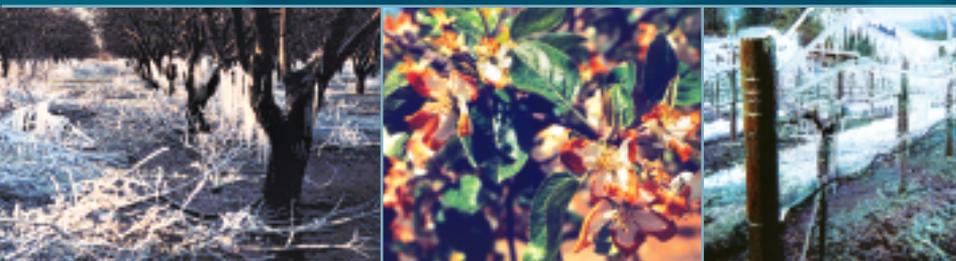


Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía



Volumen 1



Fotos de la portada Izquierda: *Acumulación de hielo por el uso de aspersores bajo la cubierta en el Norte de California* (fotógrafo: Richard L. Snyder)
Medio: *Flores de manzano dañadas por helada mostrando los pétalos dañados unos días después de la helada en una plantación de frutales en el Norte de Portugal* (fotógrafo: António Castro Ribeiro)
Derecha: *Acumulación de hielo por la aplicación de agua con aspersores sobre cultivo de viña* (fotógrafo: Robert Corrella)

Fotos de la contraportada Izquierda: *Experimento de aspersores sobre árboles en el Norte de California* (Fotógrafo desconocido)
Medio: *Anillos y manchas de "Russet" desarrollados en manzanas dañadas por el frío en el Norte de Portugal* (fotógrafo: António Castro Ribeiro)
Derecha: *Utilización de aros y plásticos para proteger plantas de Alstroemeria (Lirio del Perú) en el Norte de California* (fotógrafo: Richard L. Snyder)

Imagen de fondo en esta página Ilustración elaborada a partir de "L'Encyclopédie Diderot et D'Alembert"

Los ejemplares de las publicaciones de FAO pueden solicitarse en: Grupo de Ventas y Comercialización - División de Información, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)
Viale delle Terme di Caracalla - 00153 Rome, Italy

E-mail: publications-sales@fao.org
Fax: (+39) 06 57053360
Web site: <http://www.fao.org>



Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía

Volumen ①

Richard L Snyder

University of California, Atmospheric Science,
Department of Land, Air and Water Resources - Davis, California, USA

J. Paulo de Melo-Abreu

Technical University of Lisbon, Instituto Superior de Agronomia (ISA)
Departamento de Ciências do Ambiente
Apartado 3381, 1305-905 Lisboa, Portugal

Traducción: **Josep M. Villar-Mir**

Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria
Universidad de Lleida, Cataluña, España.

10

SERIE SOBRE EL MEDIO AMBIENTE Y LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES [MONITOREO Y EVALUACIÓN]
MEDIO AMBIENTE CAMBIO CLIMÁTICO BIOENERGÍA

Las conclusiones que se presentan en esta publicación se consideran las más convenientes en el momento de su edición. Las conclusiones pueden modificarse en vista de mayores conocimientos obtenidos en posteriores etapas del proyecto.

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

ISBN 978-92-5-306504-2

Todos los derechos reservados. La FAO fomenta la reproducción y difusión parcial o total del material contenido en este producto informativo. Su uso para fines no comerciales se autorizará de forma gratuita previa solicitud. La reproducción para la reventa u otros fines comerciales, incluidos fines educativos, podría estar sujeta a pago de derechos o tarifas.

Las solicitudes de autorización para reproducir o difundir material de cuyos derechos de autor sea titular la FAO y toda consulta relativa a derechos y licencias deberán dirigirse

por correo electrónico a:
copyright@fao.org

o por escrito al:
Jefe de la
Subdivisión de Políticas y Apoyo en Materia de Publicaciones
Oficina de Intercambio de Conocimientos
Investigación y Extensión, FAO
Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Roma, Italia.

© FAO 2010

PRÓLOGO

La agrometeorología trata de las interacciones entre los factores meteorológicos e hidrológicos con la agricultura en el sentido más amplio, incluyendo la horticultura, la ganadería y la producción forestal. Su objetivo es estudiar y definir dichas interacciones, y luego aplicar el conocimiento de la atmósfera para el uso práctico en la agricultura.

A pesar de los impresionantes avances tecnológicos en el campo de la agricultura en las últimas décadas, la producción agrícola continúa dependiendo de la meteorología y del clima. Es una realidad que la variabilidad climática jugará un papel aún más grande que en el pasado, porque no habrá suficiente provisión de alimentos para abastecer a toda la población mundial atendiendo a la tasa actual de crecimiento, a no ser que mejore la tecnología en agricultura, que los recursos naturales se usen con más eficiencia y que los que tomen decisiones tengan información actualizada de las principales circunstancias que afectan a los cultivos.

El principal papel de la agrometeorología moderna es asegurar que los investigadores, planificadores, y agricultores dispongan de datos, herramientas y del conocimiento necesario para enfrentarse a los problemas de la producción agrícola provocados por las variaciones meteorológicas y climáticas. Este libro es una contribución importante en esta dirección y sigue la filosofía de la División de Medio Ambiente, Cambio Climático y Bioenergía (Environment, Climate Change and Bioenergy Division) de proporcionar herramientas útiles para ayudar a la comunidad agrícola; ilustra que las interacciones entre agricultores y meteorólogos pueden ser muy provechosas si sus respectivas disciplinas entienden las necesidades y limitaciones de cada uno.

La economía juega una parte importante en cualquier actividad productiva como lo es la agricultura. En este libro, varios métodos de protección contra las heladas y sus riesgos asociados son analizados desde un punto de vista económico. Los Servicios Agrometeorológicos Nacionales y los Servicios de Extensión se beneficiarán claramente de la utilización de aplicaciones informáticas sencillas que sirven para aconsejar a los clientes para que reduzcan las pérdidas y establezcan los beneficios. Los consejos sobre la protección contra las heladas pueden constituir una valiosa fuente de ingresos para los Servicios Agrometeorológicos Nacionales en países en vías de desarrollo.



Peter Holmgren

Director

División de Medio Ambiente, Cambio Climático y Bioenergía
Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

RESUMEN

Este libro describe los aspectos físicos y biológicos de las heladas, el daño que ocasionan, los métodos de protección activos y pasivos así como la evaluación económica de las técnicas de protección activa. Se utiliza el balance de energía durante la noche para demostrar cómo hay que utilizar los métodos de protección para reducir la posibilidad de daño por helada. El libro proporciona programas y métodos sencillos que ayudan a predecir cómo evolucionará la temperatura y que ayudan a determinar el momento de actuar con métodos activos. También se presentan aquellos aspectos de la fisiología de las plantas que se relacionan con el daño por helada así como las temperaturas críticas para un conjunto muy amplio de cultivos y plantas ornamentales. Finalmente se incluye un programa de análisis económico, con ejemplos, para facilitar a los usuarios la evaluación de la eficacia en los costes de varios métodos activos.

A pesar de que el libro contiene una considerable cantidad de información técnica, está escrito, pensando más en los agricultores que en los científicos, como una guía práctica de la protección contra las heladas.

Protección contra las Heladas: fundamentos, práctica y economía volumen 1 y 2

Por Richard L Snyder, J. Paulo de Melo-Abreu, Scott Matulich (vol. 2)

Vol. 1: 240 páginas, 60 figuras, 35 tablas

Vol. 2: 72 páginas, 35 figuras, 5 tablas

CD-ROM CD-ROM incluido en el Vol.2

Serie FAO sobre el medio ambiente y la gestión de los recursos naturales, N. 10, FAO, Roma, 2010.

La traducción se ha realizado del libro original en inglés editado en el año 2005.

Palabras clave:

Protección contra la congelación, predicción de temperaturas, modificación meteorológica, ventiladores, estufas, bacterias activas nucleadoras de hielo, drenaje de aire frío, microclima, transferencia de calor.

Esta serie reemplaza las siguientes:

Environment and Energy Series

Remote Sensing Centre Series

Agrometeorology Working Paper

Una lista de los documentos publicados en las series mencionadas y otras informaciones pueden encontrarse en las páginas web:

www.fao.org/climatechange

www.fao.org/bioenergy

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al Dr. Michele Bernardi y al Dr. Rene Gomme del Grupo de Agrometeorología de la División de Medio Ambiente, Cambio Climático y Bioenergía del Departamento de Ordenación de Recursos Naturales y Medio ambiente de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) por su asistencia en la planificación y redacción del libro sobre heladas. Queremos agradecer a nuestros amigos el Dr. Luciano Mateos por animarnos a escribir el libro y a la Dr. Helena Gómez MacPherson y Ángela Scappaticci por su amistad y apoyo durante las visitas a la FAO en Roma. Se agradece a los profesores Donatella Spano y Pietro Deidda del Dipartimento di Economia e Sistemi Arborei por darnos apoyo y facilidades durante parte de la preparación del libro en la Universidad de Sassari, Italia. También queremos dar las gracias al Dr. Kyaw Tha Paw U y al Dr. Michael J. Singer del Department of Land, Air and Water Resources por su apoyo continuado en este esfuerzo.

Los autores agradecen a sus respectivas instituciones, Department of Land, Air and Water Resources – University of California en Davis; Instituto Superior de Agronomía – Technical University of Lisbon; y al Department of Agricultural and Resource Economics – Washington State University. También agradecemos a la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y a la Universidad de California por el apoyo financiero al Dr. Zinder durante su tiempo de permiso sabático en Italia. Agradecemos a la Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) y a la Fundação Luso-Americana para o Desenvolvimento por el apoyo financiero del Dr. de Melo-Abreu en la University of California en Davis para trabajar en este libro.

Los autores agradecen al Dr. António Castro Ribeiro por el suministro de datos de su tesis, que nos ayudó a desarrollar el análisis para las máquinas de viento. También agradecemos a Neil O’Connell del Tulare County Cooperative Extension – University of California por suministrar información sobre los costes de la protección contra heladas. Además, queremos agradecer a todas las personas que ha contestado a la encuesta sobre Tecnologías Apropriadas. Para acabar queremos agradecer a los revisores del libro por sus comentarios y sugerencias.

La edición final del lenguaje y estilo en nombre de FAO fue realizado por Thorgeir Lawrence, Reykjavik, y la preparación de la edición fue realizada por Studio Bartoleschi en Roma, Italia.

Los esfuerzos de coordinación para la edición en español hay que agradecerse a Dr. Claudia Hiepe de la División de Medio Ambiente, Cambio Climático y Bioenergía de FAO. El profesor Josep M Villar-Mir de la Universidad de Lleida (Cataluña, España) quiere agradecer las sugerencias y comentarios de José Paulo de Melo e Abreu, y de los ingenieros agrícolas Laia Villar y Sergi Valls en la edición final del texto en español.

CONTENIDOS

iii	Prólogo
iv	Resumen
v	Agradecimientos
x	Acrónimos utilizados en el texto
xi	Listado de los principales símbolos
xiv	Resumen ejecutivo
1	1 – INTRODUCCIÓN
1	Generalidades
2	Definiciones de congelación y de helada
4	Las heladas de radiación
8	Las heladas de advección
9	Clasificación de los métodos de protección
9	Evaluación geográfica del daño por helada a los cultivos
12	Importancia económica del daño por heladas
13	Historia de la protección contra heladas
19	2 – LOS MÉTODOS RECOMENDADOS DE PROTECCIÓN CONTRA LAS HELADAS
19	Introducción
19	La sensibilidad de los cultivos y las Temperaturas críticas
20	La protección pasiva
21	La selección del emplazamiento y manejo
22	El drenaje de aire frío
23	La selección de plantas
23	La cobertura con árboles
24	La gestión de la nutrición de las plantas
24	El manejo de plagas
24	Una poda adecuada
25	Cobertura de las plantas
25	Evitar el laboreo del suelo
25	El riego
26	Eliminación de las cubiertas de hierba
26	Las coberturas de los suelos
27	Pintar los troncos y envolturas
27	El control bacteriano
28	La protección activa
28	Las estufas
31	Los ventiladores
32	Los helicópteros
33	Los aspersores
34	<i>Aspersores convencionales por encima de las plantas</i>
37	<i>Aspersores dirigidos sobre las plantas</i>
38	<i>Aspersores sobre cultivos protegidos</i>
38	<i>Aspersores convencionales por debajo de los árboles</i>
39	<i>Los micro-aspersores bajo las plantas</i>

39	<i>El riego localizado por goteo</i>
40	<i>Aspersores por debajo las plantas con agua calentada</i>
40	El riego de superficie
40	<i>El riego por inundación</i>
41	<i>El riego por surcos</i>
41	Aislamiento con espumas
42	Métodos combinados
42	<i>Aspersores por debajo de la cubierta y ventiladores</i>
42	<i>Riego por superficie y ventiladores</i>
43	<i>Combinación de estufas y de ventiladores</i>
43	<i>Aspersores y estufas</i>
43	Predicción y seguimiento
44	Probabilidad y riesgo
44	Evaluación económica de los métodos de protección
44	Tecnologías más convenientes
45	3 – MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA
45	Masa y energía en el aire
47	El balance de energía
47	Convención de signos
52	Humedad y calor latente
58	Calor sensible
61	Conducción – Flujo de calor al suelo
64	Radiación
70	El flujo de calor latente
71	Recursos adicionales sobre el balance de energía
	4 – EL DAÑO PRODUCIDO POR LAS HELADAS:
73	FISIOLOGÍA Y TEMPERATURAS CRÍTICAS
73	Introducción
74	El daño celular
75	La evitación, la tolerancia y el endurecimiento
77	La sensibilidad de las plantas
78	Tipos de daño y temperaturas críticas
81	Cultivos Anuales y bienales
89	Cultivos perennes
89	Los árboles frutales
92	Uva de mesa y uva de vinificación
95	Otros pequeños frutos
95	Los frutos de los cítricos
99	5 – LA PREDICCIÓN DE LAS HELADAS Y SU SEGUIMIENTO
99	El valor de la predicción de las heladas
100	Predicción de las temperaturas mínimas
102	Calibración de pronósticos de la meso-escala a la micro-escala
103	Un modelo sencillo de predicción de la temperatura mínima
107	Un modelo sencillo de predicción de la tendencia de las temperatura
109	Hoja de cálculo "previsión"
110	Hoja de cálculo "BulboHúmedo"
111	Hoja de cálculo "Entrada"

- 111 Prognosticar la tendencia de temperaturas del aire
- 112 Prognosticar la tendencia en la temperatura del bulbo húmedo
- 114 Decidir cuándo poner en marcha los aspersores
- 117 Actualización con las observaciones de las temperaturas actuales
- 119 Documentación de la aplicación FTrend.xls
- 120 Alarmas y seguimiento meteorológico durante una noche de helada

123 6 – MÉTODOS DE PROTECCIÓN PASIVOS

- 123 La selección del emplazamiento y su gestión**
 - 129 Drenaje de aire frío
 - 132 Pendiente y orientación
 - 132 Tipo de suelo y contenido de agua
- 137 Selección de plantas**
- 138 Árboles que dan cobertura**
- 139 Manejo de la nutrición de las plantas**
- 140 Poda adecuada**
- 141 Enfriar para retrasar la floración**
- 142 Productos químicos para retrasar la floración**
- 142 Las cubiertas de plantas**
- 145 Evitar el laboreo del suelo**
- 146 El riego**
- 146 Eliminar las cubiertas de los cultivos**
- 149 Cubiertas del suelo**
 - 149 Cubiertas del suelo plásticas
 - 150 Cubiertas orgánicas
- 151 Pintar los troncos**
- 151 Envolturas de toncos**
- 153 Control de bacterias**
- 156 Tratamiento de semillas con productos químicos**

157 7 – MÉTODOS DE PROTECCIÓN ACTIVOS

- 158 Las estufas**
 - 158 Teoría del funcionamiento
 - 163 Efectos del humo
 - 164 Requerimientos de las estufas
 - 165 Colocación de las estufas y manejo
 - 166 Estufas de combustible líquido
 - 169 Estufas de propano y de gas natural
 - 169 Estufas de combustible sólido
 - 170 Estufas portátiles
- 171 Ventiladores**
 - 171 Ventiladores convencionales
 - 173 *Teoría del funcionamiento*
 - 175 *Puesta en marcha y parada*
 - 176 Ventiladores de flujo vertical
 - 177 Helicópteros
- 178 Aspersores**
 - 179 Conceptos Básicos
 - 180 Aspersores por encima de las plantas
 - 181 Aspersores de rotación convencionales
 - 182 *Puesta en marcha y parada*
 - 188 *Requerimientos de caudales de aplicación*

192	Aspersores de caudal variable
192	Aspersores de bajo volumen (dirigidos)
194	Aspersión sobre cubiertas
194	Aspersores por debajo de las plantas
195	<i>Aspersores de rotación convencionales</i>
196	<i>Micro-aspersores</i>
197	<i>Riego de bajo volumen (por goteo)</i>
198	<i>Agua calentada</i>
199	Riego de superficie
200	Inundación
200	Riego por surcos
202	Aislamiento con espumas
202	Los nebulizadores
204	Los métodos combinados
204	Los ventiladores y aspersores por debajo de la planta
205	Los ventiladores y el riego por superficie
205	Los ventiladores y las estufas
206	Los aspersores y las estufas
207	8 – TECNOLOGÍAS ADECUADAS
207	Introducción
208	Métodos de protección habituales
209	Métodos pasivos
210	Métodos activos
211	Resumen de las tecnologías adecuadas
216	Respuestas a la encuesta sobre protección contra las heladas
216	Argentina (NE de Buenos Aires)
216	Grecia
216	Jordania
217	México (Chihuahua)
217	Zimbabwe
219	REFERENCIAS
231	ANEXO 1 – PREFIJOS Y FACTORES DE CONVERSIÓN
231	Prefijos
232	Factores de conversión
232	Temperatura
232	Presión (presión del aire, presión de vapor)
232	Velocidad del viento
232	Radiación
233	Propiedades físicas
233	Propiedades del agua
233	Propiedades de los gases a $P_b = 101,3$ kPa de presión barométrica
233	Emitancia del cuerpo negro ($W m^{-2}$) como una función de la temperatura por debajo de cero ($^{\circ}C$)
235	ANEXO 2 – CONSTANTES
237	ANEXO 3 – CÁLCULOS DE LA HUMEDAD

ACRÓNIMOS UTILIZADOS EN EL TEXTO

DOY	Día del año
INA	Bacteria activa en la nucleación de hielo
NINA	Bacteria inactiva en la nucleación de hielo
P&I	Principal e interés
RMSE	Raíz del error cuadrado medio
NWS	Servicio Meteorológico Nacional de los EE.UU.

NOTA:

Todos los valores monetarios son en dólares de los Estados Unidos a no ser que se especifique de otra manera (el símbolo es \$).

LISTADO DE LOS PRINCIPALES SÍMBOLOS

Alfabeto Romano

Símbolo	Unidad	Definición
b'		Factor de calibración de la predicción de la temperatura mínima por raíz cuadrada
C		Certeza de que se producirá un evento (i.e. $C = 1 - R$)
C_V	$J m^{-3} °C^{-1}$	Capacidad de calor volumétrica del suelo
\bar{E}	kPa	Presión del vapor de agua o presión del vapor de agua real
E	$kg m^{-2} s^{-1}$	Densidad del flujo de masa de vapor de agua
E'	$W m^{-2}$	Energía a partir de la radiación
e_a	kPa	Presión de vapor a saturación a la temperatura T_a
e_d	kPa	Presión del vapor a saturación a la temperatura del punto de rocío T_d (observa que $e_d = e$)
e_f	kPa	Presión del vapor a saturación a la temperatura del bulbo helado T_f
e_i	kPa	Presión del vapor a saturación a la temperatura del punto de formación de hielo T_i (observa que $e_i = e$)
E_L	m	Elevación relativa al nivel medio del mar
E_o	$MJ l^{-1}$, $MJ kg^{-1}$	Producción de energía
E_R	$W m^{-2}$	Requerimiento de energía
e_s	kPa	Presión de vapor a saturación sobre una superficie plana de agua líquida o de hielo a la temperatura T
e_w	kPa	Presión de vapor a saturación a la temperatura del bulbo húmedo T_w
F	—	Función que tiene en cuenta el efecto de la nubosidad en la radiación hacia abajo de onda larga
F_C	$l h^{-1}$, $kg h^{-1}$	Tasa de consumo de combustible
G	$W m^{-2}$	Densidad de flujo de calor al suelo
G_1	$W m^{-2}$	Densidad de flujo de calor en la superficie del suelo (i.e. $G_1 = G$)
G_2	$W m^{-2}$	Densidad de flujo de calor al suelo medido con un plato de flujo térmico a una profundidad determinada en el suelo
G_{sc}	$W m^{-2}$	Constante solar. $G_{sc} = 1\,367 W m^{-2}$
H	—	Número de horas desde las dos horas después de la puesta del Sol hasta la salida del Sol
H	$W m^{-2}$	Densidad de flujo de calor sensible
H_H	—	Estufas por hectárea
K_b	$W m^{-1} °C^{-1}$	Conductividad térmica
K_s	$W m^{-1} °C^{-1}$	Conductividad térmica del suelo
L	$J kg^{-1}$	Calor latente de vaporización

LE	$W\ m^{-2}$	Densidad de flujo de calor latente
p	—	$p = 86\ 400$ s por día
P	—	Probabilidad de que un evento ocurra en un año dado
P_b	kPa	Presión barométrica
R	—	Riesgo o probabilidad de que un evento ocurra durante un número conocido de años
R_l	$^{\circ}C$	Residual $R_l = T_n - T_p$
R_l'	$^{\circ}C$	Predicción del residual R_l utilizando T_d en el momento t_0
R_A	$mm\ h^{-1}$	Tasa de aplicación de los aspersores
R_{Ld}	$W\ m^{-2}$	Radiación de onda larga positiva hacia arriba (terrestre)
R_{Ln}	$W\ m^{-2}$	Radiación neta de onda larga ($R_{Ln} = R_{Ld} + R_{Lu}$)
R_{Lu}	$W\ m^{-2}$	Radiación de onda larga positiva hacia abajo (terrestre)
$RMSE$		$RMSE = [\sum(Y-X)^2/n]^{0.5}$ donde n es el número de pares de variables aleatorias Y y X
R_n	$W\ m^{-2}$	Radiación neta
R_o	$^{\circ}C$	Intervalo de temperaturas de la superficie del suelo
R_{Sd}	$W\ m^{-2}$	Radiación de onda corta positiva hacia abajo (solar)
R_{Sn}	$W\ m^{-2}$	Irradiancia de onda corta neta (solar) ($R_{Sn} = R_{Sd} + R_{Su}$)
R_{So}	$W\ m^{-2}$	Radiación de onda corta (solar) hacia abajo desde el cielo despejado
R_{St}	$W\ m^{-2}$	Radiación de onda corta (solar) negativa hacia arriba
R_z	$^{\circ}C$	Intervalo de temperaturas del suelo a la profundidad z
T	$^{\circ}C$	Temperatura
t	—	Tiempo
T_{10}		Temperatura crítica a la cual se espera un 10% de daño
T_{90}		Temperatura crítica a la cual se espera un 90% de daño
T_a	$^{\circ}C$	Temperatura del aire
T_C	—	Temperatura crítica o temperatura crítica de daño – la temperatura a la cual se espera un nivel de daño particular
T_{cf}	$^{\circ}C$	Temperatura de la cubierta exterior de los frutos de los cítricos
T_d	$^{\circ}C$	Temperatura del punto de rocío
T_e	$^{\circ}C$	Temperatura equivalente (la temperatura que alcanza una parcela de aire si todo el calor latente es convertido adiabáticamente a calor sensible)
T_f	$^{\circ}C$	Temperatura del bulbo helado
t_f	—	Tiempo final de un intervalo de muestreo
T_i	$^{\circ}C$	Temperatura del punto de formación de hielo
t_i	—	Tiempo inicial de un intervalo de muestreo
T_i	$^{\circ}C$	Temperatura a la i^{ava} hora siguiente a t_0
T_K	K	Temperatura absoluta en grados kelvin ($273,15\ K = 0^{\circ}C$)
T_n	$^{\circ}C$	Temperatura mínima observada a la salida del Sol

t_0	—	Tiempo inicial para la aplicación FFST.xls (i.e. dos horas después de la puesta de Sol)
T_0	°C	Temperatura en el momento t_0
T_p	°C	Temperatura mínima pronosticada a partir de la temperatura del aire y del punto de rocío en t_0
t_p	—	Tiempo de salida del Sol para la temperatura mínima pronosticada (T_p)
$T_p \square$	°C	Temperatura mínima pronosticada utilizando T_0 en el momento t_0
T_{sf}	°C	Temperatura del suelo al final del intervalo de muestreo
T_{si}	°C	Temperatura del suelo al inicio del intervalo de muestreo
T_f	°C	Temperatura del bulbo húmedo
V_m	—	Fracción volumétrica de minerales en el suelo
V_o	—	Fracción volumétrica de la materia orgánica en el suelo
z	m	Profundidad por debajo o altura por encima de la superficie (e.g. en metros)

Alfabeto Griego

Símbolo	Unidad	Definición
Δ	kPa °C ⁻¹	Pendiente de la curva de la presión de vapor de saturación a la temperatura T
α	—	Albedo (i.e. reflexión de la radiación de onda corta)
ε	—	Emisividad
ε_o	—	Emisividad aparente hacia abajo procedente del cielo
γ	kPa °C ⁻¹	Constante psicrométrica
κ_T	m ² s ⁻¹	Difusividad térmica en el suelo
λ	MJ kg ⁻¹	Calor latente de vaporización
λ_{max}	m	Longitud de onda de máxima emisión de energía (i.e. una función de la temperatura)
μ_d	—	Valor medio de un dato
θ	—	Fracción volumétrica del agua en el suelo
σ	W m ⁻² K ⁻⁴	Constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Wm ² K ⁻⁴
ρ	mol m ⁻³	Densidad del aire
ρ_d	Mg m ⁻³	Densidad del agua
σ_d	—	Desviación estándar de un dato

Observa que las conversiones de las tasas de aplicación de riego por aspersión son:
 $1 \text{ mm h}^{-1} = 1 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} = 10^4 \text{ L ha}^{-1} \text{ h}^{-1} = 10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$

RESUMEN EJECUTIVO

Esta publicación revisa los factores físicos, químicos y biológicos involucrados en el daño por heladas a las plantas agrícolas y hortícolas, y presenta los métodos más utilizados de protección contra las heladas. Además, la publicación proporciona las herramientas de análisis por ordenador para ayudar a los agricultores a diseñar y gestionar los métodos de protección contra heladas, investigar el riesgo de las temperaturas de congelación y para analizar los aspectos económicos en relación al riesgo, para poder decidir sobre los costes y beneficios de los diferentes métodos de protección.

Si bien la Organización Meteorológica Mundial (WMO) ha publicado con anterioridad información sobre la protección contra las heladas, ésta es la primera publicación FAO específicamente escrita sobre protección contra heladas, y que amplía enormemente los contenidos. La publicación sintetiza y simplifica información técnica compleja de la literatura para proporcionar directrices claras para reducir las pérdidas ocasionadas por el daño por helada – pérdidas que pueden ser económicamente devastadoras para los agricultores y sus comunidades locales.

La publicación debate sobre las condiciones meteorológicas típicas durante las heladas, y proporciona las herramientas de ordenador para predecir las temperaturas mínimas y la tendencia de las temperaturas durante las noches de heladas de radiación. Además, la publicación presenta información sobre cómo los factores ambientales (condiciones del suelo, presencia de nubes, niebla, cubiertas vegetales, etc.) afectan al balance de energía y cómo estos factores afectan a la tendencia de las temperaturas.

La publicación debate sobre qué ocurre a los tejidos de las plantas cuando se producen las temperaturas de congelación, y presenta información sobre la sensibilidad de las plantas al daño por heladas. Se presentan los factores biológicos que influyen en la congelación (incluyendo el estadio de crecimiento, el contenido de solutos de las células y las bacterias formadoras de núcleos de hielo), y se discuten los métodos de gestión que se pueden utilizar para manipular estos factores (elección de porta injertos y variedades, aplicación de agua, fertilidad del suelo, control de bacterias, etc.).

Los principales métodos de protección pasiva contra heladas (no laboreo, humedecimiento de suelos secos, eliminación de las cubiertas del suelo, etc.) se discuten a fondo para proporcionar a los agricultores los métodos de protección contra heladas más eficaces en costes. Se presenta una discusión de los métodos de protección activos (estufas de combustible líquido y sólido, riego por superficie, aspersores y ventiladores) para indicar cómo trabajan los métodos y cómo hay que gestionarlos, de forma aislada o combinada, para una protección óptima.

En el volumen 2 se presenta una discusión rigurosa de los riesgos y la economía de los distintos métodos de protección, junto a los programas de ordenador necesarios para simplificar los cálculos. El texto y los programas Excel que lo acompañan deberían ayudar a los agricultores y a los consultores a tomar decisiones acertadas frente a las diferentes alternativas de métodos de protección en base a la eficacia en los costes, dependiendo de los riesgos locales de las heladas y otros factores.

GENERALIDADES

Cuando la temperatura del aire cae por debajo de los 0 °C, los cultivos sensibles pueden sufrir daños, con un efecto significativo en la producción. Por ejemplo, en los EE.UU., hay más pérdidas económicas por el daño de las heladas que por cualquier otro fenómeno relacionado con la meteorología (White y Haas, 1975). Por lo tanto los impactos sobre los agricultores afectados y sobre la economía local son, con frecuencia, devastadores. A pesar de su importancia, la información sobre cómo proteger a los cultivos de la congelación es escasa. Por consiguiente, existe la necesidad de una información, mayor y más simplificada, que permita ayudar a los agricultores a afrontar este grave problema. En este libro se presentan y se discuten, junto con los métodos de protección, la distribución, la economía, la historia, y los aspectos físicos y biológicos de los daños por helada.

Este libro contiene un amplio abanico de información que va desde lo más básico a lo más complejo; sin embargo está escrito para ayudar a los agricultores a entender mejor la protección contra heladas y a desarrollar estrategias para combatir las pérdidas por congelación. Se presentan las referencias necesarias para los que quieran ir más allá en las investigaciones científicas sobre la protección contra heladas. No obstante, el objetivo, más que proporcionar una revisión bibliográfica, es proporcionar una guía para los más prácticos. Debido a que algunos aspectos de la protección contra heladas son complejos, se incluyen en el libro algunos programas informáticos de utilidad para algunas de las aplicaciones. Además, se proporciona información sobre aplicaciones y medidas simples y asequibles a partir de tablas y gráficas junto a los algoritmos utilizados para su elaboración.

Para aquellos lectores que están más interesados en los aspectos prácticos que los científicos hay que leer el capítulo 2 sobre Métodos Recomendados de Protección contra Heladas, que proporciona información menos técnica de todos los aspectos de la protección contra heladas. Para aquellos lectores que quieren explicaciones más detalladas los capítulos del 3 al 8 discuten la mayoría de aspectos de la protección contra heladas incluyendo su base científica. El volumen II de este libro cubre los aspectos de probabilidad, riesgo y economía de la protección contra heladas. Aunque hay información de utilidad para meteorólogos el libro no cubre ni el pronóstico a escala sinóptica o meso-escala

ni la modelización del riesgo de heladas. Estos están revisados en otras publicaciones más técnicas (e.g. Kalma *et al.*, 1992). No obstante, para los agricultores locales y para los técnicos, el libro debería proporcionarles la mayor parte de la información necesaria para tomar decisiones acertadas, que permitan ayudar a los agricultores y a la comunidad local a minimizar los efectos devastadores del daño por helada.

DEFINICIONES DE CONGELACIÓN Y DE HELADA

Técnicamente, la palabra “helada” se refiere a la formación de cristales de hielo sobre las superficies, tanto por congelación del rocío como por un cambio de fase de vapor de agua a hielo (Blanc *et al.*, 1963; Bettencourt, 1980; Mota, 1981; Cunha, 1982); no obstante, la palabra es ampliamente utilizada por el público para describir un evento meteorológico cuando los cultivos y otras plantas experimentan daño por congelación. Los agricultores a menudo utilizan los términos “helada” y “congelación” de forma indistinta, con la definición vaga de “una temperatura del aire inferior o igual a 0 °C”. Ejemplos de definiciones de helada en la literatura incluyen:

- La ocurrencia de una temperatura inferior o igual a 0 °C medida en una garita “tipo Stevenson” a una altura entre 1,25 y 2,0 m (Hogg, 1950, 1971; Lawrence, 1952);
- La ocurrencia de una temperatura inferior a 0 °C, sin definición del tipo de garita y de la altura (Raposo, 1967; Hewett, 1971);
- Cuando la temperatura de la superficie cae por debajo de 0 °C (Cunha, 1952); y la existencia de una temperatura del aire baja que causa el daño o la muerte de las plantas, sin mencionar la formación de hielo (Ventskevich, 1958; Vitkevich, 1960).

