de estufas se sabe que mejora la protección contra las heladas por encima de cada uno de los métodos por separado (Martsolf, 1979a). De hecho, Brooks (1960) publicó que un ventilador y 50 estufas por hectárea eran aproximadamente iguales a 133 estufas por hectárea. En California, se encontró que la combinación de métodos era un 53%, 39% y 0% más barata en años con 100, 50 y 10 horas de protección, respectivamente. En California, la combinación de ventiladores y de estufas ha protegido plantaciones de cítricos a temperaturas tan bajas como $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y sólo se necesitaron la mitad de las estufas cuando se combinaron los dos métodos. Un sistema normal tiene un

ventilador de 74,5 kW con unas 37 estufas con chimenea por hectárea uniformemente espaciadas, sin estufas colocadas a menos de 30 m del ventilador (Angus, 1962). Muchos esfuerzos han fracasado a la hora de usar ventiladores para distribuir el calor complementario a través o cerca de ellos. Las estufas con combustibles fósiles situadas demasiado cerca de los ventiladores causan el ascenso de corrientes de aire, disminuyendo la eficacia del ventilador. Como el funcionamiento de un ventilador tiende a tirar hacia dentro el aire frío cerca del suelo en el borde exterior del área protegida, las estufas se colocan en el borde exterior para calentar el influjo de aire frío. Colocar la mitad de las estufas (25 a 50 ha⁻¹) cada una quemando fuel oil a un ritmo de 2,8 l h⁻¹ en la periferia del área protegida por un ventilador ahorra un 90% del combustible de la estufa durante la estación y mejora la protección contra las heladas porque las estufas no se utilizan en muchas noches de heladas poco severas (Evans, 2000). Las estufas pueden espaciarse entre cada dos árboles en el borde exterior de la plantación y espaciarse más ampliamente dentro del área afectada por cada ventilador. La concentración debería ser un poco más alta en las zonas de la plantación contra el viento. No se necesitan estufas dentro de los 50 m del radio de acción del ventilador y los ventiladores deben ponerse en marcha en primer lugar. Las estufas se encienden si la temperatura continua disminuyendo.

Los aspersores y las estufas

No se ha encontrado literatura científica sobre el uso combinado de aspersores y de estufas, sin embargo Martsolf (1979b) publicó la utilización, con éxito, por parte de un agricultor en Pennsylvania, EE.UU. de la combinación de aspersores y estufas. El agricultor diseñó una cobertura (i.e. un trineo para la nieve de metal redondeado montado horizontalmente sobre un poste a unos 1,5 m por encima de la estufa) para evitar que el agua apagase la estufa. El agricultor puso en marcha las estufas en primer lugar y sólo abrió los aspersores cuando la temperatura del aire cayó muy baja. Esta combinación redujo la acumulación de hielo sobre las plantas y algunas veces no se necesitaron los aspersores. No se sabe si el agua que golpeaba la estufa causó una reducción en la generación de calor o si se favoreció la vaporización y la formación de una niebla beneficiosa.