Snyder, Paw U y Thompson (1987) y Kalma *et al.* (1992) han definido helada en dos ámbitos: “advectiva” y “radiativa”. Las heladas advectivas están asociadas con incursiones a gran escala de aire frío con una atmósfera con viento y bien mezclada y una temperatura que a menudo está por debajo de cero, incluso durante el día (Tabla 1.1). Las heladas de radiación están asociadas con el enfriamiento debido a la pérdida de energía por el intercambio radiante durante las noches despejadas y en calma, y con inversiones de temperatura (i.e. la temperatura aumenta con la altura). En algunos casos, se produce una combinación tanto de condiciones advectivas como radiativas. Por ejemplo, no es extraño tener condiciones advectivas que traen una masa de aire frío en una región provocando una helada advectiva. Esto puede venir seguido por varios días despejados, con condiciones de calma que conducen a heladas de radiación.

TABLA 1.1

Terminología de los eventos de helada y características típicas

TIPO DE HELADA	CARACTERÍSTICAS
Radiación	Despejado; calma; inversión; la temperatura es superior a 0 °C durante el día
Advección	Ventoso; sin inversión; la temperatura puede ser inferior a 0 °C durante el día.

Además, los autores han observado condiciones consideradas como “heladas de advección a microescala”. Esto ocurre cuando la región es expuesta a condiciones de heladas tipo radiación, pero el drenaje de aire frío local conduce a una caída rápida de temperatura a pequeña escala dentro del área con helada de radiación.

Las definiciones sobre helada y congelación en los diccionarios y en la literatura son variables y confusas; sin embargo, en un sentido muy amplio, el término protección de heladas se utiliza más comúnmente que protección contra la congelación. De acuerdo con la literatura, se ha decidido que las siguientes definiciones son adecuadas y serán utilizadas en este libro.

Una “helada” es la ocurrencia de una temperatura del aire de 0 °C o inferior, medida a una altura de entre 1,25 y 2,0 m por encima del nivel del suelo, dentro de una garita meteorológica adecuada. El agua dentro de las plantas puede que se congele o no durante un evento de helada, dependiendo de varios factores de evitación (e.g. superenfriamiento y concentración de bacterias nucleadoras de hielo). Una “congelación” ocurre cuando el agua extracelular dentro de la planta se congela (i.e. cambia de líquido a hielo). Esto puede o no dañar el tejido de la planta, según los factores de tolerancia (e.g. contenido de solutos de las células). Un evento de helada se convierte en un evento de congelación cuando se forma hielo extracelular dentro de las plantas. El daño por congelación ocurre cuando la temperatura del tejido de las plantas cae por debajo de un valor crítico donde hay condición fisiológica irreversible que conduce a la muerte o al funcionamiento incorrecto de las células de las plantas. Esta temperatura que produce el daño de los tejidos se correlaciona con las temperaturas del aire denominadas “temperaturas críticas” medidas en garitas con instrumentos estándar. Las temperaturas del aire bajo cero son producidas por disminuciones en el contenido de calor sensible del aire cerca de la superficie, principalmente debido a (1) una pérdida neta de energía a través de la radiación desde la superficie hacia el cielo (i.e. helada de radiación); (2) viento que fluye con aire por debajo de cero para reemplazar el aire más caliente (i.e. helada de advección); o (3) alguna combinación de los dos procesos.

LAS HELADAS DE RADIACIÓN

Las heladas de radiación son acontecimientos usuales. Se caracterizan por un cielo despejado, en calma o con poco viento, inversión de temperatura, temperaturas del punto de rocío bajas y temperaturas del aire que normalmente caen por debajo de 0 °C durante la noche pero que están por encima de 0 °C durante el día. La temperatura del punto de rocío es la temperatura que se alcanza cuando el aire se enfría hasta que alcanza una humedad relativa del 100%, y es una medida directa del contenido de vapor de agua del aire. Para ilustrar la diferencia entre una helada de advección y una helada de radiación, datos de los dos peores eventos de helada ocurridos en el siglo veinte en la región de cultivo de cítricos en California se muestran en las Figuras 1.1 y 1.2. Observa que las temperaturas máximas durante el día caen considerablemente conforme el aire frío se mueve dentro de la región. De acuerdo con la velocidad del viento no se consideraría como un evento de helada de advección ya que durante la noche no había viento o era muy ligero, cuando las temperaturas estaban bajo cero. Sin embargo, como estuvo nublado durante los primeros días de los eventos, las temperaturas bajo cero fueron atribuidas a la advección de aire frío en el área más

FIGURA 1.1

Temperaturas medias del aire y del punto de rocío a 1,5 m de altura y velocidad del viento media a 2,0 m de altura registradas durante el evento de diciembre de 1990 en Lindcove, California, EE.UU.

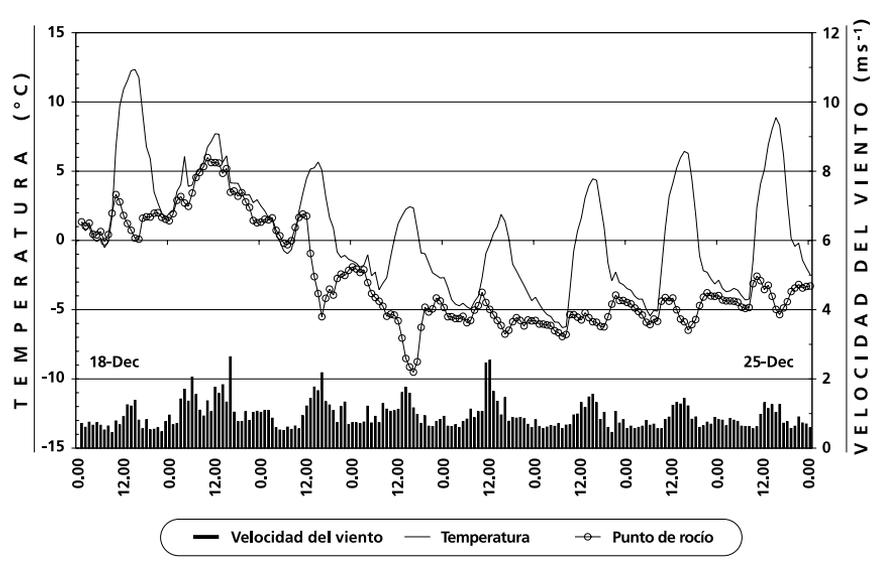
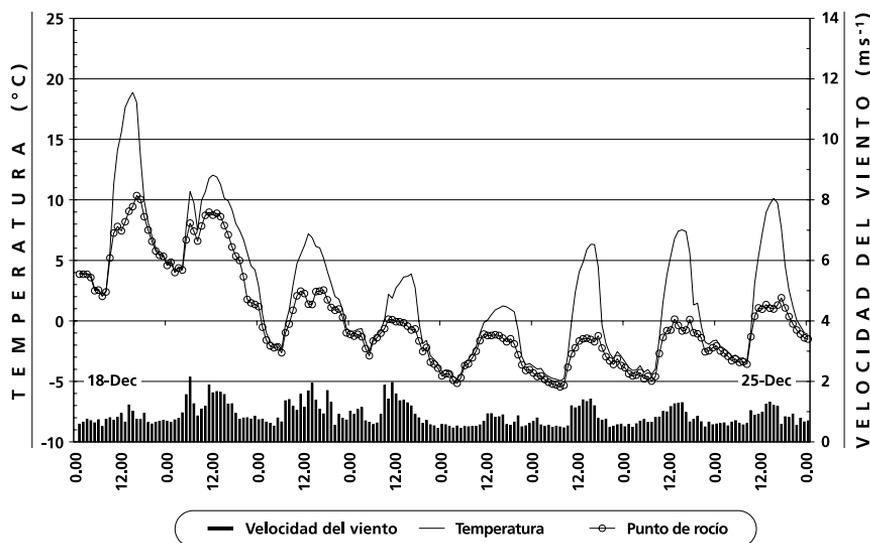


FIGURA 1.2

Temperaturas medias del aire y del punto de rocío a 1,5 m de altura y velocidad media del viento a 2,0 m de altura en el evento de Diciembre de 1998 en Lindcove, California, USA

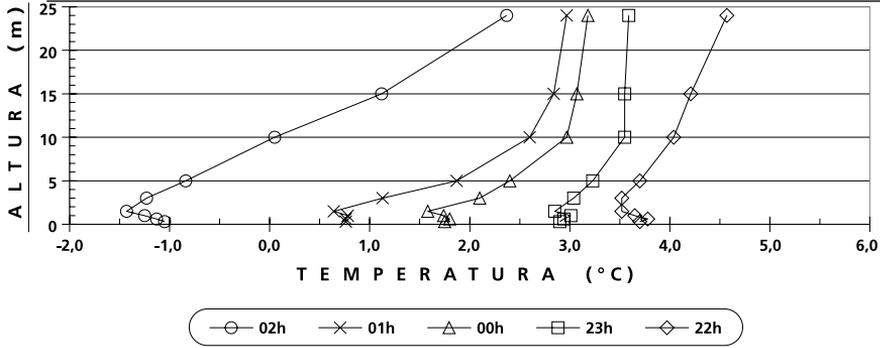


que al resultado de una pérdida de radiación neta. Eventos similares a las dos primeras heladas habían ocurrido en 1913 y en 1937, y por tanto son ocurrencias relativamente poco frecuentes. Sin embargo, no puede considerarse el caso en climas más continentales donde las temperaturas bajo cero son más frecuentes.

Durante la noche con cielos despejados, se pierde más calor por radiación que la que se recibe y ello conduce a una caída de la temperatura. La temperatura cae más rápido cerca de la superficie que está radiando provocando la formación de una inversión de temperatura (i.e. la temperatura aumenta con la altura por encima del suelo). El proceso se muestra en la Figura 1.3. Como hay una pérdida neta de energía por la radiación desde la superficie, el contenido de calor sensible de la superficie del suelo y del aire cercano a la superficie disminuye. Hay un flujo de calor sensible hacia abajo desde el aire y hacia arriba desde el suelo hacia la superficie para reemplazar la pérdida de calor sensible. Esto provoca que la temperatura disminuya también en el aire, pero no tan rápidamente como en la superficie. La altura de la parte superior de la inversión de temperatura es variable dependiendo de la topografía local y de las condiciones meteorológicas, pero generalmente varía de los 9 a los 60 m (Perry, 1994).

FIGURA 1.3

Desarrollo de una inversión sobre un campo de manzanos en el norte de Portugal



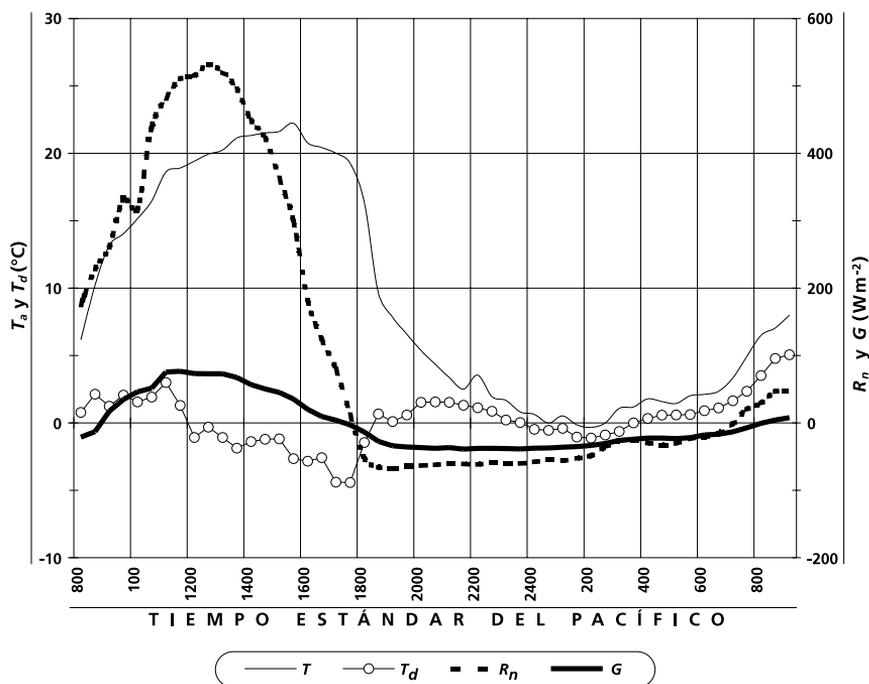
Si la temperatura del aire se mide a la altura suficiente por encima de la superficie del suelo, se alcanzará el punto donde se empieza a disminuir con la altura (una condición normal del gradiente de temperatura). El nivel donde el perfil de temperatura cambia desde una inversión hasta una condición normal del gradiente de temperatura, se denomina techo. Una inversión débil (techo alto) ocurre cuando las temperaturas de la parte superior únicamente son ligeramente más altas que cerca de la superficie y una inversión fuerte (techo bajo) tiene un incremento rápido de la temperatura con al altura. Los métodos de protección intensivos, desde el punto de vista energético, son más efectivos durante las condiciones de techo bajo, condiciones de inversión fuerte que son típicas de las heladas de radiación.

Hay dos subcategorías de heladas de radiación. Una “helada blanca” ocurre cuando el vapor de agua se deposita sobre la superficie y forma una capa blanca de hielo que se denomina normalmente “escarcha”. Una helada “negra” ocurre cuando la temperatura cae por debajo de 0 °C y no se forma hielo sobre la superficie. Si la humedad es suficientemente baja, entonces la temperatura de la superficie puede que no alcance la temperatura del punto de formación de hielo y no se formará escarcha. Cuando la humedad es alta, el hielo es más probable que se deposite y se produce una “helada blanca”. Como el calor se libera durante el proceso de deposición del hielo, las heladas blancas normalmente producen menos daño que las heladas negras.

Observa que las gráficas de la temperatura del aire diaria para las heladas de diciembre de 1990 y de 1998 en California (Figuras 1.1 y 1.2) tienen formas similares en los dos años; sin embargo, la tendencia de la temperatura del punto

FIGURA 1.4

Temperaturas del aire (T_a) y del punto de rocío (T_d) a 1,5 m de altura, radiación neta (R_n) y densidad de flujo de calor al suelo (G) medidos en un campo de nogales en el Valle Indian en el Norte de California, EE.UU.



de rocío fue diferente en los dos años. Como las gráficas de la temperatura del aire tienen una forma similar durante muchas heladas de radiación nocturnas, una buena aproximación de los cambios en la temperatura del aire durante la noche puede hacerse con un modelo empírico. No obstante, debido a la variabilidad, es casi imposible generalizar sobre los cambios en la temperatura del punto de rocío durante la noche.

Una característica de la temperatura del aire en las heladas de radiación nocturnas es que su mayor caída se produce en unas pocas horas después de la puesta del Sol, cuando la radiación neta sobre la superficie cambia rápidamente de positiva a negativa. Este cambio rápido en la radiación neta ocurre porque la radiación solar disminuye desde el valor más alto en mediodía hasta cero en la puesta de Sol, y la radiación neta de onda larga siempre es negativa. Esto se explica con más detalle en el capítulo 3. La Figura 1.4 muestra las tendencias

típicas de la temperatura, la radiación y la densidad de flujo de calor al suelo durante una helada de radiación nocturna. En este ejemplo, la temperatura cae unos 10 °C durante la primera hora después que la radiación neta se vuelva negativa. Una vez la radiación neta ha alcanzado su valor más negativo, la temperatura caerá 10 °C más durante el resto de la noche. La tasa de cambio de temperatura fue pequeña (e.g. menos de 1,0 °C h⁻¹) desde las dos horas después de la puesta de Sol hasta la salida del Sol.

LAS HELADAS DE ADVECCIÓN

Las heladas de advección se producen cuando el aire frío fluye en un área para reemplazar el aire más caliente que estaba presente antes del cambio meteorológico. Está asociada con condiciones de nubosidad, vientos de moderados a fuertes, sin inversión de temperatura y baja humedad. A menudo las temperaturas caerán por debajo del punto de fusión (0 °C) y permanecerán así todo el día. Como muchos de los métodos de protección activos trabajan mejor con la presencia de una inversión, las heladas de advección son difíciles de combatir. En muchos casos, una serie de noches bajo cero empiezan como una helada de advección y cambiarán más tarde a noches con heladas de radiación. Por ejemplo, las dos heladas importantes de California de 1990 y de 1998 que se muestran en las Figuras 1.1 y 1.2 empezaron como heladas de advección. Aunque las velocidades del viento fueron bajas, hubo condiciones de nubosidad desde el 18 al 20 de diciembre de 1990 y del 18 al 22 de diciembre de 1998. Sin embargo, la temperatura todavía cayó hasta mínimos bien por debajo de 0 °C durante estos períodos. Una vez los cielos se despejaron (i.e. 21–25 de diciembre de 1990 y 23–25 de diciembre de 1998), la temperatura bajo cero resultó más por pérdidas de radiación que por advección de aire frío.

Las heladas principales se producen en los climas mediterráneos, pero tienden a ser más comunes en la parte este de los continentes donde las masas de aire frío continental penetran desde las regiones árticas a las áreas subtropicales. Algunos de los mejores ejemplos están en Florida, EE.UU., en la región de cultivo de cítricos. Attaway (1997) describe la primera helada “de mayor impacto”, ocurrida en 1835, citando a John Lee Williams’ que da cuenta de la helada, y que escribió que “el viento del noroeste sopló durante 10 días y la temperatura cayó hasta los -13,9 °C. Incluso el río local se heló, y toda clase de árboles frutales murieron hasta la latitud 28° N”. Evidentemente, existe una gran diferencia cuando se intenta proteger contra temperaturas bajo cero en condiciones de viento sin una inversión que proteger contra una helada de radiación poco severa. Por suerte las heladas de este tipo suelen ser esporádicas, mientras que las heladas de radiación ocurren más a menudo.

CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PROTECCIÓN

Las técnicas de protección contra heladas normalmente se dividen en métodos indirectos y directos (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978), o en métodos pasivos y activos (Kalma *et al.*, 1992). Los métodos pasivos son los que actúan en términos de prevención, normalmente para un periodo largo de tiempo y cuyas acciones son particularmente beneficiosas cuando se producen las condiciones de helada. Los métodos activos son temporales y requieren intensamente energía o trabajo, o ambos. Los métodos pasivos se relacionan con técnicas biológicas y ecológicas, e incluyen prácticas llevadas a cabo antes de las noches de helada para reducir el potencial de daño. Los métodos activos se basan en métodos físicos e intensivos desde el punto de vista energético. Requieren esfuerzo en el día previo o durante la noche de la helada. La protección activa incluye estufas, aspersores y máquinas de viento, que se usan durante la noche de helada para reemplazar las pérdidas de energía natural. En la Tabla 1.2 se presenta una clasificación de los métodos.

EVALUACIÓN GEOGRÁFICA DEL DAÑO POR HELADA A LOS CULTIVOS

Los daños por helada pueden producirse casi en cualquier localidad, fuera de las zonas tropicales, donde la temperatura desciende por debajo del punto de fusión del agua (0 °C). La cantidad de daño depende de la sensibilidad del cultivo a la congelación en el momento de producirse el evento y del tiempo que la temperatura está por debajo de la temperatura “crítica de daño” (T_c). Por ejemplo, Argentina, Australia, Canadá, Finlandia, Francia, Grecia, Israel, Japón, Jordania, Nueva Zelanda, Portugal, Suiza, Estados Unidos de América y Zambia han desarrollado técnicas de previsión de temperatura mínima (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978) para ayudar en la protección contra heladas. Naturalmente, muchos otros países en climas templados y áridos y con altitudes elevadas también tienen problemas con el daño por helada.

En gran medida, el potencial del daño por helada depende de las condiciones locales. Además, es difícil presentar una evaluación geográfica del daño potencial. La longitud media del periodo libre de heladas, que se extiende desde la ocurrencia de la última temperatura bajo cero en la primavera hasta la primera en otoño, es a veces utilizada para caracterizar geográficamente el potencial de daño.

Un mapa mundial de la longitud media del periodo libre de heladas (Figura 1.5) muestra claramente que el mayor potencial de daño por helada aumenta conforme nos movemos hacia los polos. Únicamente a latitudes entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio son áreas relativamente grandes con pocas o ningunas temperaturas bajo cero. Incluso en estas áreas tropicales, los daños

TABLA 1.2

Categorías y subcategorías para los métodos de protección contra heladas

CATEGORIA	SUB-CATEGORIA	MÉTODOS DE PROTECCION
Pasiva	Biológica (evitación o resistencia)	Inducción de resistencia a la congelación sin modificar la genética de las plantas Tratamiento de las semillas con agroquímicos Selección de plantas y mejora genética Selección de especies por el momento de desarrollo fenológico Selección de fechas de plantación para cultivos anuales una vez la probabilidad de helada en primavera ha disminuido Reguladores del crecimiento y otras sustancias químicas
	Ecológica	Selección de emplazamiento para cultivar Modificación del paisaje y microclima Control del estado nutritivo Manejo del suelo Control de la cobertura del cultivo (malas hierbas) y otras coberturas
Activa	Coberturas y Radiación	Materiales orgánicos Coberturas con soporte Coberturas sin soporte
	Agua	Aspersores sobre las plantas Aspersores bajo las plantas Micro-aspersores Riego por superficie Niebla artificial
	Estufas	Combustible sólido Combustible líquido Propano
	Máquinas de viento	Horizontal Vertical Helicópteros
	Combinaciones	Ventiladores y estufas Ventiladores y agua

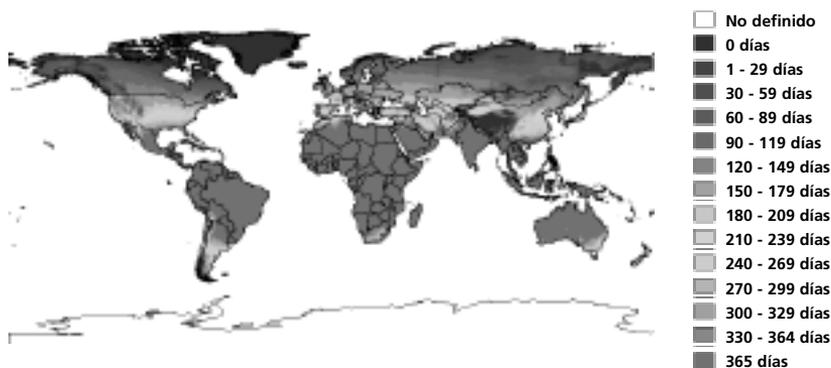
por heladas ocurren a veces a altitudes elevadas. El daño es menos probable cuando la masa de tierra es en la área para donde sopla el viento o está rodeada de grandes cuerpos de agua, por el efecto moderador del ambiente marítimo sobre la humedad y la temperatura, y por tanto de las fluctuaciones de la temperatura y la formación del rocío o escarcha.

A pesar de que el mapa de la longitud media del periodo libre de heladas proporciona una guía general de utilidad sobre dónde es mayor el potencial de daño por helada, no es un mapa detallado. De nuevo, la probabilidad de temperaturas bajo cero está afectada por las condiciones locales que no pueden mostrarse en un mapa global. De hecho, los agricultores pueden experimentar algunas pérdidas económicas debido al daño por heladas incluso si ocurren con poca frecuencia.

Aunque está fuera del alcance de este libro, un esfuerzo considerable se ha realizado recientemente para mejorar la caracterización geográfica del riesgo de daño por helada a escala regional. Kalma *et al.* (1992) publicaron una revisión extensa sobre la caracterización geográfica del riesgo de helada. Por ejemplo, Lomas *et al.* (1989) prepararon un atlas de mapas de riesgo de heladas para Israel. Utilizaron más de 25 años de datos de temperatura e información topográfica para desarrollar los mapas, que muestran claramente una estrecha relación entre la elevación y el riesgo de temperatura bajo cero. Otros han utilizado temperaturas tomadas en dispositivos móviles o información topográfica y de suelos, sin datos de temperatura, para derivar mapas de riesgo. Estudios de casos sobre desarrollo de un mapa de riesgo de helada utilizando un modelo de elevación fueron presentados por Kalma *et al.* (1992) basándose en Laughlin y Kalma (1987, 1990), y por Zinoni *et al.* (2002b).

FIGURA 1.5

Distribución geográfica de la longitud media del periodo libre de heladas. Ver el archivo: "Frost free map.jpeg" en el CD de los programas para ver la distribución en colores



Mientras que se necesita más y mejor información espacial del riesgo de daño por heladas, no hay sustituto para una buena información y seguimiento local. Muchos agricultores tienen una idea acertada sobre la localización de las zonas frías en su localidad. Es definitivamente necesario consultar a los vecinos antes de plantar cultivos sensibles en un emplazamiento específico. Generalmente, deben evitarse las zonas bajas, donde el aire frío se embalsa. Hay que evitar también las áreas donde la topografía natural o modificada impide el drenaje del aire frío desde el emplazamiento. Como la niebla del suelo se forma inicialmente en las zonas bajas, una buena regla es evitar los emplazamientos donde se forma pronto la niebla. Definitivamente, se deberían revisar los mapas topográficos locales antes de plantar cultivos sensibles a las heladas en emplazamientos de alto riesgo. Por ejemplo, como la floración es tardía, raramente es necesaria la protección contra heladas en las plantaciones de nogales en California, pero los autores han observado que unas cuantas plantaciones situadas en zonas frías experimentan normalmente daños por heladas. Esto hubiera podido evitarse fácilmente comprobando los registros meteorológicos locales y los mapas topográficos. La selección del emplazamiento se discute con más detalle más tarde, en la sección dedicada a la protección pasiva.

IMPORTANCIA ECONÓMICA DEL DAÑO POR HELADAS

En los EE.UU. se producen más pérdidas económicas por congelación de cultivos que por cualquier otro riesgo meteorológico. En el Estado de Florida, la industria de los cítricos ha sido devastada por el daño de las heladas en varias ocasiones, resultando en el coste de frutos y árboles de varios miles de millones de dólares (Cooper, Young y Turrell, 1964; Martsolf *et al.*, 1984; Attaway, 1997). En California, la helada de diciembre de 1990 causó aproximadamente 500 millones de dólares en pérdidas de frutos y daños a aproximadamente 450 000 ha de árboles (Attaway, 1997). Hubo aproximadamente 700 millones de dólares en daños durante la helada de diciembre de 1998 (Tiefenbacher, Hagelman y Secora, 2000). De forma similar, se han observado con frecuencia en todo el mundo enormes pérdidas económicas otros cultivos hortofrutícolas sensibles.

Por ejemplo, Hewitt (1983) describió los efectos de la congelación en la producción de café en Brasil durante la década de 1960 y de 1970. La muerte en invierno de cereales también es un problema importante (Stebelsky, 1983; Caprio y Snyder, 1984a, 1984b; Cox, Larsen y Brun, 1986).

Aunque las pérdidas de los agricultores pueden ser enormes, también hay muchos efectos secundarios en las comunidades locales y regionales. Por ejemplo, si no hay fruta para recoger, los recogedores de fruta estarán sin empleo,

los procesadores tendrán poca o ninguna fruta, y por ello los empleados estarán sin trabajo, y, debido al desempleo, habrá menos dinero en circulación y la economía local sufrirá. Consecuentemente, hay que emplear un esfuerzo considerable en reducir el daño por helada.

La eficacia en costes de la protección contra heladas depende de la frecuencia de la ocurrencia, del coste del método de protección y del valor del cultivo. Generalmente, la protección pasiva de heladas se justifica con facilidad. La eficacia en costes de la protección activa depende del valor del cultivo y del coste del método. En este libro se discuten tanto los métodos pasivos como los activos, así como la economía de la protección.

HISTORIA DE LA PROTECCIÓN CONTRA HELADAS

El daño por helada a los cultivos ha sido un problema para los humanos desde que se cultivaron los primeros cultivos. Aunque todos los aspectos de la producción de los cultivos estén bien gestionados, una noche con temperaturas de congelación puede conducir a la pérdida completa del cultivo. Excepto para las latitudes de los trópicos, donde las temperaturas en raras ocasiones caen por debajo de punto de fusión, el daño debido a las temperaturas de congelación es un problema mundial. Normalmente, el daño por helada en climas subtropicales está asociado con el movimiento lento de masas de aire frío que puede traer 2–4 noches de 8–10 horas de temperatura bajo cero (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978). En las localizaciones continentales del este, los eventos que causan daño son normalmente los advectivos, con inversiones débiles. En los climas continentales del oeste y en los marítimos, los eventos de helada son más típicos en condiciones de calma y fuertes inversiones. Los eventos que causan daño empiezan normalmente con advección de aire frío seguido por unas pocas noches con heladas de radiación. En los climas templados, los periodos de helada son de duración más corta y se producen de forma más frecuente que en otros climas (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978).

Para los frutales de hoja caduca y árboles de frutos secos, los eventos de helada que producen daño ocurren principalmente en primavera, aunque a veces también ocurren en otoño. Para los frutales subtropicales, el daño a los cultivos ocurre normalmente durante el invierno. En los climas tropicales, normalmente no hay congelación excepto en las altitudes más altas. En consecuencia, cuando los cultivos tropicales son dañados por el frío, la temperatura está normalmente por encima de cero. Cuando ocurre daño a temperaturas por encima de 0 °C, se denomina daño por “enfriamiento” más que por “congelación”. En los climas templados, el daño a los cultivos de grano puede ocurrir también antes de la fase

de hinchamiento de las espigas bajo condiciones severas, o a las flores incluso con heladas moderadas.

Para los agricultores productores de grano, la principal respuesta es plantar cultivos o variedades que sean menos susceptibles al daño (e.g. plantar trigo de primavera más que trigo de invierno), o no plantar cultivos sensibles en la zona si el daño se produce con demasiada frecuencia. En cualquier caso, la fecha de plantación debería ajustarse al cultivo, a la variedad y al microclima. De forma similar, si las temperaturas bajo cero se producen de forma muy frecuente, los cultivos subtropicales se cultivan preferentemente en regiones con menor ocurrencia de daño. Un buen ejemplo de ello es el movimiento de la industria de los cítricos más al Sur de Florida en respuesta a las distintas heladas graves durante la década de los años 1980 y de 1990 (Attaway, 1997). Al mismo tiempo, debido a temperaturas más favorables, la industria del olivo se ha ido moviendo hacia el norte de Italia donde los factores, suelo y clima, permiten la producción de aceite de oliva de alta calidad. Sin embargo, esto ha conducido al aumento de daño por heladas a los olivos durante los inviernos más rigurosos de 1985, 1991 y 1996 (Rotondi y Magli, 1998). De forma general, las fechas de la ocurrencia de la última helada en primavera y de la primera ocurrencia en otoño determinarán donde se cultivan los plantas en particular. Por ejemplo, muchos de los frutales de hoja caduca y de frutos secos tienden a cultivarse en los climas mediterráneos porque la probabilidad de perder un cultivo por daños por helada es menor que en climas continentales. La ciencia de la protección contra heladas se ha desarrollado principalmente en respuesta a la ocurrencia de daños de forma intermitente en climas relativamente favorables. Si el daño se produce con cierta regularidad, la mejor estrategia es cultivar el cultivo en cualquier localidad más favorable.

En algunos casos, las localizaciones de cultivos cambian en respuesta al cambio climático. Por ejemplo, Attaway (1997) observó que antes de 1835 los naranjos se cultivaban normalmente en Carolina del Sur, Georgia y el Norte de Florida, donde, la gente hoy en día no consideraría la producción comercial de naranjas debido a las pérdidas potenciales por daño por helada. Attaway citó algunos ejemplos de frutales subtropicales que han sobrevivido hasta aproximadamente 1835, cuando se produjo una helada grave. De hecho, existían citas de documentos recomendando el cultivo de frutas subtropicales en el Sudeste de América para poder competir con la fruta producida en los países mediterráneos de Europa. Con el clima actual, la producción de frutas subtropicales no se podría considerar en estas áreas. Attaway (1997) indica que sus observaciones están basadas más en la experiencia de los agricultores que en la climatología, pero pocos eventos de heladas capaces de producir daño deben haber ocurrido

durante los periodos de 1700–1800s para que los agricultores hayan producido frutas subtropicales donde, hoy en día, no pueden producirse económicamente.

La historia del daño por heladas es más esporádica en el clima mediterráneo de California. Han existido algunas pérdidas importantes de tanto en tanto, pero la diversidad de cultivos y el momento de las heladas conducen a una menor extensión de los impactos en California. Recientemente, la industria de los cítricos en California ha sufrido dos eventos que han producido daños importantes. Uno ocurrió en diciembre de 1990 y el otro en diciembre de 1998. La helada de 1990 causó los daños más importantes a la producción de cítricos desde las heladas de 1913 y de 1937 (Attaway, 1997). Es interesante cómo algunas regiones sufrieron daños pequeños, mientras que otras fueron devastadas. Attaway (1997) observó que a pesar de que el daño a los frutos fue inmenso,

“muchos árboles estaban en condiciones relativamente buenas aunque tuvieron que aguantar temperaturas que hubieran matado los árboles en Florida. Atribuimos esto al hecho de que las dos semanas anteriores a la helada se produjeron por las mañanas temperaturas bajas del orden de 20 y 30 °F [i.e. entre unos -4 °C y +2 °C], poniendo los árboles casi por completo en un estado durmiente.”

La helada de diciembre de 2000 fue un buen ejemplo de cómo el endurecimiento puede proporcionar protección contra el daño por helada. En Florida, antes del paso de un frente frío y la caída de las temperaturas bajo cero, temperaturas relativamente cálidas preceden a una helada grave. Consecuentemente, los árboles están menos endurecidos contra los daños por helada que aquellos expuestos en las dos heladas de California. De forma interesante, Attaway (1997) enfatizó la naturaleza inconsistente del daño por helada que se observó tras la helada. Por ejemplo, dentro de una región relativamente pequeña, observó pérdidas del 70% al 80% de la producción de naranjas en el valle de Ojai, pérdidas del 60% al 70% en el cañón de Santa Paula, pero solo pérdidas del 20% en el valle de Santa Clara, que está relativamente cerca. Esto ilustra la naturaleza asociada de forma específica a un lugar del daño por helada a los cultivos, especialmente en regiones montañosas y con cuevas como el condado de Ventura en California.

La helada de diciembre de 1998 no fue tan mala para los citricultores de California como lo fue la de 1990; sin embargo, todavía está considerada como una de las heladas más importantes del siglo veinte. Las pérdidas económicas fueron altas; no obstante, a diferencia de la helada de 1990, muchos agricultores fueron capaces de sobrevivir (Tiefenbacher, Hagelman y Secora, 2000). En su informe sobre la helada de diciembre de 1998 en el valle de San Joaquín, en California, Tiefenbacher, Hagelman y Secora (2000) observaron que existía una

clara relación entre la latitud y el daño producido y entre la latitud y la cosecha anticipada a la helada. Observaron que las plantaciones más al norte sufrieron más daño por helada, pero también que cosecharon considerablemente antes que la primera helada, lo que les permitió sobrevivir con menos pérdidas económicas. También observaron una relación entre la longitud y la edad y tamaño de las plantaciones, y a su vez la relación con la elevación. En el valle de San Joaquín, las plantaciones más viejas están localizadas en la zona este a elevaciones más altas, mientras que las plantaciones más jóvenes están en el oeste a las elevaciones más bajas del valle. Los revisores recomendaron que los modelos micrometeorológicos, combinados con datos digitales de la elevación e información detallada sobre los daños, podrían ayudar a entender los patrones espaciales del riesgo de daño.

Tiefenbacher, Hagelman y Secora (2000) observaron que las empresas más grandes perdían, en proporción, más producción, mientras que los pequeños agricultores y los miembros de cooperativas perdían menos. Esto fue parcialmente atribuido a la comunicación entre las organizaciones cooperativas y al hecho de que muchos agricultores pequeños cosecharon antes de la helada. Después de la helada de 1990, muchos de los agricultores empezaron a comprar seguros de cosechas contra catástrofes y los agricultores con seguro experimentaron más daño en 1998. Esto pudo ocurrir debido a que sus plantaciones eran más dadas a sufrir daños o, a que pudo haber menos esfuerzo en utilizar métodos de protección ya que disponían de seguro. La respuesta no se sabe. Además, Tiefenbacher, Hagelman y Secora (2000) observaron que la asistencia del gobierno frente al desastre pudo influir en las actividades de protección contra heladas por parte de los agricultores. Tanto en 1990 como en 1998, el gobierno proporcionó ayudas para hacer frente al desastre y ayudar a los agricultores a recuperar sus pérdidas. Mientras este alivio frente al desastre es de gran ayuda para los agricultores, puede al mismo tiempo desanimar a los agricultores a utilizar métodos de protección activos y puede animar a la expansión de la industria hacia áreas donde el riesgo del daño por helada es más alto (Tiefenbacher, Hagelman y Secora, 2000).

Históricamente, las estufas se han utilizado para proteger las plantas de la congelación durante más de 2000 años (Powell y Himelrick, 2000). Originalmente, las estufas eran mayoritariamente fuegos abiertos; sin embargo, en la historia reciente, se han utilizado contenedores de metal para el fuego para retener mejor el calor por radiación y por convección para el cultivo. Powell y Himelrick (2000) escribieron que un 75% de la energía de las estufas de chimenea es utilizada para calentar el aire directamente, que después es convectado hacia el

cultivo directa o indirectamente mezclando el aire dentro de la capa de inversión. Atribuyeron el 25 por ciento adicional de energía como transferencia desde las chimeneas de las estufas hacia las plantas como radiación directa, lo cual es efectivo incluso durante las heladas de advección.

Las primeras estufas con contenedor metálico conocidas (i.e. estufas con chimenea o recipientes que producían humo) para la protección contra heladas fueron introducidas por W.C. Scheu en 1907 en Grand Junction, Colorado, EE.UU. Descubrió que los dispositivos utilizados para calentar que quemaban petróleo eran más eficientes que los fuegos abiertos. Más tarde se conoció como estufas para plantaciones frutales HY-LO, las cuales eran fabricadas por la Scheu Manufacturing Company, que todavía hoy produce estufas portátiles. Incluso antes de las estufas para plantaciones frutales HY-LO los agricultores utilizaban contenedores metálicos sencillos que quemaban aceites pesados o neumáticos viejos de caucho que contenían serrín. Estos fuegos producían considerable humo aceitoso que durante un largo tiempo se creyó que proporcionaban protección contra la congelación bloqueando las pérdidas de radiación neta desde la superficie. De hecho, se sabe que si añaden partículas de humo al aire desde las estufas en las plantaciones frutales se aporta una escasa o prácticamente nula protección (Mee y Bartholic, 1979). El uso de las estufas para plantaciones frutales fue una práctica muy extendida durante algún tiempo, pero el humo era un contaminante terrible y el uso de las estufas en las plantaciones frutales que producen humo fue más tarde prohibido en los EE.UU. por razones sanitarias y ambientales. Se necesitó una fuerte protesta pública para eliminar definitivamente el uso de estufas que producen humo. Por ejemplo, el periódico de Pasadena Star-News, el 20 de octubre de 1947, publicaron una petición de Louis C. McCabe, director del recientemente constituido distrito para el control de la contaminación del aire de Los Ángeles, para eliminar el humo que producían los más de 4 millones de estufas en las plantaciones frutales. El distrito de control de la contaminación del aire del condado de Orange y otros siete distritos en California adoptaron regulaciones que prohibían el uso de combustibles sucios y recipientes que producían humo (SCAQMD, 2002).

En los EE.UU., los agricultores tuvieron pocos años para encontrar un método de protección contra heladas menos contaminante. Eventualmente, se desarrolló y durante algún tiempo se utilizó la estufa “con chimenea de retorno”, que recirculaba el humo y el vapor, (Leonard, 1951). Hoy en día, las estufas con chimenea de retorno y las estufas con combustible de propano de quema limpia son legales en muchas localidades; sin embargo, antes de utilizar cualquier tipo de estufa deben consultarse las regulaciones locales. No obstante, la percepción

del aumento de los costes del combustible y los aspectos de contaminación de mediados de los años cincuenta ha llevado a la desaparición de la mayoría de las estufas para la protección contra heladas. Durante los años 50, las máquinas de viento empezaron a sustituir a las estufas como el método preferido de protección contra las heladas. Eran más caras de comprar, pero la mano de obra y los costes de funcionamiento eran más bajos. Hacia los años 70, el uso de estufas para la protección contra heladas era casi inexistente en California. Pequeños fuegos y estufas con combustible sólido todavía se utilizan en algunas partes del mundo. Sin embargo, es probable que finalmente se paralice el uso de todas las estufas quemadoras salvo las limpias.

LOS MÉTODOS RECOMENDADOS DE PROTECCIÓN CONTRA LAS HELADAS

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta información sobre aspectos importantes de los métodos de protección de heladas sin utilizar ecuaciones o conceptos complicados. Se proporciona información más detallada en los siguientes capítulos. Las referencias no se han incluido en este capítulo para reducir su tamaño y para simplificar la lectura.

LA SENSIBILIDAD DE LOS CULTIVOS Y LAS TEMPERATURAS CRÍTICAS

El daño que provocan las heladas a los cultivos no se debe a las frías temperaturas sino principalmente a la formación de hielo extracelular (i.e. fuera de las células) dentro del tejido de la planta, provocando la salida de agua y dañando las células por deshidratación. Después de periodos fríos, las plantas tienden a endurecerse contra el daño por congelación y pierden su dureza tras una temporada cálida. Una combinación de estos y otros factores determina la temperatura a la cual se forma el hielo dentro del tejido de las plantas y en qué momento se produce el daño. La cantidad de daño por helada aumenta con la caída de temperatura y la temperatura correspondiente a un nivel específico de daño se denomina “Temperatura crítica” o “Temperatura crítica de daño”, y se expresa por el símbolo T_c . En general, la mayor parte de temperaturas críticas se determinan en estudios realizados en cámaras de crecimiento que se van enfriando a un ritmo predeterminado que se mantiene durante 30 minutos. Después se registra el porcentaje de daño.

Las categorías de resistencia de cultivos hortícolas a las heladas y de otras plantas se indican en las Tablas 4.1 y 4.2. Para otros cultivos herbáceos los intervalos de temperatura crítica de daño se presentan en la Tabla 4.5. Los valores de temperatura crítica se dan para almendros (Tabla 4.6), otros frutales de hoja caduca y viña (Tablas 4.7 y 4.8), pequeños frutos, kiwis y fresas (Tabla 4.9), y cítricos (Tabla 4.10). En muchas de estas tablas, se proporcionan los valores T_{10} y T_{90} , donde T_{10} y T_{90} son las temperaturas donde el 10% y el 90% de la producción comercial es probable que sea dañada. Generalmente, las dos

temperaturas T_{10} y T_{90} aumentan con el tiempo después del desarrollo inicial de las yemas hasta el estadio de fruto pequeño, que es cuando los cultivos son más sensibles a la congelación. El valor T_{90} es bastante bajo al comienzo del crecimiento pero aumenta más rápidamente que T_{10} y existe una diferencia pequeña entre T_{10} y T_{90} cuando el cultivo es más sensible. Los valores de T_c para árboles frutales y viña varían con el estadio fenológico (Tablas 4.6 a 4.8). En Internet pueden encontrarse fotografías donde se muestran los estadios fenológicos de muchos de estos cultivos, incluyendo direcciones como fruit.prosser.wsu.edu/frsttables.htm o www.msue.msu.edu/vanburen/crittemp.htm.

A pesar de que los valores de T_c proporcionan alguna información sobre cuándo poner en marcha y detener los métodos activos de protección contra heladas, deberían utilizarse con precaución. Generalmente, los valores de T_c representan la temperatura de las yemas, de las flores y de los frutos pequeños donde se ha observado un nivel conocido de daño. Sin embargo, es difícil medir los tejidos sensibles de las plantas, y estas temperaturas es probable que difieran de la temperatura del aire, que es la que normalmente miden los agricultores. Excepto para frutos grandes (e.g. como las naranjas), las temperaturas de las yemas, de las flores y de los frutos pequeños tienden a ser más frías que la temperatura del aire, por ello los métodos activos de protección deberían ponerse en marcha y detenerse a temperaturas del aire más altas que las indicadas en las tablas del Capítulo 4. Para los frutos grandes, como los cítricos, la temperatura del aire al atardecer a menudo cae más rápidamente que la temperatura del fruto, por ello las estufas o los ventiladores pueden ponerse en marcha cuando la temperatura del aire está a la temperatura T_c o ligeramente por debajo. Los valores de T_c en el Capítulo 4 proporcionan unas directrices para conocer el momento de activar los métodos activos de protección, aunque estos valores deberían utilizarse con precaución ya que hay otros factores como las diferencias entre la temperatura de la planta y del aire; el grado de endurecimiento; y la concentración de bacterias activas en la nucleación de hielo (INA).

LA PROTECCIÓN PASIVA

La protección pasiva incluye métodos que se han implementado antes de la noche de la helada lo que puede evitar la necesidad de protección activa. Los principales métodos pasivos son:

- La selección del emplazamiento;
- El manejo del drenaje de aire frío;
- La selección de plantas;
- La cobertura con árboles;

- La gestión de la nutrición de las plantas;
- La poda adecuada;
- La cobertura de las plantas;
- El evitar el laboreo del suelo;
- El riego;
- El suprimir las cubiertas de hierba que cubren el suelo;
- Las coberturas del suelo;
- El pintar los troncos y envolturas;
- El control bacteriano; y
- La fecha de siembra para los cultivos anuales.

Los métodos pasivos son normalmente menos costosos que los métodos activos y a menudo los beneficios son suficientes para evitar la necesidad de la protección activa.

La selección del emplazamiento y manejo

Los agricultores son conscientes de que algunas zonas son más propensas que otras al daño por heladas. El primer paso para seleccionar un emplazamiento para una nueva plantación es hablar con la gente del lugar sobre qué cultivos y variedades son apropiadas para el área. Los agricultores y técnicos de la zona a menudo tienen más idea sobre qué emplazamientos pueden ser más problemáticos. Normalmente, las zonas topográficas bajas tienen temperaturas más frías y por tanto pueden sufrir más daño. Hay que tener en cuenta que el daño a veces puede ocurrir en una parte del área cultivada y no en otra, sin que se aprecien diferencias topográficas. En algunos casos ello puede ser debido a las diferencias en el tipo de suelo, que puede afectar a la conducción y al almacenamiento del calor en el suelo.

Los suelos arenosos y secos transfieren el calor mejor que los suelos arcillosos pesados y secos, y ambos transfieren el calor mejor que los suelos orgánicos (turbas). Cuando el contenido de agua está cerca de la capacidad de campo (i.e. un día o dos después de una buena humectación del suelo), muchos suelos presentan las condiciones que son más favorables para la transferencia y almacenamiento del calor. No obstante, los suelos orgánicos tienen una pobre transferencia y almacenamiento de calor independientemente del contenido de agua. Cuando se selecciona un emplazamiento en una región propensa a las heladas, hay que evitar plantar en los suelos orgánicos.

El aire frío es más denso que el aire caliente, y por consiguiente fluye ladera abajo y se acumula en las zonas bajas igual que el agua en una inundación (Figura 6.4). Por ello se deben evitar las posiciones más bajas de fondo, a no ser que como

estrategia a largo plazo se incluyan métodos de protección activos efectivos con relación a su coste. Esto es importante tanto a escala regional como al nivel de explotación agrícola. Por ejemplo, a escala regional, los fondos de valle cercanos a los ríos son normalmente más fríos que las pendientes situadas más arriba. Estas zonas pueden identificarse a partir de mapas topográficos, recogiendo datos de temperatura, y localizando las áreas donde se forman primero las nieblas a nivel del suelo. Las zonas bajas tienen consistentemente las noches más frías, cuando el cielo está despejado y el viento es débil, durante todo el año. Por esto, las medidas de temperatura para identificar las zonas frías pueden realizarse en cualquier momento del año.

La plantación de cultivos de hoja caduca en las pendientes cara norte retrasa la floración en primavera y, a menudo, proporciona protección. En el caso de los árboles subtropicales, es mejor plantarlos en las pendientes de las solanas donde el suelo y los cultivos pueden recibir y almacenar más energía directa del Sol.

El drenaje de aire frío

Para controlar el flujo de aire alrededor de zonas agrícolas, a veces se utilizan los árboles, los arbustos, los terraplenes, las pilas de heno, y las verjas. El propio emplazamiento puede afectar el potencial de daño por helada. Un estudio cuidadoso de los mapas topográficos puede, a menudo, prevenir los problemas de daño por helada más importantes. También puede proporcionar información el uso de bombas de humo u otros dispositivos que generen humo para estudiar el flujo de aire frío durante la noche pendiente abajo. Estos estudios se deben realizar en noches con heladas de radiación características, pero no necesariamente cuando la temperatura está bajo cero. Una vez se conoce el patrón del drenaje de aire, entonces la correcta colocación de obstáculos para su desviación puede proporcionar un elevado grado de protección.

Si ya existe un cultivo en una zona fría, hay varias prácticas de manejo que pueden ayudar a reducir el riesgo de daño por helada. Cualquier obstáculo que impida el drenaje de aire frío pendiente abajo desde un cultivo debe eliminarse. Estos obstáculos pueden ser los setos, las verjas, las balas de heno o la vegetación densa situada en la parte baja de la pendiente del campo. La nivelación de tierras a veces puede mejorar el drenaje de aire frío a través del cultivo y en consecuencia al aire frío que llega continua el paso a su través. Las hileras de las plantaciones frutales y de los viñedos deberían orientarse a favor del drenaje natural del aire frío hacia fuera del cultivo. Sin embargo, la ventaja de orientar las hileras de los cultivos tiene que equilibrarse frente a la desventaja de una mayor erosión y de otros inconvenientes. Las hierbas y los rastrojos de las plantas en las zonas

superiores de las pendientes donde esta situado el cultivo pueden enfriar más el aire y favorecer el drenaje de aire en el cultivo. La temperatura del aire medida dentro de los viñedos o de las plantaciones de cítricos con residuos de plantas o cubierta de hierba normalmente varía entre 0 °C y 0,5 °C más fría que los viñedos y las plantaciones de cítricos con suelo desnudo, dependiendo de las condiciones del suelo y de la meteorología. Si el cultivo no está presente, las diferencias serían probablemente más grandes. Por ello, tener un suelo desnudo pendiente arriba de un cultivo generalmente conducirá a temperaturas del aire más altas en el suelo de la parte superior de la pendiente y menor probabilidad de drenaje de aire frío hacia el cultivo.

La selección de plantas

Es importante escoger plantas con floración tardía para reducir la probabilidad de daño debido a la congelación, y seleccionar plantas más tolerantes a la congelación. Por ejemplo, los árboles frutales de hoja caduca y las viñas normalmente no sufren daño por helada en el tronco, las ramas o en las yemas dormidas, pero experimentan daños conforme se desarrollan las flores y los frutos. Seleccionar plantas de hoja caduca que tienen yemas de brotación tardía proporciona una buena protección ya que la probabilidad y el riesgo de daño por helada disminuyen rápidamente en primavera. En cítricos, hay que seleccionar variedades más resistentes. Por ejemplo, los limoneros son menos tolerantes al daño por helada, seguido de las limas, los pomelos, los tangerinos y las naranjas, que son las más tolerantes. También se sabe que los patrones o porta-injertos de naranjo trifoliado mejora la tolerancia de los cítricos comparado con otros porta-injertos.

Para los cultivos anuales y en hilera, es importante determinar la fecha de plantación que minimiza el potencial para las temperaturas bajo cero. En algunos casos, los cultivos no se plantan directamente en el exterior sino que se plantan en ambientes protegidos y transplantados al campo después de que el peligro de congelación ha pasado. En este libro se incluyen algunos programas de aplicación Excel sobre probabilidad y riesgo y su uso se discute en el capítulo de probabilidad y riesgo. Si las temperaturas de congelación no pueden evitarse, entonces hay que seleccionar los cultivos a plantar basándose en su tolerancia a las temperaturas bajo cero.

La cobertura con árboles

En el sur de California, los agricultores plantan cultivos intercalados de cítricos y de palmera datilera, en parte porque las palmeras datileras proporcionan algo de protección a los cítricos. Como los dátiles también son un producto

comerciable, constituyen un método eficiente de proporcionar protección contra heladas sin experimentar pérdidas económicas relevantes. En Alabama, algunos agricultores interplantan pinos en las plantaciones de mandarina Satsuma y los pinos favorecen la radiación incidente de onda larga y proporcionan protección a los mandarinos. En Brasil se utilizan árboles de sombra para proteger los cafetales del daño por helada.

La gestión de la nutrición de las plantas

Los árboles que no están sanos son más susceptibles al daño por heladas y la fertilización mejora la salud de las plantas. Los árboles que no están adecuadamente fertilizados, también tienden a perder sus hojas antes en otoño y la floración es más temprana en primavera, lo cual aumenta la susceptibilidad al daño por helada. Sin embargo, se desconoce la relación entre determinados nutrientes y el aumento de resistencia, y la literatura contiene muchas contradicciones e interpretaciones parciales. En general, la fertilización con nitrógeno y fósforo antes de una helada favorece el crecimiento y aumenta la susceptibilidad al daño por helada. Para favorecer el endurecimiento de las plantas, hay que evitar las aplicaciones de fertilizante nitrogenado al final del verano o al inicio del otoño. No obstante, el fósforo también es importante para la división celular y por ello es importante para recuperar los tejidos después de la congelación. El potasio tiene un efecto favorable en las plantas sobre la regulación hídrica y la fotosíntesis. Sin embargo, los investigadores están divididos sobre los beneficios del potasio en la protección contra heladas.

El manejo de plagas

La aplicación de aceites insecticidas a los cítricos se sabe que aumenta el daño por helada y la aplicación debería evitarse con anterioridad a la estación de heladas.

Una poda adecuada

La poda tardía está recomendada en las vides para retrasar el crecimiento y la floración. La doble poda es a menudo beneficiosa por que supone que todavía se dispone de madera para la producción tras una helada dañina. La poda, en primer lugar, de las ramas más bajas de las vides y volver a podar más tarde las ramas más altas es una buena práctica, ya que las ramas más bajas son más propensas al daño. La poda de las vides para que el fruto esté más alto sobre el suelo proporciona protección, ya que, durante las noches de helada, las temperaturas aumentan normalmente con la altura. La poda a finales de otoño de los cítricos conduce a más actividad fisiológica durante la estación de heladas de invierno. La poda de cítricos

debería estar completamente realizada mucho antes de la estación de heladas. Por ejemplo, se han observado daños importantes en cítricos desmochados en octubre al producirse la helada en diciembre. Si los árboles de hoja caduca se cultivan en un clima suficientemente frío para provocar daño a las yemas dormidas, entonces los árboles no deberían podarse. Por otra parte, la poda de árboles de hoja caduca puede realizarse durante el periodo de dormancia con pocos problemas.

Cobertura de las plantas

Las plantas protegidas están más calientes que el cielo despejado y, en consecuencia, aumentan la radiación de onda larga descendente durante la noche, además de reducir las pérdidas de calor por convección hacia el aire. Normalmente se utilizan las cubiertas con paja y materiales sintéticos. Debido a los costes de mano de obra, este método se utiliza principalmente en pequeñas plantaciones de plantas bajas que no requieren de una estructura sólida. Algunas veces se dan problemas de enfermedades debido a una ventilación deficiente. Los plásticos de polipropileno tejido o 'spunbonded' se utilizan a veces para proteger cultivos de alto valor. El grado de protección varía de 1 °C a 5 °C, dependiendo del grosor del plástico. El plástico blanco se utiliza a veces en viveros pero no para cultivos frutales y hortícolas. Se ha observado que la cobertura parcial de las vides, con polietileno negro, aumenta la temperatura del aire cerca del follaje hasta 1,5 °C. Sin embargo, el plástico claro es generalmente más efectivo.

Evitar el laboreo del suelo

El trabajo del suelo crea espacios de aire en el suelo y debería evitarse durante los periodos propensos a las heladas. El aire es un pobre conductor del calor y tiene un calor específico bajo, por ello los suelos, con más espacios de aire y más grandes, tienden a transferir y a almacenar menos el calor. Si se labra un suelo, para mejorar la transferencia y el almacenamiento del calor, hay que compactarlo y regarlo.

El riego

Cuando los suelos están secos, hay más espacios de aire que inhiben la transferencia y el almacenamiento del calor. Además, en los años secos, la protección contra heladas se mejora humedeciendo los suelos secos. El objetivo es mantener el contenido de agua del suelo cercano a la capacidad de campo, que normalmente es el contenido de agua entre 1 y los 3 días que siguen a su humedecimiento. No es necesario humedecer el suelo en profundidad ya que la mayoría de las transferencias de calor diarias y el almacenamiento se produce en los 30 cm superiores. Humedecer el suelo lo hace más oscuro, y aumenta la

absorción de la radiación solar. Sin embargo, cuando la superficie está húmeda, entonces también aumenta la evaporación y las pérdidas de energía por evaporación tienden a contrarrestar los beneficios de una mejor absorción de la radiación. Lo mejor es humedecer los suelos secos con antelación a la helada, de forma que el Sol pueda calentar el suelo.

Eliminación de las cubiertas de hierba

Para una protección pasiva de las heladas, es mejor eliminar toda la vegetación (cultivos de cobertura) de las plantaciones de frutales y de los viñedos. Eliminar los cultivos de cobertura favorecerá la absorción de la radiación por el suelo, lo cual mejora la transferencia y almacenamiento de energía. Se sabe que los cultivos de cobertura hospedan concentraciones más altas de bacterias activas nucleadoras de hielo (INA) que muchas plantaciones de frutales y viñedos, por ello la presencia de vegetación en el suelo de una plantación frutal y de un viñedo aumenta la concentración de bacterias INA sobre el cultivo y favorece el potencial de daño por helada.

Generalmente, segar, labrar y vaporizar con herbicidas son los métodos para eliminar la vegetación del suelo. Si es posible, la vegetación debe segarse suficientemente temprano para permitir que los residuos se descompongan o de lo contrario la vegetación cortada debería eliminarse. Para hierbas más altas de 5 cm, hay una diferencia pequeña con la temperatura de la superficie del suelo de la plantación frutal, pero la temperatura de la superficie aumenta conforme la cubierta vegetal es más corta, hasta la temperatura mínima de la superficie más alta que se obtiene para un suelo desnudo. Diferencias en la temperatura mínima de la superficie del suelo de la plantación frutal tan altas como 2 °C han sido descritas entre un suelo desnudo y un suelo con una cubierta de hierba de 5 cm de altura. Sin embargo, la diferencia con la temperatura del aire es probable que sea menos de 2 °C. El laboreo del suelo debería realizarse con bastante antelación a la estación de heladas y el suelo debería compactarse y regarse después del laboreo para mejorar la transferencia y el almacenamiento de calor. El método más efectivo es el uso de herbicidas para matar la vegetación del suelo o detener su crecimiento. Una vez más, ésta práctica debería realizarse con bastante antelación al periodo de heladas.

Las coberturas de los suelos

Las coberturas con plásticos se utilizan con frecuencia para calentar el suelo y aumentar la protección. Los plásticos claros calientan más el suelo que los plásticos negros, y humedecer el suelo antes de aplicar el plástico mejorará más su eficacia. Algunas veces se utilizan coberturas vegetales durante la dormancia

de los árboles cultivados para ayudar a prevenir el daño a las raíces por congelación y evitar el empuje del suelo hacia arriba cuando se congela; no obstante, las coberturas vegetales reducen la transferencia del calor en el suelo haciendo las plantaciones frutales más sensibles a las heladas una vez se han abierto las yemas. En general, las coberturas vegetales sólo se recomiendan para localidades donde hay problemas de heladas que provocan una elevación de la superficie del suelo debido a su congelación. Para las plantaciones de árboles frutales de hoja perenne, la poda de los bordes de los árboles permite una mejor transferencia de radiación hacia el suelo bajo los árboles y una mejor protección.

Pintar los troncos y envolturas

La corteza de los árboles de hoja caduca, algunas veces, se separa cuando existen fluctuaciones grandes en la temperatura entre un día cálido y una noche helada. Pintar los troncos con una pintura blanca de látex diluida al 50% con agua a finales de otoño, cuando la temperatura del aire está por encima de 10 °C, reducirá este problema. La pintura blanca, el aislamiento y otras envolturas se sabe que mejora la dureza contra el daño por las heladas en melocotoneros. La pintura o las envolturas disminuyen las altas temperaturas del cámbium a finales de invierno debido a la radiación durante el día, lo cual mejora su resistencia. Envolver los troncos de los árboles con aislantes (i.e. materiales que contienen espacios de aire que resisten la transferencia del calor) protegerá los árboles jóvenes del daño por heladas y de su posible muerte. Los factores críticos son el uso de aislantes que no absorban agua y que los troncos deben envolverse desde la superficie del suelo hasta lo más alto posible. Las envolturas aislantes que utilizan fibra de vidrio y de poliuretano con una resistencia más alta a la transferencia del calor proporcionan la mejor protección entre las envolturas comercialmente disponibles. Normalmente, las envolturas de troncos se quitan después de 3 a 4 años. Se ha descrito que envolver los troncos de cítricos jóvenes con bolsas de agua da incluso mejor protección que la fibra de vidrio o la espuma de poliuretano. El principal inconveniente de las envolturas de troncos es el aumento potencial de problemas de enfermedades, por ello, los puntos de injerto deberían estar por lo menos a 15 cm por encima del suelo. Para ayudar a reducir los problemas de enfermedades hay que aplicar fungicidas antes de envolver el tronco.

El control bacteriano

Para que ocurra la congelación, el proceso de formación de hielo se inicia principalmente por la presencia de bacterias INA. Contra mayor sea la concentración de bacterias INA, más probable será la formación de hielo. Después

de su formación, se propaga dentro de las plantas a través de oberturas en la superficie en los tejidos de las plantas. Normalmente, para matar las bacterias se utilizan pesticidas (compuestos a base de cobre) o se aplican bacterias inactivas en la nucleación de hielo (NINA) competitivas para competir con ellas y reducir las concentraciones de bacterias INA. Sin embargo, este método de protección contra heladas no se ha utilizado ampliamente; para más información ver el capítulo 6.

LA PROTECCIÓN ACTIVA

Los métodos de protección activa incluyen

- Las estufas;
- Los ventiladores;
- Los helicópteros;
- Los aspersores;
- El riego de superficie;
- El aislamiento con espumas; y
- Las combinaciones de métodos

Todos los métodos y combinaciones se implementan durante la noche de ocurrencia de heladas para mitigar los efectos de las temperaturas bajo cero. El coste de cada método varía dependiendo de la disponibilidad local y de los precios, pero en la Tabla 7.1 se dan algunos ejemplos de costes basados en precios de los EE.UU. Algunos métodos de protección contra heladas tienen más de un uso (e.g. los aspersores también pueden utilizarse para el riego) y los beneficios de otros usos necesitan descontarse del coste total para evaluar de forma más justa los beneficios en términos de la protección contra heladas.

Las estufas

Las estufas proporcionan calor suplementario para ayudar a reemplazar las pérdidas de energía. Generalmente, las estufas o bien aumentan la temperatura de los objetos de metal (e.g. estufas con chimenea) o bien funcionan como fuegos abiertos. Si se suministra suficiente calor al volumen de cultivo de forma que se reemplazan todas las pérdidas de energía, la temperatura no caerá a los niveles que provocan daños. Sin embargo, los sistemas son generalmente ineficientes (i.e. una gran proporción de la energía producida se pierde hacia el cielo), por ello es necesario un diseño y manejo apropiado. Si se diseña un sistema para utilizar más estufas y más pequeñas con un buen manejo, se puede mejorar la eficiencia hasta el nivel que permite proteger el cultivo en las condiciones de la mayoría de las heladas de radiación. Sin embargo, cuando no hay inversión o es muy pequeña y hay viento, las estufas puede que no proporcionen la protección adecuada.

Los requerimientos de energía para hacer frente a las pérdidas en una noche helada de radiación están en el intervalo de 10 a 50 W m^{-2} , mientras que la producción de energía de las estufas está en el intervalo de 140 a 280 W m^{-2} , dependiendo del combustible, ritmo de quemado, y número de estufas. Cien estufas con chimenea por hectárea quemando 2,85 l h^{-1} de combustible con una producción de energía de 37,9 MJ l^{-1} producirían aproximadamente 360 W m^{-2} . El beneficio neto depende de las condiciones meteorológicas, pero se puede esperar un aumento de 1 $^{\circ}\text{C}$ en la temperatura media del aire desde el suelo hasta unos 3 m, con unas temperaturas algo más altas medidas a 1,5 m de altura. Sin embargo, la radiación directa desde las estufas suministra un beneficio adicional a las plantas que están en el campo de visión de las estufas. Como la producción de energía es mucho más grande que las pérdidas de energía desde un cultivo no protegido, gran parte de la producción de energía desde las estufas se pierde y no contribuye a calentar el aire o las plantas. Si el sistema de calefacción estuviera perfectamente diseñado y manejado para reemplazar la pérdida de energía desde el volumen de aire bajo la capa de inversión sin ninguna o muy escasa pérdida de calor convectivo hacia el cielo, entonces los requerimientos de producción de energía estarían cercanos a los requerimientos de energía necesarios para prevenir los daños por helada y la aportación de calor sería eficiente. Para conseguir la mejor eficiencia, hay que aumentar el número de estufas y disminuir su temperatura. Sin embargo, esto es a menudo difícil de conseguir por los costes de los equipos, de la mano de obra, etc. Si la inversión de temperatura es débil o si los fuegos son demasiado grandes y calientes, el aire calentado asciende demasiado y la energía se pierde al aire por encima del cultivo, disminuyendo entonces la eficiencia. Las estufas modernas tienen más control sobre la temperatura de los gases emitidos para reducir las pérdidas ascensionales y mejorar la eficiencia. Los sistemas más eficientes tienen poca llama por encima de la chimenea y no humean. Hacer funcionar las estufas a temperatura demasiado alta también reduce su vida media. Las estufas con combustible líquido y las de gas normalmente producen casi el doble de energía que las estufas de combustible sólido. Cuando hay una inversión fuerte (i.e. un techo muy bajo), el volumen calentado es menor, y las estufas son más efectivas en aumentar la temperatura, si los fuegos no son demasiado grandes (i.e. la temperatura de los gases que dejan la chimenea de la estufa está cercana a 635 $^{\circ}\text{C}$) por eso el aire calentado asciende lentamente. El funcionamiento de la estufa es menos eficiente en condiciones de inversión débil (i.e. un techo alto) ya que el volumen a calentar es más grande. En los bordes de las parcelas ocurre más daño por helada y para evitarlo se necesitan más estufas. Antes, se creía que

el humo era beneficioso como protección contra las heladas. Sin embargo, el humo no ayuda y contamina el ambiente, por lo que debería evitarse.

La distribución de estufas debería ser relativamente uniforme, con más estufas en los bordes, especialmente contra el viento, y en las zonas bajas y frías. Los bordes deberían disponer de un mínimo de una estufa por cada dos árboles en la zona exterior del borde y dentro de la primera fila. En el borde de la zona contra el viento, se recomienda también una estufa por cada dos árboles dentro de la segunda fila. Las primeras estufas a encender deberían ser las situadas en los bordes, especialmente en las situadas contra el viento, y a continuación encender cada cuatro filas de la plantación frutal (o cada dos filas si es necesario). A continuación hay que hacer un seguimiento de la temperatura y encender más hileras de estufas si aumenta la necesidad. Las estufas son caras de poner en funcionamiento, por ello normalmente se utilizan en combinación con los ventiladores o como calor de borde en combinación con los aspersores. Ver el capítulo 7 para tener más información sobre el uso de las estufas.

El uso de estufas de combustible líquido disminuye con el aumento de los precios del petróleo y las preocupaciones sobre la contaminación del aire. Las estufas de combustible líquido requieren una considerable mano de obra para su colocación, llenado de combustible y limpieza, además de los costes de capital de las estufas y del combustible. Observa que las pequeñas plantaciones frutales y aisladas requieren más estufas que las plantaciones frutales grandes o que aquellas que están rodeadas de otras plantaciones protegidas.

Las recomendaciones de combustible para el encendido de las estufas varía desde ratios 1 : 1 petróleo-gasolina hasta 8 : 5 petróleo-gasolina. Para rellenar las estufas, después de una helada, se utilizan los tanques remolcados por un tractor, que permiten llenar de forma simultánea dos hileras de quemadores. Cuando se utiliza el calentamiento directo, para minimizar el consumo de combustible la protección se inicia justo antes de alcanzar la temperatura crítica de daño. La temperatura debería medirse en una garita Stevenson, o con una protección especialmente diseñada para las heladas en frutales o con una pantalla Gill que evite la exposición del termómetro al cielo despejado.

Los requerimientos de mano de obra para rellenar las estufas de combustible líquido son altos, por ello se han popularizado los sistemas de distribución centralizada que utilizan gas natural, propano líquido o petróleo combustible presurizado. En los sistemas más elaborados, la ignición, la tasa de combustión y el cierre también están automatizados, además de la distribución del combustible. El coste de capital para instalar sistemas centralizados es alto, pero los costes de funcionamiento son bajos. Las estufas de propano requieren menos limpieza y las

tasas de quemado son más fáciles de controlar que las estufas que queman petróleo. Como la tasa de quemado es menor se requieren más estufas (e.g. normalmente unas 100 estufas con chimenea por hectárea y unas 153 estufas de propano por hectárea), pero la protección es mejor ya que más estufas con una tasa de quemado más baja son más eficientes. Bajo condiciones extremas, el tanque de suministro de propano puede algunas veces congelarse, y por ello debería instalarse un vaporizador que prevenga la congelación de la tubería de gas.

La relación entre la radiación y la energía total liberada es del 40% si se queman combustibles sólidos en comparación con el 25% si se queman combustibles líquidos, en consecuencia, los combustibles sólidos son más eficientes en calentar las plantas, especialmente bajo condiciones de viento. La principal desventaja de los combustibles sólidos es que la energía liberada disminuye conforme se va consumiendo el combustible, y por ello la energía que se libera se ve limitada cuando más se necesita. Otro inconveniente es que los combustibles sólidos son más difíciles de encender, y por ello debe iniciarse el encendido más pronto. También son difíciles de apagar con lo que se desperdicia más combustible.

Los ventiladores

Los ventiladores por si solos utilizan normalmente sólo de un 5% a un 10% del combustible consumido por un sistema de protección con estufas de petróleo. Sin embargo, la inversión inicial es alta (e.g. unos 20 000 \$ por máquina). Los ventiladores, en general, tienen unos requerimientos de mano de obra y unos costes de funcionamiento más bajos que otros métodos; especialmente los ventiladores eléctricos.

La mayoría de ventiladores empujan el aire casi horizontalmente para mezclar el aire más caliente de la parte superior en una inversión de temperatura con el aire más frío cercano a la superficie. También, al nivel de micro escala, éstos rompen las capas límites sobre las superficies de las plantas, mejorando las transferencias de calor sensible desde el aire a las plantas. Sin embargo, antes de invertir en ventiladores, hay que estar seguro de que las inversiones entre 2 y 10 m de altura están por lo menos 1,5 °C o más en la mayoría de las noches de helada.

Cuando se instalan ventiladores eléctricos, normalmente las compañías eléctricas requieren al agricultor que pague unas cargas por “estar a punto”, que cubren los costes de instalación de la línea y su mantenimiento. Las cargas por “estar a punto” se pagan independientemente de que los ventiladores se usen o no. Los ventiladores de combustión interna son más efectivos desde el punto de vista del coste, pero requieren más mano de obra. El ruido de los ventiladores es un problema grande para los agricultores con cultivos cerca de las poblaciones, y

ello debería tenerse en cuenta al seleccionar un método de protección contra las heladas. Generalmente, se necesita un ventilador grande con 65 a 75 kW de potencia por cada 4,0 a 4,5 ha. El efecto sobre la temperatura disminuye aproximadamente con la inversa del cuadrado de la distancia desde la torre, con lo que un solapamiento de las áreas de protección favorecerá la protección.

Los ventiladores, en general, consisten en una torre de acero con una gran hélice de dos hojas giratorias (3 a 6 m diámetro) cerca de la parte superior, colocadas sobre un eje inclinado unos 7° hacia abajo desde la horizontal en la dirección de la torre. Normalmente, la altura de los ventiladores es de unos 10–11 m, y giran a unas 590–600 rpm. También existen ventiladores con hélices de cuatro hojas. Cuando funciona un ventilador, extrae el aire de la parte superior y lo empuja con una ligera inclinación entre la torre y el suelo. El ventilador también fluye hacia arriba el aire frío cercano a la superficie y el aire caliente por arriba y frío por debajo se mezclan. Al mismo tiempo que funciona el ventilador, la hélice gira alrededor de la torre con una vuelta cada tres, o hasta cinco, minutos. La cantidad de protección que se consigue depende de la fuerza de la inversión sin proteger. En general, el uso de los ventiladores provoca un aumento de la temperatura a 2,0 m de altura que equivale a un 30% de la fuerza de la inversión entre 2 y 10 m de altura en un cultivo sin proteger. Los ventiladores se ponen en marcha normalmente cuando la temperatura del aire alcanza los 0 °C. Los ventiladores no se recomiendan cuando hay viento superior a los 2,5 m s⁻¹ (8 km h⁻¹) o cuando hay una niebla súper enfriada que puede provocar daño a la hélice si se hielan sus hojas.

Los ventiladores que empujan el aire caliente verticalmente hacia abajo desde la parte superior no son, en general, efectivos y pueden causar daño a las plantas cercanas a la torre. Existen y se han probado ventiladores, comercialmente disponibles, que empujan verticalmente el aire hacia arriba. Sin embargo, no existían investigaciones publicadas en el momento de preparación de este libro.

Los helicópteros

Los helicópteros mueven el aire caliente desde la parte superior de la inversión de temperatura hacia la superficie más fría. El área que cubre un solo helicóptero depende de su tamaño y peso y de las condiciones meteorológicas. Se estima que el área que cubre un único helicóptero varía entre 22 y 44 ha. Las recomendaciones sobre la frecuencia de las pasadas varían entre 30 a 60 minutos, dependiendo de las condiciones meteorológicas. Si el tiempo entre las pasadas se alarga demasiado provoca que las plantas se enfríen y la agitación por el pase del helicóptero puede causar la nucleación heterogénea del hielo y provocar un daño grave. La nucleación heterogénea del hielo ocurre cuando el agua es súper

enfriada (i.e. a la temperatura bajo 0 °C) y algunas materias foráneas o la agitación inicia la formación del hielo. En el caso de los helicópteros, la agitación puede causar la formación de hielo si los pases son demasiado poco frecuentes y la temperatura del tejido de las plantas baja demasiado.

La altura óptima de vuelo se sitúa normalmente entre los 20 y los 30 m, y las velocidades de vuelo van de los 8 a los 40 km h⁻¹. Los pilotos, con frecuencia, cargan los tanques vaporizadores de los helicópteros con agua para aumentar el peso y aumentar el empuje. Bajo condiciones de heladas severas con una inversión alta, un helicóptero puede volar sobre otro para favorecer la transferencia del calor hacia abajo. Para ayudar a los pilotos a saber dónde hay que realizar las pasadas, se utilizan luces controladas por un termostato en la parte superior de la copa de los árboles. En las laderas, la transferencia del calor se propaga pendiente abajo una vez ha alcanzado la superficie, por eso volar sobre la parte superior de la pendiente normalmente proporciona más protección. Los vuelos se detienen cuando la temperatura del aire contra el viento desde el cultivo ha subido por encima de la temperatura crítica de daño.

Los aspersores

El consumo de energía de los aspersores es considerablemente más bajo que el utilizado para la protección de heladas con estufas, y por consiguiente, los costes de funcionamiento son más bajos. La necesidad de mano de obra también es inferior que en otros métodos, y es relativamente no contaminante. Las principales desventajas del uso de aspersores son el elevado coste de instalación y la gran cantidad de agua necesaria. En muchos casos una disponibilidad limitada de agua restringe el uso de los aspersores. En otros casos, el uso excesivo puede provocar problemas de encharcamiento lo cual puede causar problemas a las raíces así como impedir el laboreo y cualquier otro tipo de manejo. El lavado de nutrientes (principalmente nitrógeno) es un problema cuando se utilizan los aspersores con frecuencia.

El secreto de la protección con aspersores de tipo convencional que aplican el agua sobre las plantas es volver a aplicar el agua frecuentemente con el suficiente caudal para evitar que la temperatura del tejido de la planta baje demasiado entre los pulsos de agua. Para aspersores que aplican el agua sobre las plantas y que no giran, la idea es aplicar el agua de forma continuada con un caudal más bajo pero que sea sobre una superficie más pequeña. Para aspersores de tipo convencional que aplican el agua por debajo de las plantas, la idea es aplicar el agua a una frecuencia y con una caudal que mantenga la temperatura superficial del suelo cerca de 0 °C. Esto aumentará la radiación de onda larga y la transferencia de

calor sensible a las plantas respecto a un cultivo sin protección. Para los microaspersores bajo cubierta, que aplican menos agua que los aspersores convencionales, el objetivo es únicamente mantener el suelo bajo las plantas cerca de 0 °C para poder concentrar y favorecer la transferencia de radiación y de calor sensible hacia las plantas.

Aspersores convencionales por encima de las plantas

El riego con aspersores por encima de las plantas se utiliza para proteger cultivos que no crecen mucho y en árboles frutales de hoja caduca con las ramas bien apuntaladas para que no se rompan con el peso del hielo. Normalmente no se usa en árboles de tipo subtropical (e.g. cítricos) excepto para limoneros jóvenes que son más flexibles. Incluso durante las heladas de advección, los aspersores por encima de la cubierta proporcionan una excelente protección contra helada hasta casi -7 °C si los caudales son suficientes y la aplicación es uniforme. Bajo condiciones con viento o cuando la temperatura del aire cae tan baja que el caudal es inadecuado para suministrar más calor que el que se pierde por evaporación, el método puede producir más daño que el experimentado por un cultivo no protegido. Los inconvenientes de este método son el daño severo que puede producirse si el sistema de aspersión falla, las elevadas necesidades de agua que tiene el método, la carga del hielo que puede causar daño a las ramas y si los suelos están mal drenados pueden ser un problema las enfermedades de las raíces.

Los requerimientos de caudal para aspersores por encima de la cubierta difieren para los aspersores convencionales, los aspersores con caudales variables y los aspersores de volumen de aplicación bajo. Mientras haya una mezcla de líquido-hielo sobre las plantas, con agua goteando de los carámbanos, las plantas cubiertas de hielo estarán protegidas. Sin embargo, si se utiliza un caudal inadecuado o si la velocidad de rotación de los aspersores es demasiado lenta, toda el agua puede congelarse y las temperaturas de las plantas cubiertas con hielo pueden descender por debajo de la temperatura de las plantas no protegidas.

Los sistemas con aspersores convencionales por encima de las plantas utilizan aspersores de impacto estándar para mojar las plantas y el suelo completamente. Las plantas más grandes tienen más superficie, y por tanto, se necesita un caudal mayor para las plantas altas que para las bajas. Para que los aspersores sobre la cubierta sean más efectivos, las distintas partes de las plantas deben estar cubiertas con agua y rehumedecidas en 30 a 60 segundos. Las tasas de rotación más largas requieren caudales más altos. Además, las plantas más grandes requieren más agua para proteger las plantas. Ver la Tabla 2.1 para directrices sobre los caudales para varias plantas.

TABLA 2.1

Caudales para aspersores de protección por encima de la cubierta de cultivos altos (frutales y viña) y bajos, en función de la temperatura mínima y la tasa de giro, para velocidades de viento entre 0 y 2,5 m s⁻¹

TEMPERATURA MINIMA °C	CULTIVOS ALTOS		CULTIVOS BAJOS	
	30 s rotación mm h ⁻¹	60 s rotación mm h ⁻¹	30 s rotación mm h ⁻¹	60 s rotación mm h ⁻¹
-2,0	2,5	3,2	1,8	2,3
-4,0	3,8	4,5	3,0	3,5
-6,0	5,1	5,8	4,2	4,7

NOTA: Los caudales son casi 0,5 mm h⁻¹ más bajos cuando no hay viento y casi 0,5 mm h⁻¹ más altos con velocidades de viento próximas a 2,5 m s⁻¹. Los caudales para "cultivos bajos" se refieren a cultivos herbáceos con cubierta similares en tamaño a las fresas. Los cultivos que cubren todo el campo o en hileras (e.g. patatas y tomates) requieren caudales intermedios.

La uniformidad de distribución de los aspersores es importante para evitar una cobertura inadecuada, lo que podría provocar daños. Si se sabe que el aire frío llega desde una dirección específica, se puede mejorar la protección aumentando la densidad de aspersores contra el viento en el borde del cultivo o incluso en un campo abierto contra el viento desde el cultivo. En la mayoría de los casos, los cabezales de los aspersores deberían colocarse a 30 cm o más altos por encima de la parte superior de la cubierta vegetal evitando que las plantas bloqueen la vaporización. En la protección contra heladas, se utilizan unos muelles especialmente diseñados, los cuales están protegidos por una envoltura para prevenir la formación de hielo en los cabezales. Se necesitan filtros limpiadores para asegurarse de que el sistema funciona correctamente, especialmente cuando se utiliza agua de ríos o de estanques.

Puesta en marcha y parada de los aspersores

Los aspersores que actúan sobre las plantas deberían ponerse en marcha cuando la temperatura del bulbo húmedo sea más alta que la temperatura crítica (T_c). Poner en marcha cuando la temperatura del bulbo húmedo alcanza los 0 °C tiene menos riesgo y puede ser más prudente si no hay problemas de falta de agua, encharcamiento o por la carga del hielo. Incluso si el Sol luce sobre las plantas y la temperatura del aire está por encima de 0 °C, los aspersores no deberían cerrarse hasta que la temperatura del bulbo húmedo medida contra el viento desde el cultivo esté por encima de la temperatura crítica de daño. Si el encharcamiento del suelo o la falta de agua no son problemas, el permitir que la temperatura del bulbo húmedo exceda ligeramente de los 0 °C antes de cerrar los aspersores supone una medida de seguridad extra.

La temperatura del bulbo húmedo puede medirse directamente con un psicrómetro (Figura 3.9) o puede estimarse a partir de las temperaturas del punto de rocío y del aire. Las medidas de la temperatura del bulbo húmedo se explican en el Capítulo 3. Una medida del punto rocío sencilla y de bajo coste, del punto de rocío se consigue con un termómetro, un cubo con brillo, agua, sal y hielo (Figura 7.11). Primero hay que poner un poco de agua salada en el cubo con brillo. A continuación, empezar a añadir hielo al cubo mientras se remueve la mezcla con el termómetro. Observa el exterior del cubo para ver cuando se condensa agua o se deposita hielo sobre la superficie. Inmediatamente hay que realizar una lectura de la temperatura del termómetro cuando se condense el agua o se forme hielo. Iluminar la superficie del cubo con una linterna ayudará a observar la condensación del agua o la formación de hielo y a leer el termómetro. Bajo condiciones muy frías y secas, puede que se necesite más sal y hielo para alcanzar la temperatura del punto de formación de hielo o del punto de rocío. Hay una pequeña diferencia entre la temperatura de la formación de hielo y la temperatura del punto de rocío (explicada en el Capítulo 3), pero para estimar la temperatura del aire de puesta en marcha y detención de aspersores el error que se comete de considerarlos iguales es despreciable.

Una vez medida la temperatura del punto de rocío, las temperaturas del aire para poner en marcha y detener se encuentran utilizando la temperatura crítica (T_c) para el cultivo, la temperatura del punto de rocío, y la Tabla 2.2. Para una información más exacta, ver la Tablas 7.5 y 7.6 y la discusión relacionada en el capítulo 7.

Caudal de los aspersores

Los requerimientos de caudal para la aspersión de cobertura sobre las plantas con aspersores convencionales dependen de la velocidad de rotación, de la velocidad del viento y de la temperatura mínima no protegida. La Tabla 2.1 proporciona caudales normalmente utilizados para cultivos altos y bajos. Tanto para cultivos altos como para los bajos, los caudales aumentan con la velocidad del viento y son más altos para rotaciones más lentas.

Si hay una mezcla de hielo y líquido cubriendo las plantas y el agua gotea desde el hielo, entonces el caudal es suficiente para prevenir el daño. Si toda el agua se congela y tiene una apariencia blanca lechosa como la escarcha, entonces el caudal es demasiado baja para las condiciones meteorológicas. Si el caudal es insuficiente para cubrir adecuadamente todo el follaje, entonces puede producirse daño sobre distintas partes de las plantas que no estén adecuadamente humedecidas. Bajo condiciones de viento y alta evaporación, los caudales inadecuados pueden causar más daño que si no se utilizan los aspersores.

TABLA 2.2

Intervalo de temperaturas del aire (°C) mínimas de puesta en marcha de los aspersores para la protección contra las heladas como una función de las temperaturas del bulbo húmedo y del punto de rocío (°C)

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	0,0				
0,0											0,0	0,0		
-1,0									-1,0	-0,9	-0,2	-0,1	0,6	0,7
-2,0					-2,0	-1,8	-1,2	-0,8	-0,4	-0,2	0,4	0,6	1,2	1,4
-3,0	-3,0	-2,7	-2,2	-1,9	-1,4	-1,1	-0,6	-0,3	0,2	0,5	1,0	1,3	1,8	2,1
-4,0	-2,5	-2,1	-1,7	-1,4	-0,9	-0,6	-0,1	0,2	0,7	1,0	1,5	1,8	2,3	2,6
-5,0	-2,0	-1,6	-1,2	-0,8	-0,4	0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2
-6,0	-1,5	-1,1	-0,7	-0,3	0,1	0,5	0,9	1,4	1,7	2,1	2,5	2,9	3,3	3,7
-7,0	-1,1	-0,6	-0,3	0,2	0,5	1,0	1,3	1,8	2,1	2,6	2,9	3,4	3,7	4,2
-8,0	-0,7	-0,2	0,1	0,6	0,9	1,4	1,7	2,2	2,5	3,0	3,3	3,8	4,1	4,8
-9,0	-0,3	0,3	0,5	1,1	1,3	1,9	2,1	2,7	2,9	3,5	3,7	4,3	4,5	5,1
-10,0	0,1	0,7	0,8	1,5	1,6	2,3	2,4	3,1	3,2	3,9	4,0	4,7	4,9	5,6

NOTA: Selecciona una temperatura del bulbo húmedo que esté por encima (más caliente que) la temperatura crítica de daño para tu cultivo y selecciona la columna adecuada. A continuación selecciona la fila con la temperatura correcta del punto de rocío y lee la temperatura del aire correspondiente de la Tabla para abrir o cerrar los aspersores. Utiliza las temperaturas del aire más bajas para las altitudes bajas (0–500 m) y aumenta hasta las temperaturas más altas para las altitudes más altas (1500–2000 m).

Aspersores dirigidos sobre las plantas

El uso de micro-aspersores dirigidos sobre las plantas se ha estudiado como un método para reducir los caudales en los aspersores sobre las plantas, pero los costes de instalación son altos y el método no ha sido ampliamente aceptado por los agricultores excepto en aquellos con problemas de falta de agua. Los aspersores dirigidos vaporizan el agua directamente sobre las plantas, con cantidades mínimas de agua que caen entre las filas de plantas. Una gran ventaja de utilizar los aspersores dirigidos es que los aspersores convencionales tienen tasas de aplicación de 3,8 a 4,6 mm h⁻¹, mientras que los aspersores dirigidos normalmente tienen caudales de 2,8 a 3,1 mm h⁻¹. Bajo condiciones de viento, debido a que la aplicación no es uniforme, se necesitan tasas de aplicación más altas de 3,1 mm h⁻¹ para proteger los cultivos. En un estudio sobre el uso de aspersores dirigidos sobre el cultivo de viña, hubo un ahorro del 80% del agua respecto a los aspersores convencionales sobre planta.

En unos ensayos de agricultor, con un sistema de bajo volumen se aplicaron aproximadamente 140 l min⁻¹ ha⁻¹, en comparación con el sistema convencional del agricultor con el que aplicó, a las viñas, de 515 a 560 l min⁻¹ ha⁻¹ durante dos

heladas de radiación. En el primer año, la temperatura mínima sin proteger fue de $-3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero no hubo diferencias, ni en las cargas del cultivo ni el peso de las podas, entre ambos sistemas. En el segundo año, una noche se observó hasta $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y algunos de los cabezales de los aspersores se congelaron y pararon de girar. Las pérdidas por el daño de la helada fueron similares en los bloques de ambos sistemas. El agricultor señaló que era importante orientar los cabezales de los aspersores que no giran para obtener una cobertura uniforme de las hileras de las viñas. En consecuencia, el requerimiento de mano de obra es alto. También fue importante poner en marcha y detener los aspersores cuando la temperatura del bulbo húmedo estaba por encima de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Aspersores sobre cultivos protegidos

La aspersión sobre cultivos protegidos en invernaderos y túneles proporciona una protección considerable. Se han observado niveles de protección de $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ utilizando caudales de $7,3\text{ mm h}^{-1}$ sobre plantas protegidas con vidrio. La aspersión con 10 mm h^{-1} sobre invernaderos de plástico durante un evento de helada se observó que mantenía las temperaturas en su interior $7,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ más alto que en el exterior. La energía utilizada fue un 20% de la energía utilizada en un invernadero de plástico idéntico que fue calentado hasta alcanzar la misma diferencia de temperatura.

Aspersores convencionales por debajo de los árboles

Los aspersores por debajo de los árboles se utilizan normalmente para la protección contra heladas de los árboles cultivados de hoja caduca en regiones donde las temperaturas mínimas no son demasiado bajas y únicamente se necesitan unos pocos grados de protección. Además, para disminuir los costes de instalación y de funcionamiento, el sistema se puede utilizar para el riego, con menores problemas de enfermedades y costes más bajos, por ello tienen algunas ventajas relativas sobre los aspersores que actúan sobre las plantas. La rotura de limbos debido a la carga del hielo, la falta de oxígeno en el suelo y el fallo del sistema de aspersión suponen menos problemas con los sistemas de aspersión bajo cubierta, que tienen unos requerimientos de caudal más bajos ($2,0$ a $3,0\text{ mm h}^{-1}$).

Una vez en marcha, los aspersores deberían funcionar de forma continua sin secuencias. Si el suministro de agua es limitado, hay que regar las áreas más dadas a las heladas o las áreas contra el viento desde las plantaciones de frutales no protegidas. Una buena uniformidad de la aplicación mejora la protección. Los sistemas de aspersores móviles no deberían parar y moverse durante la noche de helada. Sin embargo, bajo condiciones de heladas no muy severas ($T_n > -2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$),

para cubrir un área más grande las líneas de aspersores pueden situarse cada dos hileras en lugar de en cada una. Para heladas, entre moderadas y severas, puede ser necesario que las líneas de aspersores estén más cercas.

Algunos investigadores han encontrado que es beneficioso, como protección, cubrir los cultivos cuando se utilizan aspersores bajo los árboles como protección contra las heladas. Esta recomendación se basa parcialmente en la idea de que la presencia de un cultivo de cobertura proporciona más área de superficie para que el agua se congele y en consecuencia libere más calor. La recomendación también se basa parcialmente en la idea de que la altura de la mezcla de hielo líquido y con ello la altura donde la temperatura de la superficie se mantiene a 0 °C es elevada más cerca de las yemas, las flores y los frutos de los árboles que se están protegiendo. La dificultad de tener un cultivo de cobertura es que a pesar de que puede haber una protección adicional, cuando el sistema se está utilizando, es también más probable que se necesite protección activa si está presente un cultivo de cobertura. Donde los recursos de agua y de energía son limitados y las heladas son poco frecuentes, puede ser inteligente eliminar el cultivo de cobertura y reducir la necesidad de protección activa. En climas donde las heladas son más comunes y existen recursos adecuados para poner en funcionamiento los aspersores bajo planta, entonces un cultivo de cobertura puede mejorar la protección. Sin embargo, aumentará el uso de energía y de agua.

Los micro-aspersores bajo las plantas

En los últimos años, los micro-aspersores bajo planta para riego han aumentado su popularidad entre los agricultores, seguido por un interés en utilizarlos como protección contra las heladas. Se obtiene más protección cubriendo un área más grande con un sistema de aspersores de cobertura total. Sin embargo, con los micro-aspersores, el agua se aplica bajo las plantas donde la radiación y la convección son más beneficiosas que el agua aplicada entre las hileras de los cultivos. Sin embargo, si se esparce la misma cantidad de agua sobre un área más grande, es probable que el hielo se enfríe más que si el agua se concentra en un área más pequeña. De nuevo, la mejor práctica es suministrar la suficiente cantidad de agua para cubrir un área tan grande como sea posible y asegurarse de que hay una mezcla hielo –líquida sobre la superficie bajo las peores condiciones que es probable que ocurran.

El riego localizado por goteo

Los sistemas de riego de bajo volumen (por goteo) se han utilizado a veces para la protección contra heladas con resultados diversos. Cualquier beneficio de aplicar agua proviene principalmente de la congelación del agua sobre la

superficie, lo cual libera calor latente. Sin embargo, si las tasas de evaporación son altas, es posible que se pierda más energía en vaporizar el agua que la que se gana en el proceso de congelación. Debido a la amplia variedad de componentes del sistema y de caudales, es difícil generalizar sobre la eficacia de los sistemas de bajo volumen. Se debería tener en cuenta que el funcionamiento de sistemas de bajo volumen bajo condiciones de helada puede dañar el sistema de riego si la congelación es severa. Calentar el agua reduciría las probabilidades de daño y proporcionaría una mayor protección. Sin embargo, el calentamiento puede que no sea efectivo en cuanto al coste.

Aspersores por debajo las plantas con agua calentada

Algunos investigadores han sugerido la hipótesis que congelar el agua sobre la superficie para liberar el calor latente de fusión proporciona poco calor sensible al aire. Debido a la baja trayectoria de la pulverización bajo las plantas, la evaporación es reducida en relación con los sistemas que actúan sobre las plantas, y el calentamiento previo del agua puede proporcionar algún beneficio para los aspersores bajo las plantas. Se ha descrito que aplicar agua calentada hasta 70 °C con aspersores bajo árboles en una plantación de cítricos aumentó la temperatura en promedio de 1 °C a 2 °C. Para disminuir los requerimientos de caudales se ha recomendado utilizar un sistema de calefacción económico para calentar el agua hasta unos 50 °C donde se dispone de energía barata o el agua es limitada, o ambas. Sin embargo, el mismo beneficio puede obtenerse aumentando el caudal, por ejemplo, de 2,0 mm h⁻¹ a 2,6 mm h⁻¹, por tanto aumentar el caudal puede ser más efectivo desde el punto de vista de costes si el agua no es una limitación.

El riego de superficie

El riego por inundación

En este método, el agua se aplica al campo y su calor se libera en el aire al enfriarse. Sin embargo, la eficacia decrece con el enfriamiento del agua con el tiempo. La sumersión parcial o total de las plantas tolerantes es posible; sin embargo, las enfermedades y la asfixia de las raíces son algunas veces un problema. El método funciona mejor para árboles de crecimiento bajo y vides durante heladas de radiación.

Los beneficios económicos que resultan de su uso son altos y el método se utiliza normalmente en muchos países debido al coste relativamente bajo del riego por inundación. Si el riego se realiza con anterioridad al evento de helada, la protección que puede alcanzarse es como mucho entre 3 y 4 °C. La altura de agua a aplicar depende del balance de energía durante la noche y de la

temperatura del agua. La Tabla 2.3 proporciona una estimación de la altura de agua a aplicar como una función de la temperatura máxima del agua en el día que precede al evento de helada.

TABLA 2.3

Altura de agua (d) en milímetros de riego por inundación a aplicar como protección contra heladas correspondiente a una temperatura máxima del agua (T_{WX}) en °C el día previo a la noche de helada

T_{WX} (°C)	35	30	25	20	15	10
d (mm)	42	50	60	74	100	150

El riego por surcos

El riego por surcos se utiliza normalmente para la protección contra heladas y los conceptos básicos son similares a los del riego por inundación. Los surcos van mejor cuando se han formado a lo largo de la línea de goteo de las hileras de los cítricos donde el aire calentado por el agua del surco es transferido hacia arriba en el follaje que necesita protección, más que bajo los árboles donde el aire es normalmente más caliente, o en medio entre las hileras, donde el aire asciende sin interceptar los árboles. Los surcos deberían tener una anchura de unos 0,5 m con la mitad expuesta al cielo y la otra mitad bajo la copa de los árboles. Para los árboles de hoja caduca, el agua debería correr bajo los árboles donde el aire más caliente se transferirá hacia arriba para calentar las yemas, las flores o los frutos. Los surcos deberían estar bajo los árboles y de 1,0 a 1,5 m de ancho pero no deberían extenderse más allá de la línea de goteo. El riego por surcos debería iniciarse con suficiente antelación para asegurarse de que el agua alcanza el final del campo antes de que la temperatura del aire caiga por debajo de la temperatura crítica de daño. El caudal depende de varios factores, pero debería ser lo suficientemente elevado para minimizar la formación de hielo en los surcos. El agua de escorrentía fría no debería recircular. Calentar el agua es beneficioso, pero puede o no ser efectivo desde el punto de vista del coste, dependiendo de los costes del capital, de la energía y de la mano de obra.

Aislamiento con espumas

La aplicación de aislantes a partir de espumas ha aumentado la temperatura mínima sobre la superficie de las hojas de cultivos bajos en crecimiento unos 10 °C más que en los cultivos sin proteger. Sin embargo, el método no ha sido ampliamente adoptado por los agricultores debido al coste de los materiales y de

la mano de obra así como por el problema de cubrir áreas grandes en un periodo corto de tiempo debido a la poca precisión en la predicción de las heladas. 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 durante la primera noche y decrece con el tiempo ya que la espuma también bloquea la energía que calienta a las plantas y al suelo durante el día y se rompen con el tiempo. Mezclar aire y materiales líquidos en la proporción correcta para crear pequeñas burbujas es el secreto para generar espumas con una conductividad térmica baja. En el capítulo sobre métodos activos de protección sobre el uso de aislantes con espumas se presenta información más detallada.

Métodos combinados

Aspersores por debajo de la cubierta y ventiladores

Los aspersores por debajo de las plantas, con ángulos de trayectoria bajos, pueden utilizarse conjuntamente con ventiladores para la protección contra heladas. Si añadimos ventiladores se puede aumentar de forma potencial hasta unos 2 °C sobre el uso, únicamente, de aspersores bajo las plantas, dependiendo del diseño del sistema y de las condiciones meteorológicas. Además del calor suministrado por las gotas de agua cuando se desplazan 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 el aire calentado se transferirá naturalmente a través del cultivo, el funcionamiento de los ventiladores con los aspersores favorecerá la transferencia de calor y de vapor de agua dentro de la capa mezclada hacia el aire y las plantas. Normalmente, los agricultores ponen en marcha primero los aspersores, de menor coste, y después ponen en marcha los ventiladores si se necesita más protección. A diferencia del uso de las estufas con los ventiladores, los aspersores pueden dejarse en marcha cerca de los ventiladores. Como los ventiladores aumentan de forma artificial la velocidad del viento, las tasas de evaporación son más altas y los ventiladores no deberían utilizarse si los aspersores humedecen las plantas.

Riego por superficie y ventiladores

La combinación de ventiladores y riego por superficie es una práctica extendida en California y otras localidades en los EE.UU., especialmente en plantaciones de cítricos. Los agricultores normalmente empiezan con el agua de superficie y más tarde ponen en marcha los ventiladores para complementar la protección cuando se necesita. Igual que con los aspersores bajo planta, los ventiladores facilitan la transferencia al aire y a los árboles del calor y el vapor de agua liberado por el agua dentro de la capa mezclada.

Combinación de estufas y de ventiladores

La combinación de ventiladores y estufas protege mejor contra las heladas que cualquiera de los dos métodos por separado (e.g. un ventilador con 50 estufas por hectárea equivale aproximadamente a utilizar únicamente 133 estufas por hectárea). Un sistema típico combina un ventilador de 74,5 kW con unas 37 estufas de chimenea por hectárea, uniformemente distribuidas, situadas a más de 30 m del ventilador. Como el funcionamiento del ventilador tiende a aspirar el aire frío cerca del suelo desde el borde exterior del área protegida, si se colocan más estufas en el borde exterior se calienta el influjo de aire frío. Se recomienda una estufa por cada dos árboles en el borde exterior y dentro de la primera hilera de plantas. Las estufas pueden espaciarse ampliamente por el área afectada por cada ventilador. También tiene que haber una estufa por cada dos árboles dentro de la segunda hilera en la cara contra el viento del cultivo. Los ventiladores deberían ponerse en marcha antes, y las estufas se encienden si la temperatura continua cayendo.

Aspersores y estufas

Aunque no se ha encontrado literatura científica sobre el uso conjunto de aspersores y estufas, el método se ha utilizado. Se ha descrito que un agricultor utilizó un trineo de nieve metálico montado horizontalmente sobre una estaca de unos 1,5 m por encima de cada estufa para evitar que el agua apagara la estufa. Las estufas se encendieron primero y los aspersores se ponían en marcha si la temperatura del aire bajaba mucho. Esta combinación reducía la acumulación de hielo sobre las plantas y, algunas noches, no se necesitaron los aspersores.

PREDICCIÓN Y SEGUIMIENTO

Prever la temperatura mínima y cómo la temperatura puede cambiar durante la noche es útil para la protección contra heladas ya que ayuda a los agricultores a decidir si se necesita la protección y cuándo poner en marcha sus sistemas. Primero hay que consultar los servicios meteorológicos locales para determinar si hay previsiones disponibles. Los servicios meteorológicos tienen acceso a más información y utilizan modelos sinópticos y/o de meso-escala para proporcionar pronósticos regionales. Normalmente, los pronósticos locales (micro-escala) están menos disponibles, a no ser que los proporcionen servicios de predicción privados. Por ello, en este libro se incluye un modelo de predicción empírico "FFST.xls", que puede calibrarse fácilmente para las condiciones locales. El modelo utiliza registros históricos de la temperatura del aire y del punto de rocío a las dos horas después de la puesta de Sol y las temperaturas mínimas observadas para desarrollar coeficientes de regresión específicos del lugar necesarios para

predecir con exactitud la temperatura mínima durante un periodo particular del año. Este modelo únicamente será válido para eventos de heladas de radiación en áreas con un drenaje de aire frío limitado. En el capítulo 5 se describe el procedimiento para desarrollar los coeficientes de regresión y cómo utilizar el programa FFST.xls.

En este libro se incluye otra aplicación del programa – FTrend.xls – para estimar la tendencia de temperaturas empezando a las dos horas después de la puesta de Sol hasta que se alcanza la temperatura mínima prevista a la salida del Sol de la mañana siguiente. Si la temperatura del punto de rocío a las dos horas después de la puesta de Sol es el dato de entrada, FTrend.xls también calcula la tendencia de la temperatura del bulbo húmedo durante la noche. La tendencia de la temperatura del bulbo húmedo es útil para determinar cuándo poner en marcha y detener los aspersores. FTrend.xls se explica en el capítulo 5.

PROBABILIDAD Y RIESGO

La probabilidad y el riesgo de daño es un factor importante a la hora de tomar decisiones sobre la protección contra helada. Algunos aspectos de probabilidad y riesgo y aplicaciones informáticas se presentan en el capítulo 1 del Volumen II.

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LOS MÉTODOS DE PROTECCIÓN

El capítulo 2 del Volumen II discute la economía de los distintos métodos de protección contra heladas y presenta un programa de aplicación que ayuda a evaluar la eficacia en costes de todos los métodos más importantes de protección.

TECNOLOGÍAS MÁS CONVENIENTES

A pesar de que este libro presenta información sobre los métodos más conocidos de protección contra heladas, el que un método sea o no apropiado depende de muchos factores. El capítulo 8 discute qué métodos se utilizan normalmente y qué tecnologías son convenientes en los países con recursos limitados.

MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE ENERGÍA

MASA Y ENERGÍA EN EL AIRE

Para conocer los conceptos de protección contra heladas, es importante tener una buena descripción de los constituyentes de la atmósfera y su relación con el contenido de energía. Cuantitativamente, las moléculas de nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2) son los principales constituyentes de la atmósfera siendo el vapor de agua (H_2O) un componente menor (y variable). En un metro cúbico de aire hay más moléculas de gases que estrellas en el universo (aproximadamente $2,69 \times 10^{25}$), pero el volumen que ocupan las moléculas es menos de un 0,1 % del volumen total del aire (Horstmeyer, 2001). Así, mientras el número de moléculas de aire en un metro cúbico de atmósfera es inmenso, la atmósfera de la Tierra es prácticamente un espacio vacío. Sin embargo, las moléculas se mueven a una velocidad alta, y por tanto hay una considerable cantidad de energía cinética (i.e. calor sensible) en el aire. En este capítulo se discuten los métodos de transferencia de energía que controlan el contenido de calor sensible y por tanto la temperatura del aire.

Las tasas de transferencia de energía determinan a que nivel de enfriamiento se llegará y cómo de eficaces han sido los métodos de protección contra heladas. Las cuatro formas principales de transferencia de energía, que son importantes en la protección contra heladas, son la radiación; la conducción (o flujo de calor al suelo); la convección (i.e. la transferencia de calor sensible y calor latente en el fluido); y los cambios de fase asociados con el agua (Figura 3.1).

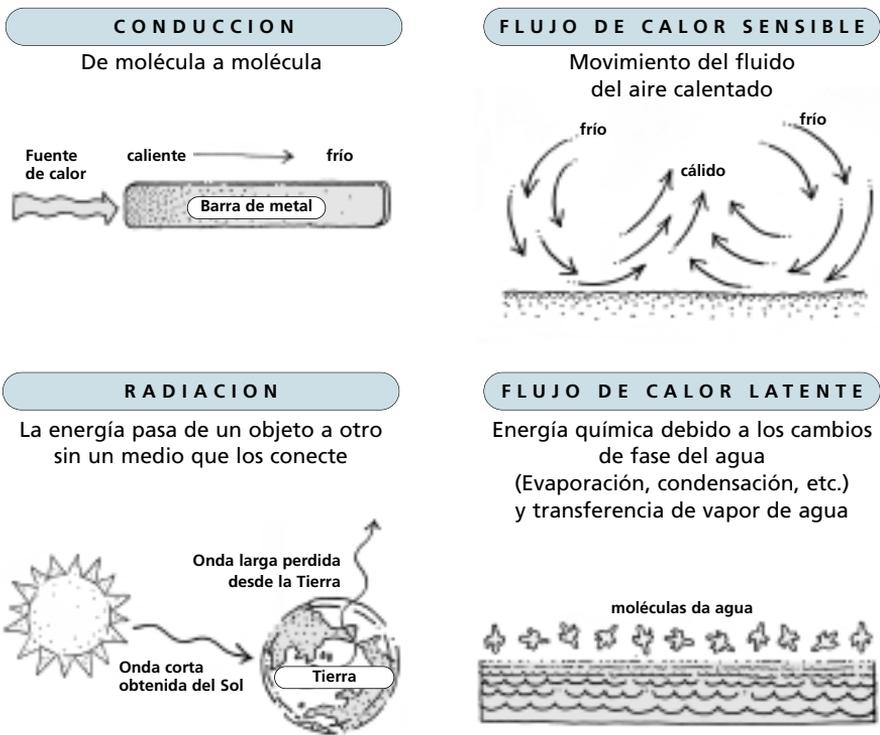
La radiación es la energía que proviene de los campos magnéticos y eléctricos oscilantes y a diferencia de otros mecanismos de transferencia, puede transferirse a través del espacio vacío. Buenos ejemplos son la energía que uno siente proveniente del Sol o cuando nos encontramos cerca de una hoguera. La radiación que es interceptada por una superficie se expresa normalmente en términos de energía por unidad de tiempo y por unidad de superficie (e.g. $W m^{-2}$). En la protección contra heladas, la radiación neta (R_n) es un factor importante. Los componentes que determinan R_n , y que se describen más adelante en este capítulo, incluyen la radiación de onda corta (solar) hacia abajo (R_{sd}) y hacia arriba (R_{su}), y la radiación de onda larga hacia abajo (R_{ld}) y hacia arriba (R_{lu}).

La conducción es la transferencia de calor a través de un medio sólido, como por ejemplo el movimiento de calor a lo largo de una pieza de metal (Figura 3.1) o a

través del suelo. Técnicamente, el calor del suelo se puede medir con un termómetro, y por tanto es calor sensible, pero se mueve principalmente por conducción (i.e. de molécula a molécula) a través del suelo. Cuando la energía circula a través del suelo por conducción se denomina densidad de flujo de calor en el suelo y normalmente se expresa con unidades de energía por unidad de tiempo y por unidad de superficie que atraviesa (e.g. $W m^{-2}$). En la protección contra heladas, el interés principal está en la densidad de flujo de calor (G) en la superficie del suelo.

FIGURA 3.1

Las cuatro formas de transferencia de calor



Las cuatro formas de transferencia de calor son: **conducción**, donde el calor se transfiere a través de material sólido molécula a molécula (e.g. calor atravesando una barra de metal); **flujo de calor sensible**, donde el aire más caliente se transfiere de un lugar a otro (e.g. aire caliente subiendo porque es menos denso); **radiación**, donde el calor se transfiere como energía electromagnética sin necesidad de un medio (e.g. luz del sol); y **flujo de calor latente**, donde el calor sensible se convierte en calor latente cuando el agua se vaporiza y se convierte de nuevo a calor sensible cuando las moléculas de agua se condensan o se depositan (como hielo) sobre una superficie.

El calor sensible es la energía que podemos “sentir”, y la temperatura es una medida del contenido de calor sensible del aire. Cuando el contenido de calor sensible del aire es alto, las moléculas tienen velocidades más altas y más colisiones entre ellas y sus alrededores, y por tanto hay más transferencia de energía cinética. Por ejemplo, un termómetro situado en un aire más caliente tendrá más colisiones con las moléculas del aire, se transferirá al termómetro energía cinética adicional y la temperatura subirá. Conforme el calor sensible del aire disminuye, la temperatura cae. En la protección contra heladas, el objetivo es, a menudo, intentar reducir o reemplazar la pérdida en el contenido de calor sensible del aire y las plantas. La densidad de flujo de calor sensible (H) es la transferencia de calor sensible a través del aire de un lugar a otro. La densidad de flujo se expresa como la energía por unidad de tiempo que pasa a través de la unidad de superficie (e.g. W m^{-2}).

El calor latente es liberado a la atmósfera cuando el agua se vaporiza y el calor latente del aire depende de su contenido en vapor de agua. El calor latente cambia a calor sensible cuando el agua cambia de la fase de vapor a la fase líquida o a hielo. Conforme el vapor de agua se mueve, la densidad de flujo se expresa en unidades de masa por unidad de volumen y por unidad de tiempo (e.g. $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). La densidad del flujo de vapor de agua se convierte de unidades de masa a unidades energéticas multiplicando por el calor latente de vaporización (L) en J kg^{-1} . Además, el flujo se expresa como energía por unidad de tiempo y por unidad de superficie o potencia por unidad de superficie (e.g. W m^{-2}). El contenido de vapor de agua del aire es una medida del contenido de calor latente, y por ello las expresiones de la humedad y su relación con la energía se discuten en este capítulo.

El balance de energía

Convención de signos

Los signos positivo y negativo se utilizan en los cálculos de balance y transferencia para indicar la dirección del flujo de energía hacia o desde la superficie. Cualquier radiación hacia una superficie añade energía y por tanto se considera positiva y con un signo “+”. Cualquier radiación hacia fuera de la superficie extrae energía y se considera negativa con un signo “-”. Por ejemplo, la radiación de onda corta hacia abajo desde el Sol y el cielo (R_{sd}) es positiva, mientras que la radiación de onda corta que es reflejada hacia arriba desde la superficie (R_{su}) es negativa. La radiación de onda larga hacia abajo (R_{ld}) también tiene signo positivo ya que añade energía a la superficie y la radiación de onda larga que es reflejada hacia arriba (R_{lu}) tiene signo negativo. La radiación neta (R_n) es la cantidad “neta” de energía radiante que es retenida por la superficie (i.e. la suma de todas las ganancias y pérdidas de radiación hacia y desde la superficie).

Estas relaciones se ilustran para el día (A) y para la noche (B) en la Figura 3.2. Observa, en la ecuación, que la radiación neta es igual a la suma de sus componentes y que el signo indica si la radiación es hacia abajo (positiva) o hacia arriba (negativa). Si la suma de los distintos componentes es positiva, como ocurre durante el día (Figura 3.2a), entonces R_n es positiva y la superficie gana más energía de la radiación de la que pierde. Si la suma de los componentes es negativa, como ocurre durante la noche (Figura 3.2b), entonces R_n es negativa y se pierde más energía de la radiación de la que se gana.

FIGURA 3.2

Convención de signos para la radiación durante el día (A) y la noche (B)

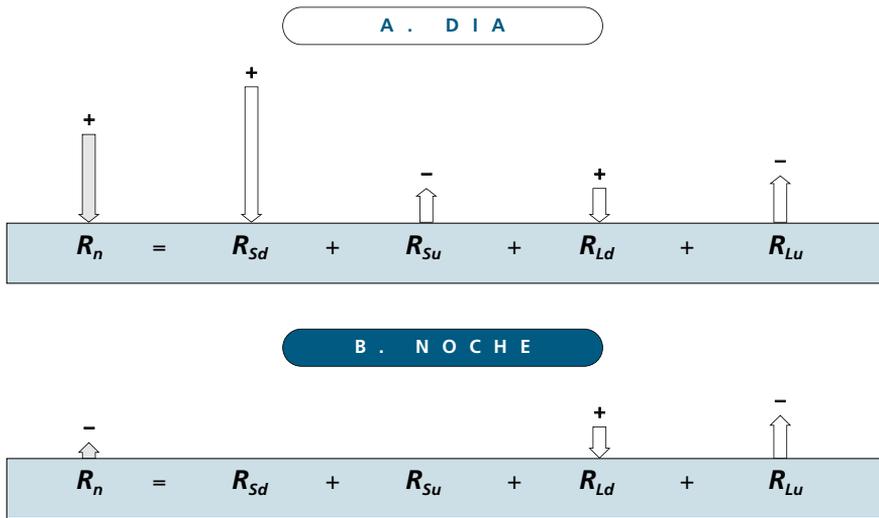
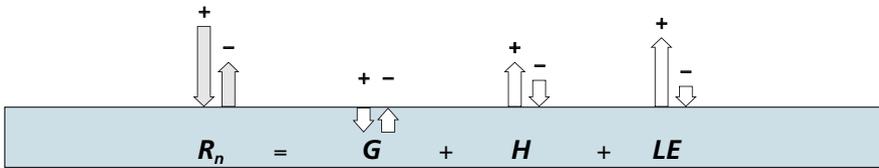


FIGURA 3.3

Convención de signos para el balance de energía de una superficie



La R_n suministra energía que calienta el aire, las plantas y el suelo o evapora agua. En este libro, la ecuación de la Figura 3.3 se utiliza para el balance de energía en una superficie. Observa que la energía almacenada en las plantas, la fotosíntesis y la respiración normalmente no se consideran en los flujos de energía verticales en la protección contra heladas. Si asumimos que todos los flujos de energía son verticales, la energía de R_n se reparte entre los componentes G , H y LE , y por tanto R_n queda igual a la suma de G , H y LE (Ec. 3.1).

$$R_n = G + H + LE \quad \text{Wm}^{-2} \quad \text{Ec. 3.1}$$

De nuevo, el signo de los componentes del flujo de energía indica su dirección. La radiación añade energía a la superficie, si es positiva hacia la superficie. Cuando G es positivo, la energía va hacia dentro del suelo, y cuando H y LE son positivos, el flujo de energía es hacia arriba hacia la atmósfera. Por consiguiente, los flujos de G , H y LE son positivos hacia afuera de la superficie y negativos hacia la superficie.

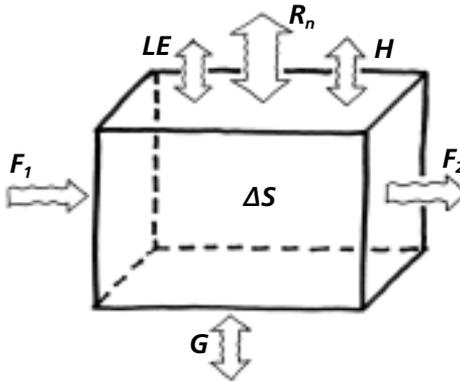
Aunque, la mayor parte de la transferencia de energía en una noche helada es vertical, un cultivo es tri-dimensional, y la energía puede pasar tanto horizontal como verticalmente a través de un cultivo. La transferencia de energía a través de un cultivo se describe normalmente utilizando un diagrama de caja (Figura 3.4), que representa el volumen de aire que ha de ser calentado durante la protección contra la helada. El contenido energético de la caja en el diagrama depende de los suministros y pérdidas de energía (Figura 3.4), donde muchos de los flujos de energía pueden ser en cualquier dirección. El balance de energía para la caja viene dado por:

$$R_n = G + H + LE + F_1 + F_2 + \Delta S + P_R \quad \text{Wm}^{-2} \quad \text{Ec. 3.2}$$

donde R_n es un número positivo cuando se recibe más energía de la radiación de la que es emitida o reflejada, y es negativo si se pierde más energía que la que gana. Las variables G , H y LE son todas positivas cuando la energía sale de la caja y es negativa si la energía entra en la caja. F_1 es el flujo de calor latente y sensible horizontal que entra en la caja (un número negativo) y F_2 el flujo de calor latente y sensible horizontal que sale de la caja (un número positivo). La suma de F_1 y F_2 es la diferencia neta en el flujo horizontal del calor latente y sensible. La variable P_R es para la fotosíntesis (un número positivo) y para la respiración (un número negativo). Sin embargo, P_R es pequeño y normalmente se ignora en los cálculos de balance de energía. La variable ΔS es el cambio en la energía almacenada (calor sensible) dentro de la caja, la cual es positiva si el contenido de energía aumenta (e.g. cuando la temperatura aumenta) y es negativa cuando el contenido de energía disminuye (e.g. cae la temperatura).

FIGURA 3.4

Un diagrama de caja energético mostrando los posibles suministros y pérdidas de energía desde un cultivo representado por la caja



Los símbolos son:

- la radiación neta (R_n),
- el flujo de calor sensible (H),
- el flujo de calor latente (LE),
- la energía de advección sensible y latente hacia dentro (F_1) y hacia fuera (F_2),
- y la energía almacenada en el cultivo (ΔS)

Durante una helada nocturna de radiación, R_n es negativa, la suma de F_1 y F_2 es casi cero, y P_R es insignificante. Si no se utiliza agua para la protección y no hay rocío o formación de hielo y la evaporación es mínima, entonces LE es insignificante. Tanto G como H son negativos, lo que implica que el calor se transfiere hacia la caja, pero la magnitud de $G + H$ es menor que R_n , y por tanto ΔS es negativo y tanto el aire como el cultivo se enfriarán.

En muchos métodos de protección contra heladas activos y pasivos, el objetivo es manipular uno o más de un componente del balance de energía para reducir la magnitud de ΔS . Esto puede realizarse mejorando la transferencia de calor y su almacenamiento en el suelo, lo cual favorece el almacenamiento de calor en el suelo durante el día y el G hacia arriba durante la noche; utilizando estufas, ventiladores o helicópteros se puede aumentar la magnitud negativa de H ; reduciendo la magnitud negativa de R_n ; o enfriando o congelando agua, lo cual convierte el calor latente en sensible y aumenta la temperatura de la superficie. Cuando la temperatura de la superficie aumenta, el ritmo de caída de temperatura disminuye. En este capítulo, se discute el balance de energía, la radiación, el flujo de calor sensible, el flujo de calor en el suelo o conducción, el flujo de calor latente, la humedad y los cambios de fase del agua.

La energía de la radiación neta también puede vaporizar agua y contribuir a la densidad de flujo de calor latente (LE) o a la evaporación desde la superficie. Recuerda que cuando el agua se vaporiza, el calor sensible se convierte en calor latente. Cuando el agua se condensa, el proceso se invierte y el calor latente se convierte en calor sensible. La E en LE representa la densidad de flujo de las

moléculas de agua ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$), y por tanto E es la masa por unidad de tiempo que pasa a través de un metro cuadrado de superficie. El calor latente de vaporización (L) es la cantidad de energía necesaria para vaporizar una unidad de masa de agua ($L \approx 2,45 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$). En consecuencia, la densidad de flujo de calor latente (LE), igual que R_n , H y G , tiene las mismas unidades ($\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2} = \text{W m}^{-2}$). Cuando se añade vapor de agua al aire (i.e. el flujo es hacia arriba), se da un signo positivo. Cuando el vapor de agua se extrae del aire con un flujo hacia abajo (i.e. durante deposición de rocío o de hielo), el signo es negativo.

En climas áridos, durante la mañana, cuando la temperatura de la superficie es más alta que la temperatura del aire, es normal que R_n , G , H y LE sean positivos, siendo LE considerablemente menor que R_n (Figura 3.5). Durante la tarde en climas áridos, cuando la temperatura del aire es más alta que la temperatura de la superficie, es normal que R_n sea positiva, que G sea pequeña y negativa, que H sea negativa y que LE sea similar en magnitud a R_n (Figura 3.6). Observa que H es a menudo positivo todo el día en climas húmedos donde hay menos advección horizontal de aire cálido sobre un cultivo más frío. En condiciones de helada de radiación sin rocío o formación de hielo, normalmente $R_n < 0$, $G < 0$, $H < 0$ y $LE = 0$ (Figura 3.7). Si se produce condensación de vapor, LE es negativo y suministra energía adicional para reemplazar las pérdidas de radiación neta (Figura 3.8).

FIGURA 3.5

Balance de energía a media mañana en verano con R_n , G , H , y LE

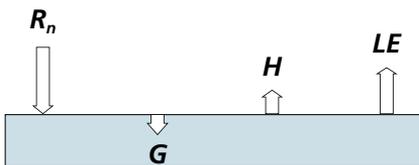


FIGURA 3.6

Balance de energía a media tarde en verano con R_n y LE (+) y G y H

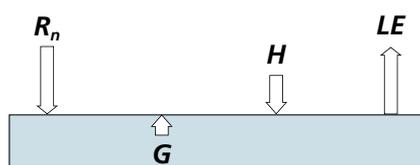


FIGURA 3.7

Balance de energía de una helada de radiación antes del alba sin condensación y con R_n , G y H

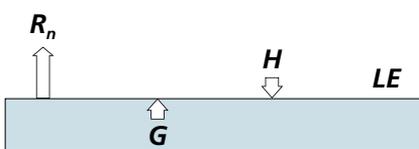
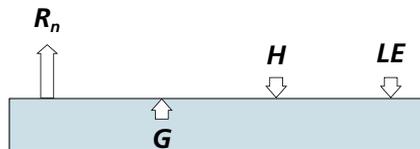


FIGURA 3.8

Balance de energía de una helada de radiación antes del alba con condensación y R_n , G , H y LE



Durante una noche con helada de radiación, hay una pérdida neta de radiación (i.e. $R_n < 0$). Los flujos de energía desde el suelo y el aire compensan parcialmente las pérdidas de energía, pero conforme disminuye el contenido de calor sensible del aire, la temperatura cae. Los métodos más activos de protección contra heladas intentan reemplazar las pérdidas de energía con distintos grados de eficiencia y de coste.

Humedad y calor latente

Además del calor sensible, el aire también contiene calor latente que está directamente relacionado con el contenido de vapor de agua. Cada molécula de agua consta de un átomo de oxígeno y de dos átomos de hidrógeno. Sin embargo, los átomos de hidrógeno unidos al átomo de oxígeno también son atraídos por otros átomos de oxígeno de otras moléculas de agua. Conforme las moléculas de agua forman más y más enlaces de hidrógeno, estas forman una estructura cristalina y eventualmente se vuelve visible como agua líquida. No todas las moléculas de agua están adecuadamente alineadas para formar enlaces de hidrógeno y por tanto grupos de moléculas de agua unidas pueden pasar por delante unas a las otras como un líquido. Cuando el agua se congela, la mayoría de las moléculas establecerán enlaces de hidrógeno y se formará una estructura cristalina (hielo).

Para evaporar (i.e. vaporizar) agua, se necesita energía para romper los enlaces de hidrógeno entre las moléculas de agua. Esta energía proviene de la radiación o del calor sensible del aire, agua, suelo, etc. Si la energía proviene del calor sensible, la energía cinética se extrae del aire y se cambia a calor latente, la cual se almacena en los enlaces de hidrógeno. Esto provoca una disminución de temperatura. Cuando el agua se condensa, se forman enlaces de hidrógeno y el calor latente se libera como calor sensible provocando un aumento de la temperatura. El contenido total de calor (i.e. entalpía) del aire es la suma del calor sensible y del calor latente.

El contenido en vapor de agua del aire normalmente se expresa en términos de presión de vapor de agua o presión (barométrica) parcial debida al vapor de agua. Un parámetro que se utiliza normalmente en meteorología es la presión de vapor a saturación, que es la presión de vapor que se produce cuando las tasas de evaporación y de condensación sobre una superficie plana de agua pura, a la misma temperatura que el aire, alcanza el estadio estacionario. Otras medidas de humedad que se utilizan normalmente son la temperatura del punto de rocío y del punto de formación de hielo, las temperaturas del bulbo húmedo y del bulbo helado y la humedad relativa. La temperatura del punto de rocío (T_d) es la temperatura observada cuando el aire se enfría hasta que se satura respecto a una superficie plana de agua pura, y la temperatura del punto de formación de hielo (T_i) se alcanza cuando el aire se enfría hasta que se satura respecto a una superficie plana de hielo puro. La temperatura del bulbo húmedo (T_w) es la temperatura

que alcanza si el agua se evapora en el aire hasta que éste se satura respecto a una superficie plana de agua líquida y pura y el calor para la evaporación depende únicamente de la temperatura del aire. Hay varias ecuaciones disponibles para estimar la presión de vapor como una función de la temperatura. Una fórmula sencilla (Tetens, 1930) para calcular la presión de vapor a saturación (e_s) sobre una superficie plana de agua líquida a la temperatura (T) en °C es:

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) \text{ kPa} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Sustituyendo la temperatura del aire (T_a), del bulbo húmedo (T_w) o del punto de rocío (T_d) por T en la Ecuación 3.3, se obtiene la presión de vapor a saturación a la temperatura del aire (e_a), del bulbo húmedo (e_w) o del punto de rocío (e_d), respectivamente.

Si la superficie del agua está helada, la ecuación utilizada por Tetens (1930) para la presión de vapor a saturación (e_s) sobre una superficie plana de hielo a una temperatura por debajo de cero (T) en °C es:

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{21,875 T}{T + 265,5}\right) \text{ kPa} \quad \text{Ec. 3.4}$$

donde e_s es la presión de vapor a saturación (kPa) a la temperatura del aire por debajo de cero (°C). Sustituyendo la temperatura del bulbo helado (T_f) o del punto de formación de hielo (T_i) por T en la Ecuación 3.4, se obtiene la presión de vapor a saturación a la temperatura del bulbo helado (e_f) o del punto de formación de hielo (e_i), respectivamente.

El contenido de calor latente del aire aumenta con la humedad absoluta (o densidad del vapor de agua) en kg m^{-3} . No obstante, más que utilizar la humedad absoluta, la humedad se expresa normalmente en términos de presión de vapor. La presión de vapor se determina normalmente utilizando un psicrómetro (Figura 3.9) para medir las temperaturas del bulbo húmedo (T_w) y del bulbo seco (T_a). La temperatura del bulbo seco es la temperatura del aire medida con un termómetro que está ventilado a la misma velocidad del viento que la del termómetro del bulbo húmedo para medir la temperatura del bulbo húmedo. Una ecuación para estimar la presión de vapor a partir de T_w y T_a es:

$$e = e_w - \gamma(T_a - T_w) \text{ kPa} \quad \text{Ec. 3.5}$$

donde

$$\gamma = 0,000660 (1 + 0,00115 T_w) P_b \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \text{Ec. 3.6}$$

FIGURA 3.9

Psicrómetros de ventilador de aspiración (instrumento de la parte superior) y de honda (instrumento de la parte inferior), que miden las temperaturas del bulbo seco y las del bulbo húmedo o bulbo congelado para determinar varias medidas de humedad



es la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) ajustada para la temperatura del bulbo húmedo (T_w); la presión del vapor a saturación a la temperatura del bulbo húmedo (e_w) se calcula sustituyendo T_w por T en la Ecuación 3.3 y P_b (kPa) es la presión barométrica (kPa), donde todas las temperaturas están en $^\circ\text{C}$ (Fritschen y Gay, 1979). Como alternativa, se puede buscar el valor de e_w correspondiente a la temperatura del bulbo húmedo en las Tablas A3.1 y A3.2 (ver Anexo 3 del Volumen I).

La presión barométrica (P_b) varía con la entrada de sistemas meteorológicos, pero es principalmente una función de la elevación (E_L). Para cualquier localización, P_b se puede estimar utilizando la ecuación de Burman, Jensen y Allen (1987) como:

$$P_b = 101,3 \left[\frac{293 - 0,0065 E_L}{293} \right]^{5,26} \text{ kPa} \quad \text{Ec. 3.7}$$

siendo E_L la elevación (m) relativa a nivel del mar.

Cuando la temperatura es bajo cero, el agua en el termómetro del bulbo húmedo puede o no congelarse. Una práctica común es congelar el agua del termómetro del bulbo húmedo, poniendo en contacto con un trozo de hielo o con un metal frío. Cuando el agua se congela, habrá un incremento en las lecturas de la temperatura conforme el agua cambia su estadio de líquido a sólido, pero cae conforme el agua se sublima desde el bulbo del termómetro ventilado cubierto con hielo. En pocos minutos, la temperatura se estabilizará a la temperatura del bulbo helado (T_f). A partir de las temperaturas del aire y del bulbo helado, la presión de vapor del aire se determina utilizando:

$$e = e_f - \gamma_f (T_a - T_f) \text{ kPa} \quad \text{Ec. 3.8}$$

donde

$$\gamma_f = 0,000582(1 + 0,00115T_f) P_b \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \text{Ec. 3.9}$$

es la constante psicrométrica ajustada para la temperatura del bulbo helado (T_f), y la presión de vapor a saturación a la temperatura del bulbo helado (e_f) se calcula sustituyendo T_f en la Ecuación 3.4. Alternativamente, se puede encontrar el valor de e_f correspondiente a la temperatura del bulbo helado en la Tabla A3.3 en el Anexo 3 del Volumen I.

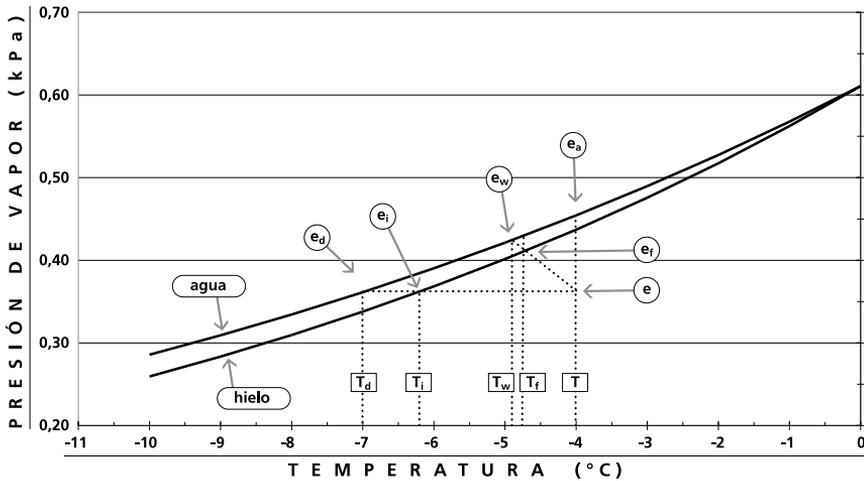
En la Figura 3.10 se muestran las relaciones entre la temperatura, la presión de vapor y algunas medidas de humedad para un intervalo de temperaturas bajo cero. La curva superior representa la presión de vapor a saturación sobre el agua (Ecuación 3.3) y la curva inferior representa la presión de vapor a saturación sobre hielo (Ecuación 3.4). Por consiguiente, a cualquier temperatura bajo cero, la presión de vapor a saturación sobre hielo es inferior que sobre el agua. A una temperatura del aire de $T_a = -4^\circ\text{C}$ y una presión de vapor de $e = 0,361 \text{ kPa}$, las temperaturas correspondientes son: $T_d = -7,0$, $T_i = -6,2$, $T_w = -4,9$ y $T_f = -4,7^\circ\text{C}$ para el punto de rocío, el punto de formación del hielo, las temperaturas del bulbo húmedo y del bulbo helado, respectivamente. Las correspondientes presiones de vapor a saturación son: $e_d = 0,361$, $e_i = 0,361$, $e_w = 0,424$ y $e_f = 0,411 \text{ kPa}$. La presión de vapor a saturación a la temperatura del aire es $e_s = 0,454 \text{ kPa}$.

Algunas veces es conveniente estimar la temperatura del bulbo húmedo a partir de la temperatura y otras expresiones de humedad. Sin embargo, como la presión de vapor es una función de T_w , e_w , $T_a - T_w$ y P_b , es difícil estimarla sin una programación compleja. Lo mismo ocurre en la estimación de la temperatura del bulbo helado (Ecuación 3.8) a partir de otras expresiones de humedad. Por ello se incluye en este libro una aplicación informática en Excel (CalHum.xls) para estimar T_w y T_f a partir de otros parámetros.

Para cualquier combinación de temperaturas bajo cero y nivel de humedad, las presiones de vapor real y la presión de vapor a saturación en el punto de rocío y en el punto de formación de hielo son iguales (i.e. $e_d = e_i = e$). Además el punto de rocío es siempre menor o igual al bulbo húmedo, el cual es menor o igual que la temperatura del aire (i.e. $T_d \leq T_w \leq T_a$). Una relación similar existe para el punto de formación de hielo, el bulbo helado y la temperatura del aire (i.e. $T_i \leq T_f \leq T_a$). A cualquier temperatura bajo cero, $e_i \leq e_d$.

FIGURA 3.10

Presión de vapor a saturación sobre agua (curva superior) y sobre hielo (curva inferior) versus temperatura



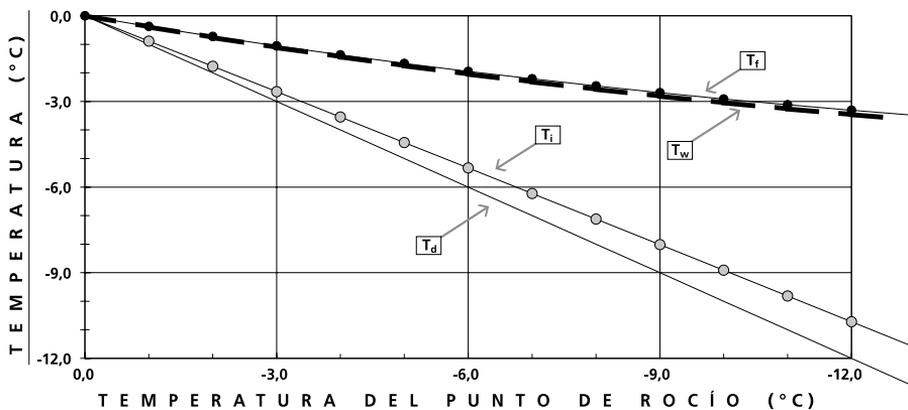
La Figura 3.11 muestra las correspondientes temperaturas del aire, del bulbo húmedo, del bulbo helado, punto de formación de hielo y del punto de rocío al nivel del mar para un intervalo de temperaturas del punto de rocío con una temperatura del aire $T_a = 0\text{ }^\circ\text{C}$. Si el punto de rocío es $T_d = -6\text{ }^\circ\text{C}$ a $T_a = 0\text{ }^\circ\text{C}$, tanto el bulbo húmedo como el bulbo helado están cerca de $-2\text{ }^\circ\text{C}$. De hecho, hay escasa diferencia entre las temperaturas del bulbo húmedo y del bulbo helado para una temperatura de punto de rocío dada en un intervalo importante de temperaturas para la protección contra heladas. Sin embargo, las temperaturas del punto de formación de hielo y del punto de rocío se desvían conforme el contenido de vapor de agua del aire (i.e. el punto de rocío) disminuye. Como hay

poca diferencia entre la temperatura del bulbo húmedo y del bulbo helado, casi no es necesario diferenciar entre los dos parámetros. Por ello, únicamente la temperatura del bulbo húmedo se utilizará en futuras discusiones.

El contenido total de calor en el aire es importante en la protección contra heladas porque el daño es menos probable cuando el aire tiene un mayor contenido de calor. Durante una noche de helada, la temperatura cae conforme el calor sensible del aire disminuye. El contenido de calor sensible (y la temperatura) disminuye dentro de un volumen de aire desde la superficie del suelo hasta la parte superior de la inversión debido a que la suma de (1) transferencia de calor hacia abajo desde el aire por encima, (2) flujo de calor en el suelo hacia arriba en dirección a la superficie y (3) transferencia del calor almacenado dentro de la vegetación a las superficie de las plantas, es insuficiente para reemplazar las pérdidas en el contenido de calor sensible que resultan de las pérdidas energéticas de la radiación neta. Si el aire y la superficie se enfrían suficientemente, la temperatura de la superficie puede caer hasta T_d y el vapor de agua empieza a condensarse como líquido (i.e. rocío) o a T_i y el vapor de agua empieza a depositarse como hielo. Este cambio de fase convierte el calor latente a sensible en la superficie y reemplaza parcialmente las pérdidas de energía de la radiación neta. En consecuencia, cuando se forma rocío o hielo en la superficie, el suministro adicional de calor sensible que suministra la conversión del calor latente reduce el ritmo de caída de temperatura.

FIGURA 3.11

Temperaturas correspondientes al bulbo húmedo (T_w), al bulbo helado (T_f), al punto de formación de hielo (T_i) y al punto de rocío (T_d) como una función de la temperatura del punto de rocío a una elevación de 250 m por encima del nivel del mar (i.e. presión del aire (P_b) = 98 kPa) con una temperatura del aire $T_a = 0^\circ\text{C}$



Una buena medida del contenido de calor total del aire es la temperatura “equivalente” (T_e), que es la temperatura que tendría el aire si todo el calor latente se convirtiera a calor sensible. La fórmula para calcular T_e (°C) a partir de la temperatura del aire T_a (°C), la presión de vapor e (kPa) y la constante psicrométrica γ (kPa °C⁻¹) es:

$$T_e = T_a + \frac{e}{\gamma} \quad \infty\text{C} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Valores calculados de T_e para un intervalo de T_a y T_i vienen dados en la Tabla 3.1 y para un intervalo de T_a y T_d en la Tabla 3.2. Valores para T_d y T_i dependen solo del contenido de vapor de agua del aire y por tanto del contenido en calor latente del aire. Cuando la T_d o T_i es alta, entonces T_e es con frecuencia considerablemente más alta que la temperatura del aire, lo cual implica un contenido de calor total superior (i.e. entalpía más alta). Por consiguiente, cuando T_e es cercano a T_a , el aire es seco, hay menos calor en el aire y hay más probabilidad de daño por helada.

TABLA 3.1

Temperaturas equivalentes (T_e) para un intervalo de temperaturas del aire (T_a) y del punto de formación del hielo (T_i) al nivel del mar con la presión de vapor a saturación (e_a) y la constante psicrométrica (γ), que son funciones de T_a

T_a	e_a	γ	T_i , TEMPERATURA DEL PUNTO DE FORMACION DE HIELO (°C)					
			-10,0	-8,0	-6,0	-4,0	-2,0	0,0
°C	kPa	kPa°C ⁻¹						
-10,0	0,286	0,067	-6,2					
-8,0	0,334	0,067	-4,1	-3,4				
-6,0	0,390	0,067	-2,1	-1,4	-0,5			
-4,0	0,454	0,067	-0,1	0,6	1,5	2,5		
-2,0	0,527	0,067	1,9	2,6	3,5	4,5	5,7	
0,0	0,611	0,067	3,9	4,6	5,5	6,6	7,8	9,2
2,0	0,706	0,067	5,9	6,7	7,5	8,6	9,8	11,2
4,0	0,813	0,066	7,9	8,7	9,6	10,6	11,8	13,2

Calor sensible

El contenido de energía del aire depende de la presión barométrica, de la temperatura y de la cantidad de vapor de agua presente por unidad de volumen. La energía (o calor) que medimos con un termómetro es una medida de la energía cinética del aire (i.e. la energía debida al hecho de que las moléculas están en

TABLA 3.2

Temperaturas equivalentes (T_e) para un intervalo de temperaturas del aire (T_a) y del punto de rocío (T_d) al nivel del mar con la presión de vapor a saturación (e_a) y la constante psicrométrica (γ), que son funciones de T_a

T_a	e_a	γ	T_d , TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCIO (°C)					
			-10,0	-8,0	-6,0	-4,0	-2,0	0,0
°C	kPa	kPa°C ⁻¹						
-10,0	0,286	0,067	-5,8					
-8,0	0,334	0,067	-3,8	-3,0				
-6,0	0,390	0,067	-1,7	-1,0	-0,2			
-4,0	0,454	0,067	0,3	1,0	1,8	2,8		
-2,0	0,527	0,067	2,3	3,0	3,8	4,8	5,9	
0,0	0,611	0,067	4,3	5,0	5,9	6,8	7,9	9,2
2,0	0,706	0,067	6,3	7,0	7,9	8,8	9,9	11,2
4,0	0,813	0,066	8,3	9,0	9,9	10,8	11,9	13,2

movimiento). Cuando se coloca un termómetro en el aire, es constantemente bombardeado con moléculas de aire a velocidades cercanas a las del sonido. Estas colisiones transfieren calor desde las moléculas al termómetro y producen su calentamiento. Esto provoca la expansión del líquido del termómetro y podemos leer el cambio en el nivel del líquido como una temperatura. Cuando la temperatura del aire aumenta, las moléculas del aire se mueven más rápido y entonces tiene más energía cinética. Como consecuencia más moléculas golpean el termómetro y a velocidades más altas, provocando una mayor transferencia de energía cinética y una lectura de temperatura más alta. Por ello, la temperatura se relaciona con la velocidad de las moléculas del aire y el número de moléculas que golpean la superficie del termómetro. Igual que en el termómetro, las moléculas del aire golpean nuestra piel a velocidades cercanas al sonido y la energía cinética se transfiere desde las moléculas hasta nuestra piel por el impacto. “Sentimos” esta transferencia de energía, y por eso se denomina calor “sensible”.

Si el aire estuviera completamente en calma (i.e. sin viento o turbulencia), entonces la temperatura que notaríamos dependería únicamente de la transferencia de calor molecular, donde la energía se transfiere debido a las colisiones a alta velocidad entre las moléculas de aire que se están moviendo en distancias cortas. Sin embargo, como hay viento y turbulencia, las parcelas de aire con distinto contenido de calor sensible se mueven de un lugar a otro (i.e. flujo de calor sensible). Por ejemplo, si permanecemos dentro de una sauna seca con al aire relativamente en calma sentiremos el calor debido principalmente a la transferencia de calor molecular a través de la capa límite del aire en calma cerca

de nuestro cuerpo. Sin embargo si se pone en marcha un ventilador dentro de la sauna, parte del aire más caliente (i.e. con la moléculas moviéndose más rápido) será forzado a convectar a través de la capa límite hasta nuestra piel. Como la mezcla es mecánica, debido al ventilador, la transferencia forzada hasta nuestra piel se denomina convección “forzada”. El aire más caliente es menos denso que el aire frío (i.e. la masa por unidad de volumen es menor), y por tanto si la fuente de calor está en el suelo de la sauna, al aire en la superficie será menos denso y ascenderá hacia el aire más frío que está por encima. Cuando el aire caliente menos denso asciende, la transferencia de calor se denomina convección “libre”. En la naturaleza, el viento fluye principalmente parcelas de aire caliente horizontalmente y si en una zona fluye aire más caliente, el proceso se denomina “advección de aire caliente”. De forma parecida, si el aire frío fluye dentro de una zona, el proceso se denomina “advección de aire frío”. En la protección contra heladas, tanto la convección forzada como la libre son importantes.

El flujo de calor sensible es importante para la protección contra heladas tanto a escala de parcela como a escala de hoja, yema o fruto. El flujo de calor sensible desde el aire hacia la superficie compensa parcialmente las pérdidas de energía debidas a la radiación neta en la superficie. Sin embargo, conforme el calor sensible es eliminado en la superficie, el aire por encima del cultivo es transferido hacia abajo para compensarlo. Esto produce una pérdida de calor sensible tanto por encima del cultivo como en el propio cultivo. Como resultado la temperatura cae en todos los niveles dentro de la capa de inversión, pero sobre todo cerca de la superficie. Algunos métodos de protección (e.g. ventiladores y helicópteros) facilitan principalmente el transporte de calor sensible para proporcionar más energía a la superficie y frenar la caída de temperatura. También los métodos como las estufas utilizan parcialmente el flujo de calor sensible para transportar energía hacia el cultivo y proporcionar protección.

Además de la transferencia de energía al nivel de parcela, el flujo de calor sensible a través de las capas límites de hojas, yemas y frutos hacia la superficie es importante para determinar la temperatura de las partes sensibles de las plantas. Una capa límite sobre la superficie de las plantas es una capa delgada de aire en calma donde la mayor parte de la transferencia de calor es por difusión molecular. Esta capa tiende a aislar las partes de la planta de la transferencia de calor sensible y del calor latente con el aire. Por ejemplo, los ventiladores se sabe que proporcionan protección contra heladas incluso cuando no hay inversión de temperatura por encima del cultivo. Esto ocurre porque al aumentar la ventilación se reduce la profundidad de la capa límite sobre la superficie de la hoja, de la yema o de fruto, y favorece la transferencia de calor sensible desde el aire hacia la superficie.

De acuerdo con el principio de Arquímedes, un cuerpo total o parcialmente inmerso en un fluido está sujeto a una fuerza hacia arriba igual en magnitud a la masa del fluido que desplaza. Los materiales totalmente inmersos, con una densidad media más pequeña que la del fluido, ascenderán y los materiales más densos caerán hacia la parte inferior. Una buena ilustración de cómo funciona la densidad es un globo de aire caliente. Cuando el aire caliente es forzado en el interior del globo, más moléculas golpean en el interior que en el exterior del globo, y por tanto hay más presión en el interior y las paredes se ensanchan. Finalmente, el globo se expande completamente. Conforme se introduce aire caliente de forma adicional en el agujero de la parte inferior, las moléculas de aire del interior del globo se mueven a velocidades más altas y parte del aire es forzado a salir del agujero del fondo. Salen más moléculas que las que entran a través del agujero del fondo, y en consecuencia la masa de aire en el interior decrece, mientras que el volumen permanece relativamente fijo. Como consecuencia la densidad disminuye. Cuando la densidad (i.e. la masa del globo, góndola, estufa, etc., dividido por el volumen ocupado por el globo y sus componentes) es menor que la densidad del aire del ambiente, el globo ascenderá. Si la estufa para de funcionar, entonces el aire del interior del globo empezará a enfriarse y el aire del exterior entrará por el agujero del fondo, lo que provocará que aumente la densidad del globo. Conforme se vuelva más denso, el globo descenderá. Claramente, la densidad es un factor importante para determinar si el aire se mueve hacia arriba o hacia abajo y por ello es importante para la protección contra heladas.

Teniendo en cuenta el ejemplo del globo, está claro que el aire más caliente y menos denso asciende y que el aire más frío y más denso desciende. Durante una helada nocturna de radiación, el aire frío se acumula cerca de la superficie y si el suelo está en una pendiente empezará a fluir ladera abajo de igual forma que lo hace el agua. Sin embargo, igual que con el agua, el flujo de aire frío se puede controlar poniendo obstáculos (valladas, paredes, cortavientos, etc.) para canalizar el aire hacia donde haga menos daño. Esto se ha utilizado de forma efectiva como método de protección contra heladas. Al mismo tiempo, los obstáculos también pueden bloquear el drenaje normal de aire frío desde un cultivo y aumentar potencialmente el daño.

Conducción– Flujo de calor al suelo

De la misma manera que las moléculas en el aire, las moléculas en un sólido también se mueven más rápido cuando la energía se transfiere al sólido y aumenta su temperatura. Esta forma de transferencia de energía se denomina conducción. Un buen ejemplo es la transferencia de calor a través de una barra de metal con

un extremo situado en fuego, donde el calor es transferido de molécula a molécula hasta el otro extremo de la barra. La conducción es un mecanismo importante de transferencia para almacenar la energía en el suelo y por tanto es importante para la protección contra heladas.

La tasa de transferencia de energía por conducción depende de la capacidad del material para conducir la energía (i.e. conductividad térmica) y del gradiente de temperatura con la distancia dentro del material. La conductividad térmica de un suelo depende del tipo y volumen relativo ocupado por los constituyentes del suelo. El aire es un mal conductor del calor, y por eso los suelos secos con más espacios de aire tienen conductividades térmicas menores. La conductividad térmica de los suelos secos varía, pero es aproximadamente de 0,1, 0,25 y 0,3 $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para suelos orgánicos, arcillosos y arenosos. Si los suelos están casi saturados de agua, la conductividad es aproximadamente de 0,5, 1,6 y 2,4 $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para los tres tipos generales de suelo.

Hay una conducción positiva en el suelo cuando la superficie está más caliente que el suelo por debajo y la conducción es negativa cuando el calor se conduce hacia arriba hacia la superficie más fría. Conforme el Sol asciende, la superficie del suelo está más caliente que por debajo y por tanto el calor se conduce hacia abajo y se almacena en el suelo. Conforme la radiación neta disminuye durante la tarde, la superficie se enfriará en relación al suelo por debajo y el calor será conducido hacia arriba hacia la superficie (i.e. flujo negativo). Este flujo de calor negativo continua durante la noche mientras el calor del suelo es conducido hacia arriba para reemplazar la pérdida de energía en la superficie más fría. En una base horaria, la densidad de flujo de calor al suelo puede cambiar considerablemente pero, en una base diaria, la cantidad de energía al suelo es generalmente casi la misma que la cantidad de sale del suelo. A largo plazo, hay un ligero déficit cada día durante el otoño, y por ello el suelo pierde energía de forma gradual y se enfría. En primavera, hay un ligero incremento de la energía que se recibe y se almacena cada día, y por ello la temperatura media diaria del suelo aumentara de forma gradual. Se tendría que recordar que la selección del suelo y su manejo tienen tanto efectos a corto plazo (i.e. diarios) como a largo plazo (i.e. anuales) en la temperatura del suelo.

La densidad del flujo de calor al suelo (G) se estima como:

$$G = -K_s \frac{\partial T}{\partial z} \text{ W m}^{-2} \quad \text{Ec. 3.11}$$

donde K_s es la conductividad térmica ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) y el segundo término de la derecha es el cambio de la temperatura con la profundidad ($^\circ\text{C m}^{-1}$) denominado gradiente térmico. No es posible medir directamente la densidad de flujo de calor

(G) en la superficie del suelo. Si un plato de flujo de calor se coloca en la superficie, entonces la luz solar que incide en el plato provocará que se registre una densidad de flujo considerablemente superior a la que se produciría realmente en el suelo. Si el plato de flujo térmico se entierra entre 0,01 y 0,02 m de la superficie se pueden producir errores si el suelo tiene grietas y permite que el Sol incida en el plato, la lluvia o el riego drenan agua sobre el plato, o se forman condensaciones en la superficie del plato. Para evitar estos problemas, generalmente, es mejor enterrar los platos de flujo de calor a una profundidad entre 0,04 y 0,08 m y realizar correcciones para el calor almacenado en el suelo por encima de los platos.

La densidad de flujo de calor en la superficie del suelo ($G = G_1$) se estima a partir de:

$$G_1 = G_2 + C_V \left(\frac{T_{sf} - T_{si}}{t_f - t_i} \right) \Delta z \quad \text{W m}^{-2} \quad \text{Ec. 3.12}$$

donde G_2 es la medida del plato de flujo de calor (W m^{-2}) a la profundidad Δz (m) en el suelo, C_V es la capacidad de calor volumétrica del suelo ($\text{J m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), T_{sf} y T_{si} son las temperaturas medias (K o $^\circ\text{C}$) de las capas de suelo entre el nivel del plato de flujo y la superficie del suelo al final (t_f) y al inicio (t_i) del tiempo (s) de muestreo (e.g. $t_f - t_i = 1800$ s para un período de 30 minutos). Típicamente, un conjunto de dos a cuatro termopares en paralelo se utilizan para medir la temperatura media ponderada de la capa del suelo por encima de los platos de flujo de calor al inicio y al final del periodo de muestreo para calcular el término de la derecha de la Ecuación 3.12. Basado en de Vries (1963), una fórmula para estimar C_V ($\text{J m}^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) es:

$$C_V = (1,93V_m + 2,51V_o + 4,19\theta) 10^6 \quad \text{W m}^{-2} \quad \text{Ec. 3.13}$$

donde V_m , V_o y θ son las fracciones volumétricas de los minerales, la materia orgánica y el agua, respectivamente (Jensen, Burman y Allen, 1990).

La difusividad térmica (κ_T) del suelo es la relación entre la conductividad térmica y la capacidad de calor volumétrica:

$$\kappa_T = \frac{K_s}{C_V} \quad \text{m}^2 \text{ s}^{-1} \quad \text{Ec. 3.14}$$

Este parámetro es útil como una medida de la rapidez con que cambia la temperatura de una capa del suelo, y por tanto es importante cuando estemos considerando la selección del suelo y su manejo para la protección contra heladas.

Conforme el suelo seco se humedece, K_s aumenta más rápidamente que C_v , y en consecuencia κ_T aumenta conforme aumenta el contenido de agua de un suelo seco. Sin embargo, conforme los poros del suelo se empiecen a llenar con agua, C_v aumentará más rápidamente que K_s , y por tanto κ_T alcanza los valores más altos cerca de capacidad de campo, y después decrece conforme el suelo se satura de agua. La transferencia óptima de calor ocurre en un valor máximo de κ_T , y por ello un objetivo de la protección contra heladas es mantener el contenido de agua en la capa superficial del suelo cercana a capacidad de campo para maximizar κ_T . Tanto para suelos arenosos como para suelos arcillosos, deben evitarse los suelos secos y no hay ninguna ventaja en saturar un suelo arcilloso (Figura 3.12). Para los suelos que se encuentran entre los arenosos y los arcillosos, los contenidos de agua próximos a capacidad de campo tienen, en general, los valores más altos de κ . Los suelos muy orgánicos (turberas) generalmente tienen una difusividad térmica baja independientemente del contenido de agua del suelo (Figura 3.12). En consecuencia, para la protección contra heladas, los suelos turberosos deben evitarse cuando seleccionamos un emplazamiento para un nuevo cultivo.

Además de la energía por conducción hacia dentro y hacia fuera de un suelo, también existe la conducción hacia dentro y hacia fuera de los materiales que constituyen las plantas (e.g. tronco de los árboles, frutos grandes). La energía almacenada por los tejidos de las plantas es pequeña si se compara con la densidad de flujo de calor del suelo, pero puede ser importante en algunos casos. Por ejemplo, el calor almacenado en los frutos de los cítricos provoca que la temperatura de la piel del fruto caiga más lentamente y no tan rápida como la temperatura del aire. Esto hay que tenerlo en consideración cuando se determina cuándo proteger una plantación de cítricos.

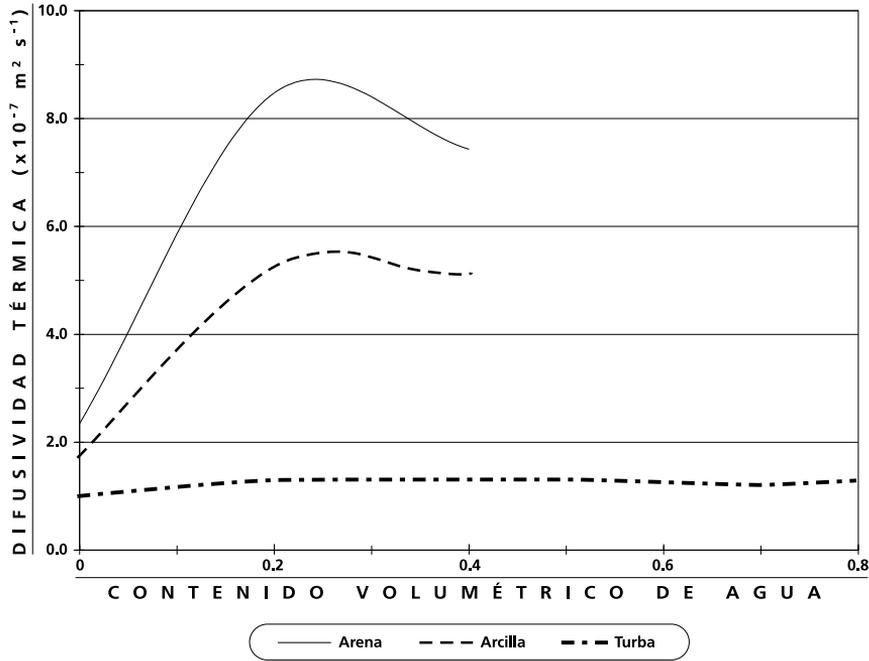
Radiación

La radiación electromagnética es la transferencia de energía que resulta de la oscilación de los campos eléctrico y magnético. Un buen ejemplo es la luz del Sol o radiación solar, la cual transfiere enormes cantidades de energía a la superficie de la Tierra. La mayor parte de la distancia entre el Sol y la Tierra es vacío (i.e. espacio vacío), por ello una propiedad de la radiación es que la transferencia de calor ocurre incluso a través del vacío. Aunque más fríos, los objetos en la Tierra radian energía a sus alrededores, pero el contenido de energía de la radiación es considerablemente menor. La energía radiada desde un objeto es una función de la cuarta potencia de la temperatura absoluta:

$$E = \epsilon \sigma T_K^4 \text{ W m}^{-2} \quad \text{Ec. 3.15}$$

FIGURA 3.12

Ejemplo de difusividades térmicas para suelos arenosos, arcillosos y turbas (orgánico) como una función del contenido volumétrico de agua (modificado de Monteith y Unsworth, 1990)



donde ε es la emisividad (i.e. la fracción de la energía máxima posible emitida a una temperatura en particular); $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, es la constante de Stefan-Boltzmann; y T_K es la temperatura absoluta ($T_K = T_a + 273,15$). Asumiendo que $\varepsilon = 1,0$, la densidad de flujo radiante desde la superficie del Sol a 6 000 K es de unos 73 483 200 W m^{-2} , mientras que la radiación desde la superficie de la Tierra a 288 K es aproximadamente 390 W m^{-2} . Sin embargo, como la irradiancia (i.e. densidad de flujo de radiación en W m^{-2}) que es recibida por una superficie disminuye con el cuadrado de la distancia desde el Sol y la distancia media entre la Tierra y el Sol es de unos 150 660 000 km, la energía solar se reduce hasta aproximadamente la constante solar ($G_{sc} = 1\,367 \text{ W m}^{-2}$) en el momento que alcanza la parte superior de la atmósfera de la Tierra. Conforme la radiación atraviesa la atmósfera, parte es reflejada y parte es absorbida, por ello, en un día despejado, sólo un 75% de la radiación solar alcanza la superficie. Como la Tierra

recibe la energía solar en una área de superficie (πr^2) de un disco perpendicular a los rayos del Sol con un radio (r) igual que la Tierra emite desde un área de la superficie de una esfera ($4\pi r^2$), el input y el output de la energía radiante están en equilibrio y la temperatura de la Tierra es relativamente estable.

La energía radiante puede describirse en términos de la longitud de onda de la radiación. Los cuerpos con temperaturas más altas emiten las longitudes de onda de energía electromagnética más cortas. La energía emitida por un emisor perfecto a 6 000 K cae dentro del intervalo de 0,15 a 4,0 μm , donde 1,0 $\mu\text{m} = 1,0 \times 10^{-6}$ m. Mucha de la radiación de energía elevada (longitud de onda corta) es absorbida o reflejada conforme pasa a través de la atmósfera, por ello la radiación solar recibida en la superficie de la Tierra cae principalmente en la longitud de onda en el intervalo entre 0,3 y 4,0 μm . La longitud de onda de máxima emisión (λ_{max}) se calcula utilizando la ley del desplazamiento de Wien como:

$$\lambda_{max} = \frac{2897}{T_K} \quad \mu\text{m} \quad \text{Ec. 3.16}$$

donde T_K es la temperatura absoluta del objeto que está emitiendo. Para el Sol a 6 000 K, la λ_{max} es aproximadamente 0,48 μm . La mayor parte de la radiación térmica (i.e. terrestre) desde objetos a las temperaturas de la Tierra cae en el intervalo entre 3,0 y 100 μm , con un máximo a aproximadamente 10 μm para una temperatura media $T_K \approx 288$ K. Hay un solapamiento entre 3,0 y 4,0 μm para la radiación solar y terrestre, pero la energía emitida en el intervalo es pequeña para ambas distribuciones espectrales. Además, la energía del Sol se denomina radiación de onda corta (i.e. longitud de onda corta) y la de la Tierra se denomina radiación de onda larga (i.e. longitud de onda larga). Las dos bandas tienen un solapamiento insignificante.

La radiación de onda corta neta (R_{Sn}) se calcula como:

$$R_{Sn} = R_{Sd} + R_{Su} \quad \text{W m}^{-2} \quad \text{Ec. 3.17}$$

donde R_{Sd} y R_{Su} son las densidades de flujo de radiación de onda corta hacia abajo (positiva) y hacia arriba (negativa), respectivamente. Como la Tierra es demasiado fría para emitir energía significativa como radiación de onda corta, R_{Su} comprende únicamente la radiación de onda corte reflejada. La fracción de radiación de onda corta que es reflejada desde una superficie se denomina albedo (α), y por ello la radiación de onda corta hacia arriba se expresa como:

$$R_{Su} = -\alpha R_{Sd} \quad \text{W m}^{-2} \quad \text{Ec. 3.18}$$

Entonces, la radiación de onda corta neta (i.e. la cantidad absorbida en la superficie) puede expresarse como:

$$R_{Sn} = R_{Sd} + R_{Su} = R_{Sd} + (-\alpha R_{Sd}) = (1 - \alpha)R_{Sd} \quad \text{W m}^{-2} \quad \text{Ec. 3.19}$$

Las superficies vegetales normalmente absorben la mayoría de la radiación de onda larga hacia abajo que incide en ellas. Sin embargo, una fracción mínima es reflejada de nuevo al cielo. La superficie también emite radiación de onda larga de acuerdo con la cuarta potencia de su temperatura. La radiación neta de onda larga es el balance entre las ganancias y las pérdidas de radiación hacia y desde la superficie tal como se indica por:

$$R_{Ln} = R_{Ld} + R_{Lu} \quad \text{W m}^{-2} \quad \text{Ec. 3.20}$$

donde la radiación de onda larga hacia abajo (R_{Ld}) es una ganancia (i.e. un número positivo) y la radiación de onda larga hacia arriba (R_{Lu}) es una pérdida (i.e. un número negativo). La temperatura aparente del cielo es mucho más fría que la de la superficie, y por ello la radiación de onda larga hacia abajo es menos que la radiación de onda larga hacia arriba y la radiación de onda larga neta es siempre negativa.

La radiación hacia abajo R_{Ld} es la energía emitida a la temperatura aparente del cielo, la cual varía principalmente en función de la nubosidad. Como la temperatura de la superficie y la temperatura aparente del cielo no se conocen normalmente, se han desarrollado algunas ecuaciones para estimar R_{Ln} como una función de la temperatura protegida estándar T_a (°C).

La siguiente ecuación de R_{Ln} da una buena estimación para el día:

$$R_{Ln} = -f\epsilon_o\sigma T_k^4 \quad \text{W m}^{-2} \quad \text{Ec. 3.21}$$

donde f es una función que tiene en cuenta la nubosidad durante el día (Wright y Jensen, 1972):

$$f = 1,35 \frac{R_{Sd}}{R_{So}} - 0,35 \quad \text{Ec. 3.22}$$

donde R_{Sd} es una medida de la radiación solar total y R_{So} es la radiación solar del cielo despejado. El valor mínimo es $f = 0,055$ para un cielo tapado por completo (i.e. $R_{Sd}/R_{So} = 0,3$) y el máximo es $f = 1,0$ para cielos completamente despejados (Allen *et al.*, 1998). En la ecuación 3.21, $T_K = T_a + 273,15$ es la temperatura

absoluta (K) que se corresponde con T_a (i.e. la temperatura medida en una caseta meteorológica estándar). La emisividad neta aparente (ϵ_o) entre la superficie y el cielo se estima utilizando una fórmula basada en Brunt (1932) y utilizando los coeficientes de Doorenbos y Pruitt (1977):

$$\epsilon_o = 0,34 - 0,139\sqrt{e_d} \quad \text{Ec. 3.23}$$

donde e_d es la presión de vapor (kPa) medida en una caseta meteorológica estándar. No hay un método conocido, suficientemente preciso, para estimar f durante la noche; sin embargo, los cielos normalmente están despejados durante una helada nocturna de radiación, y por tanto R_{Ln} puede estimarse utilizando las ecuaciones 3.21 y 3.23 con $f = 1,0$.

En una helada nocturna de radiación, R_{Ln} varía normalmente entre -73 y -95 W m^{-2} dependiendo de la temperatura y la humedad (Tabla 3.3). Cuando los cielos están completamente cubiertos, R_{Ln} depende de la temperatura base de la nube; pero se espera una $R_n = -10 \text{ W m}^{-2}$ para nubes bajas tipo estrato. Por consiguiente, según la cobertura de nubes, $-95 \text{ W m}^{-2} < R_{Ln} < -10 \text{ W m}^{-2}$, con un valor típico de alrededor de -80 W m^{-2} para una noche de helada despejada.

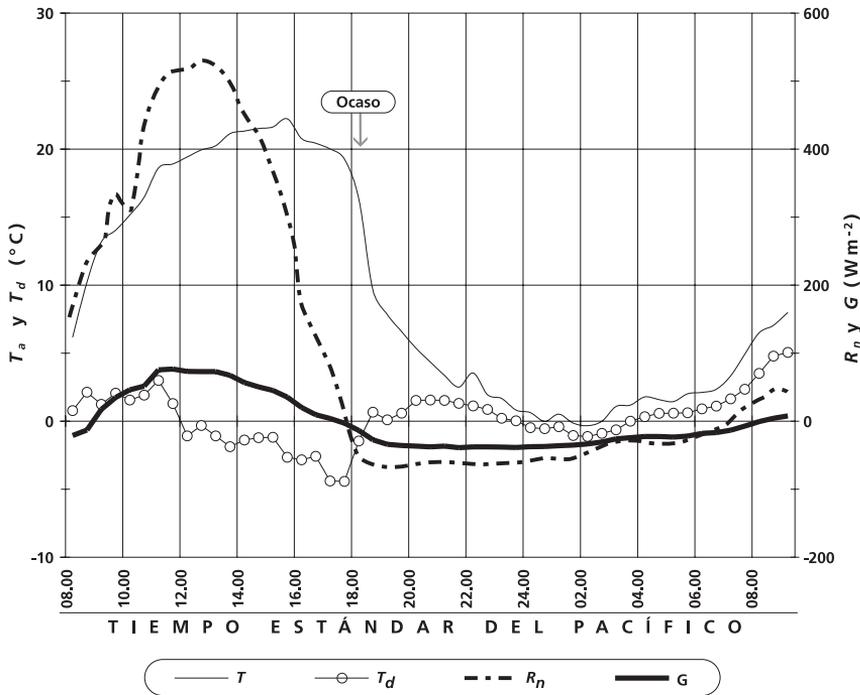
TABLA 3.3

Radiación neta de onda larga (W m^{-2}) para un intervalo de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) del aire (T_a) y del punto de rocío bajo cero (T_d) y de la presión de vapor a saturación a la temperatura del punto de rocío (e_d) en kPa. Los valores de R_{Ln} se han calculado utilizando las Ecuaciones 3.21 y 3.23, y asumiendo $f = 1.0$

T_a ($^{\circ}\text{C}$)	TEMPERATURA DEL PUNTO DE ROCÍO ($^{\circ}\text{C}$)			
	0	-2	-4	-6
12	-86	-89	-92	-95
10	-84	-87	-90	-92
8	-82	-84	-87	-89
6	-79	-82	-85	-87
4	-77	-80	-82	-84
2	-75	-77	-80	-82
0	-73	-75	-78	-80
-2		-73	-75	-77
-4			-73	-75
-6				-73
e_d (kPa) =	0,6108	0,5274	0,4543	0,3902

FIGURA 3.13

La radiación neta (R_n), la densidad del flujo de calor al suelo (G), la temperatura del aire (T_a) a 1,5 m, y la temperatura del punto de rocío (T_d) a 1,5 m en una plantación de nogales con una cobertura parcial de gramíneas y de malas hierbas en el Indian Valley, California, EE.UU. (latitud 39°N) el 14–15 de marzo de 2001



La figura 3.13 muestra un ejemplo de cambios en la radiación neta, la densidad de flujo de calor del suelo y la temperatura del aire que son típicos en primavera en una valle montañoso de California. Durante el día, el valor máximo es $R_n \approx 500 \text{ W m}^{-2}$ y durante la noche, la radiación neta cae hasta aproximadamente -80 W m^{-2} . Aumenta después de las 02.00 h conforme la cobertura de nubes aumenta lentamente. Observa que la temperatura nocturna empieza a caer rápidamente a la caída del Sol, un poco después de que la R_n sea negativa. Empezando unas dos horas después de la caída del Sol, la tasa de disminución de temperatura permanece casi constante hasta que la cobertura de nubes aumenta y produce un aumento en la temperatura.

El flujo de calor latente

Cuando el vapor de agua se condensa o se congela, el calor latente cambia a calor sensible y la temperatura del aire y de cualquier materia en contacto con el agua líquida o sólida aumentará temporalmente. Cuando el calor latente cambia a calor sensible, la temperatura del aire aumenta. Cuando el hielo se derrite, el agua se calienta, o el agua se evapora, el calor sensible cambia a calor latente y la temperatura del aire cae. La tabla 3.4 muestra la cantidad de calor consumida o liberada por unidad de masa para cada uno de estos procesos. Cuando el intercambio de energía es positivo, entonces el contenido de calor sensible aumenta y también la temperatura. La temperatura desciende cuando el intercambio de energía es negativo.

Las temperaturas bajo cero pueden provocar la formación de cristales de hielo en las superficies de las plantas. Para que el vapor de agua se condense como rocío o se deposite sobre las superficies como hielo por sublimación, el aire en contacto debe en primer lugar saturarse (i.e. alcanza el 100% de humedad relativa). Con una posterior caída de la temperatura, el vapor de agua tanto se condensará como se depositará sobre la superficie. Ambas son reacciones exotérmicas, por ello el calor latente se convierte en calor sensible durante los procesos de condensación o deposición y la liberación de calor disminuirá la caída de temperatura.

TABLA 3.4

Intercambio de energía del agua debido al enfriamiento, al calentamiento y a los cambios de fase

PROCESO	ENERGÍA
Enfriamiento del agua	+4,1868 J g ⁻¹ °C ⁻¹
Congelamiento (el líquido congela a 0°C)	+334,5 J g ⁻¹
Enfriamiento del hielo	+2,1 J g ⁻¹ °C ⁻¹
Condensación de agua (vapor a líquido) a 0°C	+2 501,0 J g ⁻¹
Deposición de agua (vapor a hielo) a 0°C	+2 835,5 J g ⁻¹
Sublimación del agua (hielo a vapor) a 0°C	-2 835,5 J g ⁻¹
Evaporación del agua (agua a vapor) a 0°C	-2 501,0 J g ⁻¹
Calentamiento del hielo	-2,1 J g ⁻¹ °C ⁻¹
Fusión (hielo se funde a 0°C)	-334,5 J g ⁻¹
Calentamiento del agua	-4,1868 J g ⁻¹ °C ⁻¹

NOTA: Signos positivos indican liberación de calor sensible y signos negativos indican extracción de calor sensible.

La densidad de flujo de vapor de agua (E) es el flujo de las moléculas de agua por unidad de tiempo y por unidad de superficie (i.e. $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$). Cuando se multiplica por el calor latente de vaporización ($L \approx 2,501 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ a 0°C), la densidad de flujo de vapor de agua se expresa en unidades de energía (i.e. W m^{-2}). La evaporación es importante para todos los métodos de protección contra heladas que se basan en el uso del agua. La relación entre el calor latente de vaporización y el calor latente de fusión es 7,5, por ello debe congelarse mucha más agua comparada con la de vaporización para tener una ganancia neta de energía cuando se utilizan aspersores para la protección contra heladas.

Es normal para los fruticultores experimentar problemas por la aparición de zonas dañadas en la piel de los frutos. Aunque el daño del fruto no llega al punto de una pérdida completa, la zona dañada reduce el valor del fruto para consumo de mesa. Este problema es debido probablemente a las gotas de agua sobre el fruto en una noche con temperaturas del aire bajo cero. Por ejemplo, si una lluvia ligera, niebla o un riego se produce durante el día de forma que los frutos se cubren con agua, esta agua se evaporará durante la noche y la pulpa del fruto cerca de las gotas de agua se puede enfriar hasta la temperatura del bulbo húmedo o del bulbo helado, que es más baja que la temperatura del aire. Como resultado, el daño se produce donde había gotas de agua en el fruto. Si la temperatura del punto de rocío es baja, el daño puede producirse en los cultivos sensibles, incluso si la temperatura del aire permanece por encima de 0°C .

Recursos adicionales sobre el balance de energía

Para los lectores que quieren más rigor e información detallada sobre el balance de energía y su relación con la protección contra heladas se sugiere Rossi *et al.* (2002), Barfield y Gerber (1979) y Kalma *et al.* (1992).

EL DAÑO PRODUCIDO POR LAS HELADAS: FISIOLOGÍA Y TEMPERATURAS CRÍTICAS

INTRODUCCIÓN

Los daños por bajas temperaturas (e.g. frío y congelación) pueden producirse en todas las plantas, pero los mecanismos y la tipología del daño varían considerablemente. Algunos cultivos frutales, hortícolas y ornamentales de origen tropical experimentan daños fisiológicos cuando están sometidos a temperaturas por debajo de +12,5 °C, bastante por encima de las temperaturas de congelación. Sin embargo, el daño por encima de 0 °C es más por enfriamiento que por helada. Ésta ocurre en todas las plantas debido a la formación de hielo. Las plantas cultivadas que se desarrollan en climas tropicales, a menudo experimentan daños importantes por heladas cuando se exponen a temperaturas ligeramente por debajo de cero, mientras que muchos cultivos que se desarrollan en climas más fríos, a menudo, sobreviven con pocos daños si la congelación no es muy severa. Algunas excepciones son las lechugas, que se han originado en climas templados, pero pueden dañarse a temperaturas cercanas a 0 °C y algunos frutos subtropicales, que a pesar de tener un origen tropical pueden permanecer a temperaturas de -5 a -8 °C. Las especies o las variedades de cultivos exhiben distintos daños por heladas a la misma temperatura y en el mismo estadio fenológico, dependiendo de las condiciones meteorológicas previas. Su adaptación a las temperaturas frías antes de una helada nocturna se denomina “endurecimiento”. Durante los periodos fríos, las plantas tienden a endurecerse contra el daño por congelación, y pierden el endurecimiento después de un período de calentamiento. El endurecimiento está relacionado, probablemente, con el aumento del contenido de solutos en el tejido de las plantas o con la disminución de la concentración de bacterias activas en la nucleación de hielo (INA) durante los períodos fríos, o una combinación de ambos. Durante los períodos cálidos, las plantas exhiben crecimiento, el cual reduce la concentración de solutos, y aumenta la concentración de bacterias INA, haciendo las plantas menos resistentes.

El daño por heladas ocurre cuando se forma hielo dentro del tejido de las plantas, dañando sus células. Puede ocurrir en las plantas anuales (cultivos para ensilado o forrajes de gramíneas y leguminosas; cereales; cultivos para aceite o de raíces; hortícolas; y cultivos ornamentales) multi-anuales y perennes (árboles frutales

caducifolios y de hoja perenne). Los daños por heladas tienen un efecto drástico para la planta entera o pueden afectar únicamente a una pequeña parte del tejido de la planta, lo cual reduce el rendimiento o deprecia la calidad del producto.

En este capítulo se presenta una breve discusión de los mecanismos, tipos y síntomas del daño por congelación. Para lectores interesados, Levitt (1980), Sakai y Larcher (1987) y Li (1989) proporcionan una revisión extensa tanto del daño por congelación como del daño por enfriamiento. Más adelante, en el capítulo, se presenta una breve discusión sobre endurecimiento, sensibilidad, tipo de daño y temperaturas dañinas críticas de los cultivos importantes.

EL DAÑO CELULAR

El daño directo por helada ocurre cuando se forman cristales de hielo dentro del protoplasma de las células (congelación o helada intracelular), mientras que el daño indirecto puede ocurrir cuando se forma hielo dentro de las plantas pero fuera de las células (i.e. congelación o helada extracelular). Lo que realmente daña las plantas no son las temperaturas frías sino la formación de hielo (Westwood, 1978). Se cree que la formación de hielo intracelular causa una “ruptura mecánica de la estructura protoplásmica” (Levitt, 1980). La extensión del daño debido a la congelación intracelular depende principalmente de la rapidez del enfriamiento y la intensidad del enfriamiento antes de congelarse. Hay poca o ninguna evidencia de que la duración de la congelación afecte al daño. De hecho, Levitt (1980) establece que el daño por congelación parece ser independiente del tiempo para periodos cortos (e.g. 2–24 horas).

El daño directo por congelación intracelular se asocia con un enfriamiento rápido. Por ejemplo, Siminovitch, Singh y de la Roche (1978) observaron congelamiento intracelular y muerte de las células cuando se enfriaron plantas de centeno a un ritmo de 8 °C por minuto hasta -12 °C, congelándose el agua superenfriada dentro de las células. Cuando las plantas se enfriaron hasta -12 °C durante 23 minutos, la formación de hielo fue extracelular y las plantas se recuperaron completamente después del deshielo. En estudios realizados en cámaras climáticas para determinar temperaturas críticas, los cortes de plantas se enfrían normalmente a un ritmo entre 1,0 y 2,0 °C h⁻¹. Éste es un ritmo más lento que en el experimento con plantas de centeno y más lento que alguno de los ritmos que se dan normalmente en la naturaleza. De hecho, Levitt (1980) indica que, en la naturaleza, el daño por congelación resulta de la formación de cristales de hielo extracelular y de que no hay evidencia de congelación intracelular.

Aunque la evidencia no es muy grande, parece que el ritmo de deshielo después de una congelación está parcialmente relacionado con la intensidad del daño. Los

citricultores del sur de California normalmente creen que haciendo más lento el proceso de calentamiento después de una noche de congelación se puede reducir el daño por helada. De hecho, los fruticultores justifican la puesta en marcha de ventiladores durante más tiempo por la mañana después de una noche de congelación para hacer más lento el proceso de deshielo. Yoshida y Sakai (1968) sugirieron que el ritmo de deshielo hará más lenta la rehidratación de las células de las plantas que han experimentado congelación extracelular y se reducirá el daño debido a un deshielo rápido.

Levitt (1980) propuso que las células se morían de forma gradual como resultado del crecimiento de masa de hielo extracelular. Recuerda que la presión de vapor a saturación es más baja sobre hielo que sobre el agua líquida. Como resultado de la formación de hielo extracelular, el agua se evaporará desde el agua líquida dentro de las células y pasará a través de las membranas semipermeables de las células y se depositará sobre los cristales de hielo fuera de las células. Conforme el agua sale de las células, la concentración de solutos aumenta y reduce el riesgo de congelación. Sin embargo, a medida que el hielo continua creciendo, las células se desecan más. Normalmente, en las plantas dañadas, los cristales de hielo extracelular son mucho más grandes que las células muertas de alrededor, que se han colapsado debido a la desecación. En consecuencia, la principal causa en la naturaleza del daño por helada a las plantas es la formación de hielo extracelular, que produce un estrés de agua secundario a las células adyacentes. De hecho, hay una estrecha relación entre las plantas tolerantes a la sequía y las plantas tolerantes a la congelación.

Observa que los antitranspirantes se han propuesto como un método de protección contra la congelación. Se argumenta que los daños por helada ocurren por la deshidratación de las células y los antitranspirantes se da a entender que reducen las pérdidas de agua desde las plantas y proporcionan protección contra la congelación. Sin embargo, la desecación de las células resulta de la evaporación del agua celular en respuesta al gradiente de presión de vapor provocado por la formación de hielo extracelular y no debido a la transpiración. No existe evidencia de que los antitranspirantes reducen la desecación debido a la formación de cristales de hielo extracelular.

LA EVITACIÓN, LA TOLERANCIA Y EL ENDURECIMIENTO

Las plantas resisten las temperaturas bajas evitándolas o tolerándolas. Las estrategias para evitar las temperaturas bajas incluyen:

- La retención de nieve a lo largo del invierno, protege tanto las partes aéreas de las plantas como las subterráneas (Ventskevich, 1958);

- El efecto biofísico de cubiertas densas, que protegen parte de la planta de una atmósfera fría;
- Órganos con elevada capacidad de calor (e.g. troncos y frutos grandes) que retrasan la caída de temperatura respecto a la temperatura del aire, lo que puede salvarlos de las temperaturas que más dañan (Turrell y Austin, 1969); y
- Los métodos de protección contra heladas artificiales, que modifican el microclima de las plantas (e.g. espumas, coberturas y nieblas).

La tolerancia a bajas temperaturas puede conseguirse:

- Evitando la congelación mediante una disminución del punto de congelación o un aumento en el grado de superenfriamiento (Burke *et al.*, 1976);
- Tolerancia de la congelación extracelular reduciendo la cantidad de hielo formado debido a un incremento de la concentración de solutos en el protoplasma (Li y Palta, 1978);
- Tolerancia de un grado más alto de desecación debido a la plasmolisis del protoplasma (Gusta, Burke y Kapoor, 1975); o
- Aumento de la permeabilidad de la membrana del plasma para evitar la congelación intracelular (Alden y Hermann, 1971; Levitt, 1980).

La temperatura a la cual ocurre la congelación puede fluctuar considerablemente dependiendo de la dureza que han alcanzado las plantas. Sin embargo hay plantas (e.g. bastantes plantas C_4 , hojas de palmeras y plantas de tomate) que tienen muy poca o ninguna capacidad de endurecimiento (Larcher, 1982; Olien, 1967). El endurecimiento implica tanto mecanismos de evitación como de tolerancia a la congelación. La acumulación de azúcares o azúcares-alcoholes disminuye la temperatura de congelación de los tejidos (e.g. en hojas de olivo y de cítricos) y aumenta el superenfriamiento en muchos árboles frutales caducifolios o de hoja perenne en respuesta a una baja temperatura del aire. Algunas células pueden endurecer aumentando la proporción de ácidos grasos no saturados de los lípidos de la membrana del plasma, que aumentarían la estabilidad de la membrana durante la desecación. Como el endurecimiento es un proceso activo que depende del nivel de asimilados en los tejidos, todas las condiciones que disminuyan el conjunto de asimilados en los tejidos reducirán el endurecimiento.

Aunque las temperaturas frías provocan que los frutos de las plantas se endurezcan contra los daños por helada, el endurecimiento se pierde rápidamente tras unos pocos días cálidos. Las yemas de los frutos se volverán a endurecer pero a un ritmo mucho más lento que al que lo han perdido. Ésta es la base de la práctica de enfriar los cultivos con aspersores durante los períodos más cálidos del día para reducir la temperatura y evitar la pérdida de endurecimiento.

En el pasado, los investigadores han atribuido las fluctuaciones en la sensibilidad a la congelación a cambios fisiológicos, pero la contribución de INA a la sensibilidad, lo cual también puede ser un factor a considerar, se ha ignorado en general. Por ejemplo, un aumento rápido en la concentración de bacterias nucleadoras de hielo puede ocurrir también en periodos cálidos. Conforme vayan volviendo las temperaturas frías, la concentración de bacterias puede disminuir lentamente.

LA SENSIBILIDAD DE LAS PLANTAS

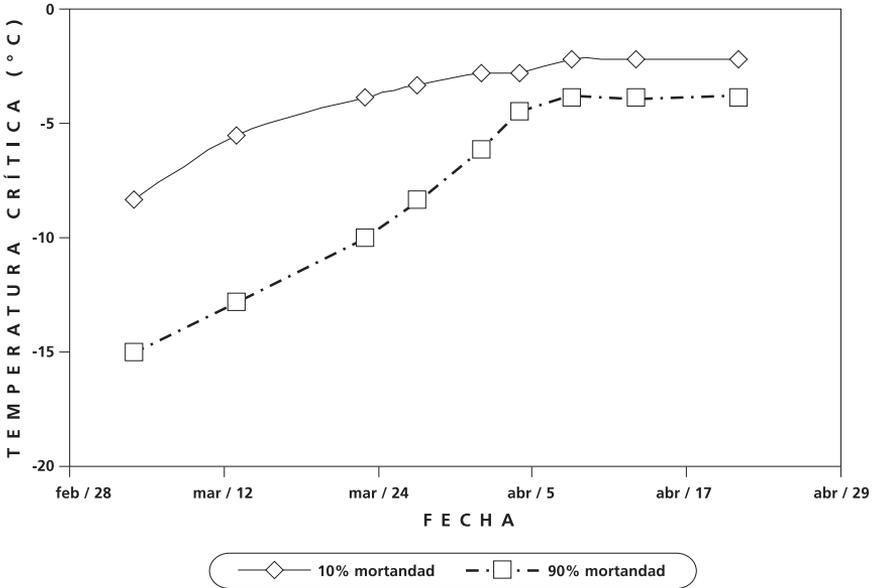
Las plantas se agrupan en cuatro categorías de sensibilidad a la congelación: (1) frágiles; (2) ligeramente resistentes; (3) moderadamente resistentes; y (4) muy resistentes (Levitt, 1980). Las plantas frágiles son aquellas que no han desarrollado la evitación de la congelación intracelular (e.g. muchas plantas tropicales). Las plantas ligeramente resistentes incluyen muchos de los árboles frutales subtropicales, árboles caducifolios, y cultivos hortícolas que son sensibles al enfriamiento hasta los $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las plantas moderadamente resistentes incluyen aquellas que pueden acumular suficientes solutos para resistir el daño por heladas hasta temperaturas tan bajas como $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, principalmente evitando el daño por deshidratación, pero son menos capaces de tolerar temperaturas más bajas. Las plantas muy resistentes son capaces de evitar la congelación intracelular así como de evitar el daño debido a la desecación de las células.

A pesar de que las categorías de sensibilidad a la congelación dan una información general sobre el frío que un órgano de una planta puede aguantar antes de que ocurra el daño por helada, el endurecimiento y el estadio fenológico son casi tan importantes. Por ejemplo, la temperatura que produce mortandad de yemas del 10% (T_{10}) y del 90% (T_{90}) aumenta con el avance de la estación desde la primera hinchazón hasta después de la floración (Figura 4.1). Además, las temperaturas que producen la muerte de yemas T_{90} en árboles de hoja caduca aumentan más rápidamente y se acerca a las temperaturas que producen la mortandad T_{10} .

Wang y Wallace (2003) presentaron una lista de frutas frescas y hortalizas según categorías de susceptibilidad a la congelación (Tabla 4.1.) mostrando las sensibilidades relativas cuando eran expuestas a temperaturas de congelación. Caplan (1988) facilitó una lista de flores anuales agrupadas por su tolerancia a la congelación (Tabla 4.2). La Tabla 4.4 proporciona una lista de estos y otros cultivos agrupados por sus categorías de endurecimiento.

FIGURA 4.1

Temperaturas típicas para un 10% y un 90% de mortandad de yemas para cerezos que se corresponden con las fechas medias observadas en la Washington State University, Prosser Research and Extension Centre (Proebsting y Mills, 1978)



TIPOS DE DAÑO Y TEMPERATURAS CRÍTICAS

Hay muchos estudios sobre temperaturas dañinas críticas (T_c) para una variedad de cultivos. Estos números se obtuvieron utilizando un conjunto de métodos y se debería ser cauteloso a la hora de intentar utilizar las temperaturas críticas publicadas como temperaturas para la puesta en marcha y la detención de los métodos de protección activos. Por ejemplo, algunos investigadores han comparado registros de daños comerciales a largo plazo con las medidas de temperatura de casetas meteorológicas estándar. En algunos casos, el sensor de temperatura, la protección, la altura del montaje, etc., no se indican. Estos factores pueden afectar a los resultados y es difícil aplicar la información de una localidad a otra ya que se dispone de información insuficiente. También hay siempre diferencias microclimáticas, incluso dentro de una parcela experimental que puede afectar a los resultados. Por ejemplo, se han observado diferencias

TABLA 4.1

Susceptibilidad de frutas y verduras al daño por heladas

MAS SUSCEPTIBLES	MODERADAMENTE SUSCEPTIBLES	MENOS SUSCEPTIBLES
Aguacates	Apio	Barbón común
Albaricoques	Brócoli	Berza común
Bananas	Calabaza, Invierno	Chirivías
Batata o Boniato	Cebolla (seca)	Col rábano
Bayas (excepto frambuesas)	Coliflor	Col, madura y sabrosa
Berenjena	Espinacas	Coles de Bruselas
Calabaza, Verano	Frambuesa	Colinabos
Ciruelas	Guisantes	Dátiles
Espárragos	Manzanas	Nabos
Judías verdes	Naranjas	Remolachas
Lechuga	Peras	
Lima	Perejil	
Limonos	Rábanos	
Melocotoneros	Uva de mesa	
Okra	Uvas	
Patatas	Zanahorias	
Pepinos		
Pimientos, dulces		
Tomates		

FUENTE: Wang y Wallace, 2003.

TABLA 4.2

Categorías de resistencia a la congelación de varias flores anuales

RESISTENTE	TOLERANTES	FRAGILES	SENSIBLES
Col Ornamental	Blackeyed Susan (<i>Rudbeckia</i>)	<i>Nicotiana</i>	Balsam
Cornflower	Bells of Ireland (<i>Moluccéulasa</i>)	Aster	<i>Agérato</i>
Pensamiento	<i>Coreopsis</i>	Petunia	Begonia
Primavera (<i>Primula</i>)	Clavel del poeta (<i>Dianthus</i>)	<i>Scabiosa</i>	Cockscomb
Violeta	Pot Marigold (<i>Calendula</i>)	Stathielo	Alegría (<i>Impatiens</i>)
	Dragón	Sweet alyssum	Lobelia
	Stock (<i>Matthiola incana</i>)	Verbena	Caléndula
	Sweet pea		Moss rose (<i>Portulaca</i>)
	<i>Torenia</i>		<i>Vinca</i>
			Phlox, annual
			<i>Salpiglossis</i>
			<i>Salvia</i>
			<i>Zinnia</i>

FUENTE: Basado en una publicación de la Purdue University HO-14, citado por Caplan, 1988.

espaciales de 1,0 °C o más dentro de un par de cientos de metros en un campo de frutales durante una noche de helada, medidas a la misma altura sobre la tierra en un terreno llano. Por ello, es de algún modo cuestionable que los valores de T_c de temperaturas de una caseta meteorológica sean aplicados universalmente.

Muchos investigadores han cortado pequeñas ramas de los árboles y las han colocado en una cámara de clima controlado donde las ramas escindidas fueron enfriadas a intervalos de temperaturas bajo cero para observar el daño. Mientras que este proceso está más estandarizado que las medidas de campo, el microclima dentro de una cámara de atmósfera controlada no es el mismo que el de las ramas expuestas a la intemperie. Por ejemplo, se puede determinar la cantidad de daño en ramas expuestas durante 30 minutos a intervalos de temperaturas, pero dentro de un árbol las ramas sin cortar van a tener un intervalo distinto de temperaturas. Las ramas en la parte superior del árbol estarán más expuestas y por consiguiente van a estar más frías que la temperatura del aire. Inversamente, las ramas dentro de la cubierta están más calientes y en consecuencia menos expuestas a sufrir daños. En árboles caducifolios, antes que las hojas estén completamente desarrolladas, normalmente hay una inversión desde el suelo hacia arriba, y por ello las temperaturas del aire más frías están cerca de la parte baja de los árboles. Cuando los árboles tienen la mayoría de las hojas expandidas, sin embargo, la temperatura mínima en las noches con helada de radiación, aumenta con la altura donde están la mayoría de las hojas. En cualquier caso, la utilización de temperaturas de una caseta meteorológica va a proporcionar únicamente una aproximación grosera del daño esperado.

Además de las variaciones de temperatura de las distintas partes de las plantas dentro de un árbol, viñedo o campo cultivado, existen también variaciones en las bacterias INA, que ahora se sabe que son un factor determinante de hasta que punto las plantas se superenfriarán. Para nuestro conocimiento, ningún investigador ha tenido en cuenta las diferencias en las concentraciones de bacterias nucleadoras de hielo cuando se han evaluado las temperaturas críticas. Por ejemplo, es conocido que los almendros tienen grandes concentraciones de bacterias INA. Si en un bloque de frutales se han aplicado bactericidas que reducen la población de bacterias INA y otro no fue tratado, entonces la temperatura crítica para el bloque con menos bacterias tendría que tener temperaturas críticas más bajas. Este es otro factor que complica la decisión de poner en marcha los métodos de protección activos. En general, la mejor aproximación es utilizar los valores publicados como una directriz e iniciar y paralizar la protección basándose en factores de corrección de seguridad adicionales de los valores publicados de T_c . Es mejor equivocarse por arriba.

Es importante observar que las temperaturas críticas determinadas en un laboratorio se han obtenido en congeladores controlados con un lento movimiento del aire. La temperatura del aire en el congelador desciende en intervalos pequeños y predeterminados y mantenidos por 20 a 30 minutos o más después de cada intervalo para permitir que las yemas entren en equilibrio. Esta práctica ha llevado a un error muy generalizado de que las yemas tienen que estar a una temperatura de 20 a 30 minutos para que se produzca el daño. Lo cierto es que para periodos cortos (2 a 24 h) el tiempo que el tejido de una planta está por debajo de una temperatura en particular es menos importante que cuánto de baja ha llegado la temperatura (Levitt, 1980). Los tejidos de las plantas se enfrían a un ritmo que depende del balance de radiación y de la diferencia de temperatura entre el tejido y su ambiente. Por consiguiente, si el aire cae de repente varios grados, el tejido puede enfriarse rápidamente por debajo de los niveles críticos resultando en daños por congelación. Si el tejido de la planta contiene agua superenfriada, la agitación mecánica de las hojas y las yemas por los ventiladores o helicópteros puede iniciar la formación de cristales de hielo, resultando en daño incluso si los tejidos están por encima de los valores de temperatura crítica determinada en cámara. Sin embargo, los valores de cámara proporcionan unas directrices sobre cuándo las medidas de protección necesitan ser implementadas.

CULTIVOS ANUALES Y BIENALES

Los síntomas de daño en cultivos hortícolas varían ampliamente y a veces pueden confundirse con daño biótico. La Tabla 4.3 muestra una lista de síntomas de daños por helada de algunos cultivos hortícolas. Las especies difieren enormemente en su resistencia a las heladas, pero el nivel máximo de resistencia sólo se consigue cuando las condiciones ambientales permiten que tenga lugar el endurecimiento. La variedad es, a menudo, tan importante como la especie a la hora de definir la resistencia a las heladas, especialmente cuando hay tipos de invierno y de primavera. En general, también existe una relación inversa entre la precocidad de una variedad y la resistencia a las heladas.

Los experimentos de campo sobre las temperaturas dañinas críticas para frutas y verduras son, de alguna manera, limitados, pero las temperaturas de congelación más altas a partir de estudios de frutas y verduras almacenadas se proporcionan en la Tabla 4.4. La información de la Tabla 4.4 puede considerarse una guía de utilidad, a pesar de que las temperaturas dañinas críticas pueden ser ligeramente más altas que las temperaturas del aire a las cuales cabe esperar que se produzca daño bajo condiciones de campo.

TABLA 4.3

Síntomas de daño por helada en cultivos hortícolas (Caplan, 1988)

CULTIVO	SINTOMAS
Alcachofa	La epidermis se separa y forma hinchazones entre blanquecinas y marrón claro. Cuando la hinchazón se rompe, el tejido subyacente se vuelve marrón.
Ajo	Los dientes descongelados se vuelven amarillentos grisáceos y empapados de agua.
Apio	Las hojas y pecíolos aparecen marchitos y una vez descongelados aparecen empapados de agua. Los pecíolos se congelan más rápidos que las hojas.
Boniato (Batata)	Una decoloración marrónácea-amarillenta del anillo vascular y una apariencia grisáceo-amarillenta y de estar empapados en agua de los otros tejidos. Las raíces se ablandan y se hacen susceptibles al marchitamiento.
Brócoli	Las flores más jóvenes en el centro del cogollo son más sensibles al daño por congelación. Se vuelven marrones y desprenden un olor fuerte.
Cebolla	Los bulbos descongelados son blandos, amarillento-grisáceos y empapados en agua en la sección transversal. El daño, a menudo, está limitado a escalas individuales.
Col	Las hojas se empapan de agua, translúcidas y blandas. Una vez descongeladas la epidermis se separa.
Coliflor	Los cogollos se vuelven marrones y desprenden un fuerte olor cuando se cocinan.
Espárrago	El extremo del espárrago se vuelve blando y oscuro y el resto del tallo del espárrago está empapado en agua. Los tallos descongelados se vuelven blandos.
Lechuga	Las células muertas de la epidermis que se separa de las hojas externas se hinchan, y se vuelven marrones aumentando la susceptibilidad al daño físico y al marchitamiento.
Nabo	En la superficie aparecen pequeñas zonas empapadas en agua o con hoyitos. Los tejidos dañados aparecen de color marrón o gris y desprenden un olor desagradable.
Patata	Los daños por congelación pueden que no sean evidentes externamente, pero se muestran manchas grisáceas o gris-azuláceas debajo de la piel. Los tubérculos descongelados se vuelven blandos.
Pimiento	Tejidos muertos y empapados en agua en parte o en toda la superficie del pericarpio con hoyitos, con arrugamiento y marchitamiento después del descongelado.
Rábano	Los tejidos descongelados aparecen translúcidos y las raíces se ablandan y se arrugan.
Remolacha	Se empapan de agua externa e internamente y algunas veces ennegrecimiento del tejido conductivo.
Tomate	Después del descongelado se empapan en agua y se ablandan. En frutos parcialmente congelados, el límite entre tejido sano y muerto está muy marcado, especialmente en frutos verdes.
Zanahoria	Apariencia de hinchazón, grietas dentadas a modo longitudinal. El interior se empapa de agua y tras la descongelación se oscurece.

TABLA 4.4

La temperatura de congelación más alta para frutas y verduras

NOMBRE COMUN	NOMBRE CIENTIFICO	TEMPERATURA (°C)
Acerola; Cereza de Barbados	<i>Malpighia glabra</i>	-1,4
Ajo (bulbo)	<i>Allium sativum</i>	-2,0
Albaricoque	<i>Prunus armeniaca</i>	-1,1
Alcachofa	<i>Cynara scolymus L.</i>	-1,2
Alcachofa de tierra	<i>Helianthus tuberosus L.</i>	-2,5
Aceitunas de mesa	<i>Olea europea</i>	-1,4
Aguacate	<i>Persea Americana</i>	
cv. Fuchs, Pollock		-0,9
cv. Fuerte, Hass		-1,6
cv. Lula, Booth		-0,9
Ajo de ascaloni (cebollana)	<i>Allium ascalonicum L.</i>	-0,7
Ajo tierno (ajo cebollino)	<i>Allium schoenoprasum L.</i>	-0,9
Apio	<i>Apium graveolens var. dulce</i>	-0,5
Apio rábano	<i>Apium graveolens var. rapaceum</i>	-0,9
Banana	<i>Musa paradisiaca var. sapientum</i>	-0,8
Banana	<i>Musa paradisiaca var. paradisiaca</i>	-0,8
Barbón común (planta de ostras)	<i>Trapopogon porrifolius L.</i>	-1,1
Batata de la China, Papa dulce (ñame)	<i>Dioscorea batatas Decne.</i>	-1,1
Bayas		
Arándano Americano (Blueberry)	<i>Vaccinium corymbosum</i>	-1,3
Arándanos (Cranberry)	<i>Vaccinium macrocarpon</i>	-0,9
Baya de saúco (Elderberry)	<i>Sambucus ssp.</i>	-1,1
Frambuesa (Raspberries)	<i>Rubus idaeus L.</i>	-0,9
Fresa	<i>Fragaria ssp.</i>	-0,8
Zarzamora	<i>Rubus ssp.</i>	-0,8
Zarzamora (Dewberry)	<i>Rubus ssp.</i>	-1,3
Zarzamora-Frambueso (Zarza de logan)	<i>Rubus ssp.</i>	-1,7
Berenjena	<i>Solanum melongena</i>	-0,8
Berra, berro, mastuerzo acuático	<i>Lepidium sativum</i>	-0,3
Berza común	<i>Brassica oleracea L. var.viridis L.</i>	-0,5
Boniato común. Batata	<i>Ipomoea batatas L.</i>	-1,3
Brócoli	<i>Brassica oleracea L. var. italica</i>	-0,6
Cactus de pera espinosa	<i>Opuntia ssp.</i>	-1,8
Calabaza grande	<i>Cucurbita maxima Duch.</i>	-0,8
Caqui	<i>Diospyros kaki</i>	
Fuyu		-2,2
Hachiya		-2,2

NOMBRE COMUN	NOMBRE CIENTIFICO	TEMPERATURA (°C)
Calabaza		
Calabaza amelonada	<i>Cucurbita moschata Duch.; C. maxima</i>	-0,8
Calabaza común (calabacín)	<i>Cucurbita pepo L.</i>	-0,5
Carambola, Starfruit	<i>Averrhoa carambola</i>	-1,2
Cebollas	<i>Allium cepa</i>	
Bulbos maduros, secos		-0,8
Cebollas verdes		-0,9
Cereza, ácida	<i>Prunus cerasus</i>	-1,7
Cereza, dulce	<i>Prunus avium</i>	-2,1
Cereza de Barbados	<i>Malpighia glabra</i>	-1,4
Champiñón	<i>Agaricus, otros géneros</i>	-0,9
Chicoria	Ver Endibia	
Chiles	Ver Pimiento	
Chirimoya	<i>Annona cherimola</i>	-2,2
Ciruelas	<i>Prunus × domestica L.</i>	-0,8
Cítricos		
Calamodín	<i>Citrus reticulata × Fortunella ssp.</i>	-2,0
California & Arizona, (EE.UU.) zonas secas		-1,1
Florida (EE.UU.), zonas húmedas		-1,1
Limón	<i>Citrus limon</i>	-1,4
Lima	<i>Citrus aurantifolia;</i>	-1,6
Mandarina	<i>Citrus reticulate Blanco.</i>	-1,1
Naranja	<i>Citrus sinensis</i>	
California & Arizona (EE.UU.), zonas secas		-0,8
Florida (EE.UU.), zonas húmedas		-0,8
Naranja sangre		-0,8
Naranja agria	<i>Citrus aurantium L.</i>	-0,8
Pomelo	<i>Citrus grandis</i>	-1,6
Tangelo	<i>Citrus reticulata × paradisi</i>	-0,9
Col de Bruselas –sprouts	<i>Brassica oleracea L. var. gemmifera</i>	-0,8
Coles		
China; Napa	<i>Brassica campestris var. pekinensis</i>	-0,9
Chirivías	<i>Pastinaca sativa</i>	-0,9
Común, temprana	<i>Brassica oleracea var. capitata</i>	-0,9
Tardía	—”—	-0,9
Coco	<i>Cocos nucifera</i>	-0,9
Coliflor	<i>Brassica oleracea var. botrytis</i>	-0,8
Colocasia, ñame de Canarias	<i>Colocasia esculenta L.</i>	-0,9
Col rábano	<i>Brassica oleracea L. var. gongylodes</i>	-1,0

NOMBRE COMUN	NOMBRE CIENTIFICO	TEMPERATURA (°C)
Dátil	<i>Phoenix dactylifera</i>	-15,7
Endibia		-0,1
Endibia, Escarola	<i>Cichorium endivia</i>	-0,1
Eneldo	<i>Anethum graveolens</i>	-0,7
Espárrago, verde, blanco	<i>Asparagus officinalis</i>	-0,6
Espinaca	<i>Spinacia oleracea</i>	-0,3
Gombo	<i>Abelmoschus esculentus</i>	-1,8
Granada	<i>Punica granatum L.</i>	-3,0
Grosella	<i>Ribes ssp.</i>	-1,0
Grosella	<i>Ribes grossularia Wall.</i>	-1,1
Guisantes (pod, snow, snap, sugar)	<i>Pisum sativum</i>	-0,6
Higo	<i>Ficus carica L.</i>	-2,4
Hinojo	<i>Foeniculum vulgare</i>	-1,1
Hojas verdes		
Estación cálida	Varios géneros	-0,6
Estación fría	Varios géneros	-0,6
Jinjolero, azufaifo	<i>Ziziphus jujuba</i>	-1,6
Jobo	<i>Spondias mombin L.</i>	
Judía de Lima	<i>Phaseolus lunatus</i>	-0,6
Judías verdes		
Snap; Wax; Green	<i>Phaseolus vulgaris</i>	-0,7
Kiwano (pepino cornudo)	ver melón africano horned	
Kiwi	<i>Actinidia chinensis Planch.</i>	-0,9
Lechuga	<i>Lactuca sativa L.</i>	-0,2
Longan	<i>Dimocarpus longan</i>	-2,4
Maíz, dulce y baby	<i>Zea mays L.</i>	-0,6
Mango	<i>Mangifera indica L.</i>	-1,4
Manzana	<i>Malus pumila</i>	-1,5
Melocotonero (Durazno)	<i>Prunus persica</i>	-0,9
Melones		
Cantaloup	<i>Cucurbita melo var. reticulatus</i>	-1,2
Casaba	<i>Cucurbita melo</i>	-1,0
Crenshaw	<i>Cucurbita melo</i>	-1,1
Honeydew	<i>Cucurbita melo</i>	-1,1
Persian	<i>Cucurbita melo</i>	-0,8
Nabo (raíz)	<i>Brassica campestris var. rapifera</i>	-1,0
Nashi	ver pera asiática	
Nectarina	<i>Prunus persica</i>	-0,9
Níspero	<i>Eriobotrya japonica (Thumb.) Lindl.</i>	-1,9
Papaya	<i>Carica papaya</i>	-0,9

NOMBRE COMUN	NOMBRE CIENTIFICO	TEMPERATURA (°C)
Patata,	<i>Solanum tuberosum</i>	
temprana		-0,8
tardía		-0,8
Pepino	<i>Cucumis sativus</i>	-0,5
Pera, Europea	<i>Pyrus communis</i>	-1,7
Pera Asiática, Nashi	<i>Pyrus serotina</i> ; <i>P. Pyrifolia</i>	-1,6
Perejil	<i>Petroselinum crispum</i>	-1,1
Pimientos		
Pimiento común	<i>Capsicum annum L.</i>	-0,7
Chile	<i>Capsicum annum</i> y <i>C. frutescens L.</i>	-0,7
Piña	<i>Ananas comosus (Stickm.) Merr.</i>	-1,1
Puerro	<i>Allium porrum L.</i>	-0,7
Quince	<i>Cydonia oblonga</i>	-2,0
Rábano (Rabanito)	<i>Raphanus sativus L.</i>	-0,7
Rábano silvestre	<i>Armoracia rusticana Gaertn;</i> <i>Mey. Et Schreb.</i>	-1,8
Rapóntico	<i>Rheum rhaponticum L.</i>	-0,9
Remolacha, bunched	<i>Beta vulgaris</i>	-0,4
Remolacha, topped		-0,9
Rutabaga	<i>Brassica napus var. napobrassica</i>	-1,1
Sandía	<i>Citrullus vulgaris</i>	-0,4
Sapotes		
Añón canadiense, chapote, sapote, matazano	<i>Casimiroa edulis La Llave et Lex.</i>	-2,0
Caimito, Camimito	<i>Chrysophyllum cainito L.</i>	-1,2
Canistel, eggfruit	<i>Pouteria campechiana</i>	-1,8
Ébano agrio	<i>Diospyros ebenaster Retz.</i>	-2,3
Tamarindo	<i>Tamarindus indica L.</i>	-3,7
Tomate	<i>Lycopersicon esculentum</i>	
Maduro firme		-0,5
Verde maduro		-0,5
Uva	<i>Vitis vinifera L.</i>	
	fruto	-2,7
	tallo	-2,0
Uva Silvestre	<i>Vitis labrusca L.</i>	-1,4
Zanahorias, topped	<i>Daucus carota</i>	-1,4

FUENTE: A partir de Whiteman, 1957, tal como presenta la University of California, Davis, página web de Post-cosecha: http://postharvest.ucdavis.edu/Produce/Storage/prop_a.shtml.

NOTAS: Algunas denominaciones taxonómicas pueden haber cambiado desde 1957.

Durante eventos de heladas rigurosas sin nieve, las hojas jóvenes de los pastos y las plántulas de los cereales de invierno pueden dañarse, pero es posible la recuperación si el nudo de ahijamiento no se ve afectado. Sin embargo, si se daña el meristemo, se producirá la muerte invernal. Al principio y al final del invierno y al principio de la primavera, las plantas pueden ser menos resistentes, lo cual favorece el daño. La retención de la nieve reduce este tipo de daño (Ventskevich, 1958). Más adelante, durante la floración y el crecimiento inicial del grano de los cereales, el daño por helada reduce el número de granos por espiga. El resultado visual es la formación de unas bandas más delgadas y descoloridas en las espigas por cada evento de helada, las aristas se rizan, y cómo el peso del grano es menor, las espigas se mantienen verticales cerca de la madurez (Figura 4.2).

Para los cereales, la resistencia relativa a la congelación es (desde el más resistente): Centeno > Trigo blando > Triticale > Cebada > Avena y Trigo duro. Durante el invierno, las temperaturas críticas cambian con relación al grado de endurecimiento. Sin embargo, cuando el endurecimiento se completa, no se produce destrucción de las plantas con temperaturas que oscilan entre -40 y -45 °C para el centeno, hasta por encima de los -10 °C para el trigo duro (Lecomte, 1989).

FIGURA 4.2

Daño por helada en cultivo de trigo



El tercio superior de la espiga se adelgaza y las aristas están rizadas (izquierda); y más tarde las espigas permanecen verticales ya que el peso del grano es pequeño (derecha).



Fotos: J P de Melo-Abreu (ISA)

TABLA 4.5

Intervalo de temperaturas críticas (°C) que dañan a los cultivos forrajeros y a los cultivos para ensilar

CULTIVO	GERMINACION	FLORACION	FRUCTIFICACION
Trigo de primavera	-9; -10	-1; -2	-2; -4
Avenas	-8; -9	-1; -2	-2; -4
Cebada	-7; -8	-1; -2	-2; -4
Guisantes	-7; -8	-2; -3	-3; -4
Lentejas	-7; -8	-2; -3	-2; -4
Almorta	-7; -8	-2; -3	-2; -4
Cilantro (Coriander)	-8; -10	-2; -3	-3; -4
Amapolas	-7; -10	-2; -3	-2; -3
Diente de león	-8; -10	-3; -4	-3; -4
Altramuz	-6; -8	-3; -4	-3; -4
Veza de primavera	-6; -7	-3; -4	-2; -4
Judías	-5; -6	-2; -3	-3; -4
Girasol	-5; -6	-2; -3	-2; -3
Cártamo	-4; -6	-2; -3	-3; -4
Mostaza blanca	-4; -6	-2; -3	-3; -4
Lino	-5; -7	-2; -3	-2; -4
Cáñamo	-5; -7	-2; -3	-2; -4
Remolacha azucarera	-6; -7	-2; -3	-
Remolacha pienso	-6; -7	-	-
Zanahoria	-6; -7	-	-
Nabo	-6; -7	-	-
Col	-5; -7	-2; -3	-6; -9
Soja	-3; -4	-2; -3	-2; -3
Mijo de Italia	-3; -4	-1; -2	-2; -3
Altramuz amarillo	-4; -5	-2; -3	-
Maíz	-2; -3	-1; -2	-2; -3
Mijo	-2; -3	-1; -2	-2; -3
Pasto del Sudan	-2; -3	-1; -2	-2; -3
Sorgo	-2; -3	-1; -2	-2; -3
Patatas	-2; -3	-1; -2	-1; -2
Tabaco rústico	-2; -3	-	-2; -3
Trigo sarraceno	-1; -2	-1; -2	-0,5; -2
Castor (higuerillo)	-1; -1,5	-0,5; -1	-2
Algodón	-1; -2	-1; -2	-2; -3
Melón	-0,5; -1	-0,5; -1	-1
Arroz	-0,5; -1	-0,5; -1	-0,5; -1
Sésamo	-0,5; -1	-0,5; -1	-
Kenaf	-0,5; -1	-	-
Cacahuete	-0,5; -1	-	-
Pepino	-0,5; -1	-	-
Tomate	0; -1	0; -1	0; -1
Tabaco	0; -1	0; -1	0; -1

FUENTE: After Ventskevich, 1958.

La congelación puede dañar algunos cultivos incluyendo los cultivos forrajeros anuales y cultivos para ensilar, que pierden hoja y en consecuencia producen menos materia seca. La Tabla 4.5 muestra las temperaturas críticas para muchos cultivos relacionados con los estadios fenológicos.

CULTIVOS PERENNES

Los límites de la distribución natural de muchas plantas, incluidos algunos árboles frutales, están relacionadas con la temperatura mínima a la cual se produce la supercongelación (i.e. punto de nucleación homogéneo), que es próximo a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por debajo del punto de nucleación homogéneo, el congelamiento es intracelular y letal (Burke *et al.*, 1976; Weiser *et al.*, 1979; Ikeda, 1982).

LOS ÁRBOLES FRUTALES

Generalmente, la sensibilidad de los cultivos de hoja caduca a la congelación aumenta desde la primera floración hasta el estadio de fruto pequeño, y es cuando el cultivo es más probable que sufra daños. La sensibilidad también es más alta cuando una meteorología cálida ha precedido una noche helada que si temperaturas frías han precedido a la helada. Se sabe que las plantas resisten a la congelación cuando se han expuesto a temperaturas frías durante largos periodos y este endurecimiento es menor si la exposición es a temperaturas cálidas. Considerable información sobre la sensibilidad de los frutales de hojas caduca en relación con sus estadios fenológicos están disponibles en la página web de la Washington State University – Prosser Research and Extension Centre (<http://fruit.prosser.wsu.edu/frstTablas.htm>) y en la página web de la Michigan State University – Van Buren County Cooperative Extension (<http://www.msue.msu.edu/vanburen/crittemp.htm>). En ambas páginas web, se proporcionan fotografías que muestran los estadios fenológicos para una variedad de cultivos. Rodrigo (2000) presenta otra revisión sobre resistencia y daño por helada en primavera.

Aunque es menos común que el daño en primavera, los daños por helada en invierno normalmente afectan a los frutales de hoja caduca. En las áreas de producción del Norte, cuando los inviernos son muy rigurosos, se puede congelar la corteza, el tejido leñoso o las yemas. Los daños a la corteza incluyen:

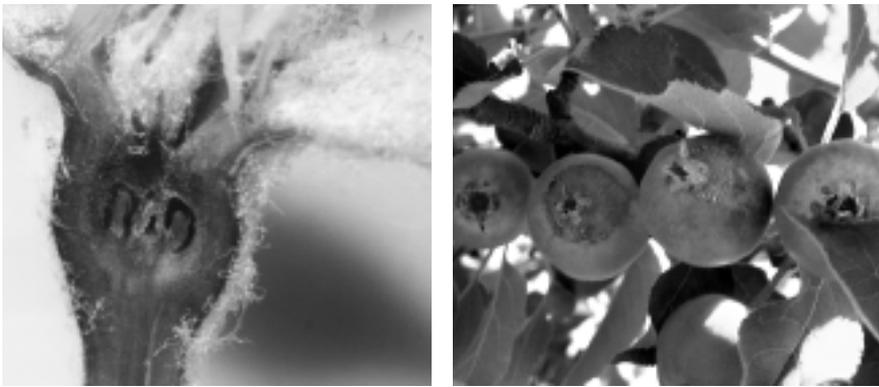
- Daños en el área de la horquilla, que se produce en árboles con ángulos de la horquilla estrechos que endurecen más tarde o a veces de forma incompleta;
- Daños “sunscald” en días de invierno soleados, y fríos, cuando las nubes bloquean al Sol y causan un rápido enfriamiento de la temperatura del aire que puede producir congelación;

- Separación de la corteza, que puede ocurrir en condiciones muy frías; y
- Daños en tronco, el cuello y las raíces que ocurre cuando el efecto de protección del suelo es insuficiente para evitar la congelación de estas partes de la planta (Myers, 1988).

Bajo temperaturas invernales extremas, o cuando los árboles fallan en el endurecimiento, se dañan los tejidos leñosos de las ramas (secado de las puntas) o los troncos se congelan (corazón ennegrecido). En el corazón ennegrecido, las células del xilema se mueren, la madera se oxida, volviéndose oscura y decolorada y los vasos se llenan de oclusiones gomosas. El corazón ennegrecido normalmente no mata los árboles inmediatamente, pero organismos que pudren la madera invaden los árboles dañados reduciendo la productividad y la longevidad. Las yemas durmientes en invierno a menudo se superenfrian a temperaturas muy bajas (e.g. $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ en yemas de melocotonero en invierno y $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las yemas de las azaleas). La muerte invernal de yemas y tejidos de la corteza ocurre normalmente en plantas que han perdido parcialmente el endurecimiento debido a periodos relativamente cálidos. Durante la primavera, la capacidad de superenfriamiento se reduce conforme las yemas se expanden y forman flores. Las flores completamente abiertas normalmente tienen temperaturas críticas entre $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Burke *et al.*, 1976).

FIGURA 4.3

Daño por helada en (A) una flor de manzano; y (B) en frutos pequeños [manchas rojiza cerca de los ojos y anillos] (Ribeiro, 2003)



Fotos: A. Castro Ribeiro (ESAB, IPB, Portugal)

Las flores se dañan normalmente por las heladas de primavera y los síntomas son un oscurecimiento de los pétalos. Normalmente el estilo de las flores es más sensible que el ovario al daño por helada. Después de la fertilización, las semillas son los órganos más sensibles. Unos días después de una helada, la proporción de flores dañadas es obvia. Cuando se cortan con un cuchillo, las flores sanas presentan un color verde claro en el interior mientras que las flores dañadas están marronosas (Figura 4.3A).

Las semillas son imprescindibles para el desarrollo normal de la mayoría de frutos, pero algunas variedades de peras y de manzanas dañadas son capaces de mantener un desarrollo partenocárpico para producir frutos deformes. Los frutos de hueso son más susceptibles a la pérdida de las semillas ya que sólo tienen una o dos, mientras que las manzanas y las peras, al tener más semillas, son menos susceptibles.

Cuando el fruto experimenta daño por congelación, crece un tejido rojizo y áspero que cubre una parte o incluso toda parte externa del fruto. A pesar de que el daño puede originarse mucho antes, aparecen anillos rojizos después de la plena floración, (Figura 4.3B).

En la Tabla 4.6 se indican las temperaturas críticas para variedades de almendro, donde algunos datos provienen de observaciones de campo utilizando temperaturas de garitas estándar y otros proceden de estudios con cámaras climáticas utilizando ramas escindidas. En la Tabla, los datos de plena floración para el cv. Peerless son un poco diferentes entre los estudios de campo y de cámara, lo que ilustra el problema cuando se comparan los estudios en cámaras con las observaciones de campo. De acuerdo con los datos de Hansen en plena floración, a $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ se esperaría un daño del 25%, mientras que solo se observó un daño del 1% a $-2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los estudios en cámara. En general, para el mismo nivel de daño, las temperaturas de los estudios con cámara tienden a ser más bajas que las de los estudios de campo. Por ello, las temperaturas críticas que provocan daño en el campo es probable que sean más altas y al utilizar las temperaturas críticas de los estudios con cámara se podrían producir daños. Si las temperaturas de las yemas, de las flores y de los pequeños frutos se miden directamente en el campo en lugar de utilizar temperaturas protegidas, entonces las temperaturas críticas deberían estar más cercanas aquellas observadas en estudios con cámaras. Sin embargo, medir las temperaturas de las yemas, de las flores y de los frutos no es fácil. La idea principal es que las temperaturas críticas publicadas no deberían considerarse como absolutamente correctas, sino únicamente como una directriz para la toma de decisiones sobre cuándo poner en marcha o detener los métodos activos de protección.

TABLA 4.6

Daño esperable (%) para algunas variedades de almendro a distintos estadios de desarrollo después de 30 minutos por debajo de la temperatura indicada

VARIEDAD	ESTADIO	TEMPERATURA °C							
		-5,6	-5,0	-4,4	-3,9	-3,3	-2,8	-2,2	-1,7
Peerless	[F] plena floración				100	75	45	25	
	Color rosa visible		100	75	50	25			
Peerless	[C] plena floración				79	50	14	1	
	Caída de pétalos						63	14	3
	Crecimiento del fruto						46	45	9
NePlus Ultra	[F] Plena floración			100	75	50	25		
Mission	[F] Color rosa visible	100	80	60					
Drake	[F] Plena floración		100	75	50	25			
	Color rosa visible	75	50	25					
Nonpareil	[F] Plena floración	75	60	40	20				
	Color rosa visible	20	10						
Nonpareil	[C] Crecimiento del fruto						19	14	3
Butte	[C] Crecimiento del fruto					90	45	27	10

NOTAS: [C] indica ensayos con ramas cortadas en una cámara de congelación (Connell y Snyder, 1988). [F] indica resultados de varios años de observaciones de campo no publicadas por Harry Hansen (retirado del Servicio Meteorológico Nacional de los EE.UU.) utilizando temperaturas de una garita Stevenson y de una pantalla en frutales.

La Tabla 4.7 contiene un listado de temperaturas críticas para árboles frutales de hoja caduca ampliamente utilizados correspondientes a los principales estadios fenológicos (Proebsting y Mills, 1978). A pesar de que estas temperaturas críticas se han desarrollado en estudios con cámaras, en parte suponen una guía como temperaturas críticas para ser utilizadas en el campo. Para tener en cuenta la diferencia entre las temperaturas críticas de campo y las medidas en cámaras, los valores de T_c para ser utilizados en el campo deberían ser ligeramente más altos que los listados en la Tabla.

Uva de mesa y uva de vinificación

Las uvas de mesa y las uvas para vino son dañadas con frecuencia por las heladas primaverales. Las hojas son más propensas a sufrir daño ya que son los primeros órganos en formarse, pero las flores y las pequeñas bayas a veces también son dañadas. En el caso de hojas dañadas es normal que se de una recuperación total, pero el daño de los frutos puede reducir la producción. La ocurrencia de heladas

TABLA 4.7

Valores de temperatura crítica (T_c ; °C) para algunos frutales de hoja caduca

CULTIVO	ESTADIO	10% MORTANDAD	90% MORTANDAD
Albaricoquero	Yema hinchada	-4,3	-14,1
	Cáliz rojo	-6,2	-13,8
	Ápice blanco de la corola visible	-4,9	-10,3
	Primera flor	-4,3	-10,1
	Plena floración	-2,9	-6,4
	Caída de los pétalos	-2,6	-4,7
	Fruto tierno	-2,3	-3,3
	Yema hinchada	-11,1	-17,2
	Botones visibles	-5,8	-13,4
Cerezo (Bing)	Yema con la punta color verde	-3,7	-10,3
	Botones todavía reunidos	-3,1	-7,9
	Los botones se separan	-2,7	-6,2
	Ápice blanco de la corola visible	-2,7	-4,9
	Primera flor	-2,8	-4,1
	Plena floración	-2,4	-3,9
	Caída de los pétalos	-2,2	-3,6
Ciruelo (Italiano)	Yema hinchada	-11,1	-17,2
	Yema hinchada (color blanquecino en la punta)	-8,9	-16,9
	Botones visibles (Las escamas se separan y se ven los botones de color verde)	-8,1	-14,8
	Botones florales todavía reunidos	-5,4	-11,7
	Los botones se separan (Ápice blanco de la corola visible)	-4,0	-7,9
	Primera flor	-4,3	-8,2
	Plena floración	-3,1	-6,0
	Caída de los pétalos	-2,6	-4,3
Manzano	Comienza a hincharse la yema	-11,9	-17,6
	Yema hinchada	-7,5	-15,7
	Aparición de botones florales (sin hojas desarrolladas)	-5,6	-11,7
	Aparición de botones florales (con hojas desarrolladas)	-3,9	-7,9

CULTIVO	ESTADIO	10% MORTANDAD	90% MORTANDAD
Manzano	Los sépalos dejan ver los primeros pétalos	-2,8	-5,9
	Los sépalos dejan ver todos los pétalos	-2,7	-4,6
	Primera flor	-2,3	-3,9
	Plena floración	-2,9	-4,7
	Caída de pétalos	-1,9	-3,0
Melocotonero (Elberta)	Yema hinchada	-7,4	-17,9
	Cáliz verde	-6,1	-15,7
	Cáliz rojo	-4,8	-14,2
	Corola rosa en el ápice de la yema	-4,1	-9,2
	Primera flor	-3,3	-5,9
	Floración tardía	-2,7	-4,9
	Caída de los pétalos	-2,5	-3,9
Peral (Bartlett)	Las yemas empiezan hincharse (Las escamas se separan)	-8,6	-17,7
	Yemas florales expuestas	-7,3	-15,4
	Aparición de botones florales todavía reunidos	-5,1	-12,6
	Los sépalos dejan ver los primeros pétalos	-4,3	-9,4
	Los sépalos dejan ver todos los pétalos	-3,1	-6,4
	Primera flor	-3,2	-6,9
	Plena floración	-2,7	-4,9
	Post floración	-2,7	-4,0

El 10% de mortandad y el 90% de mortandad implican que 30 minutos a la temperatura indicada se espera que provoque la muerte de un 10% y un 90% de la parte de planta afectada durante el estadio fenológico indicado.

FUENTE: Proebsting y Mills, 1978.

a principios de otoño aumenta la susceptibilidad a los ataques de hongos (e.g. podredumbre gris (*botrytis* sp). Durante el invierno, las yemas que están en estadio de reposo son dañadas en muy pocas ocasiones, ya que pueden resistir temperaturas por debajo de los -10 °C, hasta -20 o incluso -30 °C (Leddett y Dereuddre, 1989). La Tabla 4.8 muestra las temperaturas críticas en relación con el estadio de desarrollo.

TABLA 4.8

Valores (°C) de temperatura crítica (T_c) para la vid			
Vid ⁽¹⁾	Nuevo crecimiento:		-1,1
	Viña leñosa:	-20,6	-
	Híbridos Franceses	-22,2	-23,3
	Americanos		-27,8
		10% mortandad	90% mortandad
Vid (cv. Concord) ⁽²⁾	Yema hinchada (yema de algodón)	-10,6	-19,4
	Punta verde	-6,1	-12,2
	Inicio de la salida de hojas	-3,9	-8,9
	Primera hoja	-2,8	-6,1
	Segunda hoja	-2,2	-5,6
	Tercera hoja	-2,2	-3,3
	Cuarta hoja	-2,2	-2,8

El 10% de mortandad y el 90% de mortandad implican que 30 minutos a la temperatura indicada se espera que provoque un 10% y un 90% de la parte de planta afectada durante el estadio fenológico indicado.

NOTAS: (1) Krewer, 1988. La temperatura crítica se indicó sin dar el porcentaje de mortandad.

(2) www.msue.msu.edu/vanburen/crtmptxt.htm.

OTROS PEQUEÑOS FRUTOS

Las zarzamoras y los arándanos son resistentes en invierno, por ello el daño por heladas ocurre casi exclusivamente a las flores y a los frutos pequeños durante la época de primavera. En cambio, si no se implementan medidas protectoras, las fresas y los kiwis sufren daños en los inviernos fríos. La primera floración es críticamente importante en la producción de fresas, y por ello el daño por heladas durante esta fase es grave. Cuando es joven, el cambium del kiwi es a menudo dañado por las temperaturas relativamente altas en otoño y en primavera, así como por las heladas durante el invierno. Las primeras hojas expandidas son tiernas y en consecuencia, sensibles al daño. Las temperaturas críticas de algunos cultivos de pequeños frutos se muestran en la Tabla 4.9.

LOS FRUTOS DE LOS CÍTRICOS

La mayoría de cítricos no tienen una dormancia bien marcada y estable. El crecimiento sólo se reduce en invierno y un intervalo de 1 a 2 °C en el punto de congelación de los frutos es normal entre plantaciones frutales y variedades, e incluso entre árboles. Conforme la temperatura del aire cae durante la noche, la temperatura del fruto normalmente cae a continuación pero con un cierto retraso y normalmente está unos pocos grados celsius más alta que la temperatura del aire, especialmente durante el anochecer. Contra más grande es el fruto, más

TABLA 4.9

Valores de temperatura crítica (T_c) (°C) para algunos pequeños frutos

CULTIVO	ESTADIO FENOLOGICO	% MORTANDAD	
		90%	
Arándano ⁽²⁾	Yemas de flores hinchadas	-6,1	
	Flores individuales distinguible	-3,9	
	Flores claramente separadas, corolas expandidas pero cerradas	-2,2	
	Hojas completamente abiertas	-0,6	
		90%	
Fresa ⁽²⁾	Yema cerrada	-5,6	
	Pétalos blancos cerrados	-2,2	
	Plena floración	-0,6	
	Fruto inmaduro	-2,2	
		% desconocido	
Kiwi ⁽³⁾	Yemas de flores durmientes	-18,0	
	Ápice verde	-3,0	
	Nervios de las hojas visibles	-2,0	
	Hoja expandida	-1,5	
	Flores individuales distinguible	-1,0	
		% desconocido	
Zarzamora ⁽¹⁾	Yemas de flores durmientes	-73,0	
	Yemas de flores abiertas	-2,2	
		% desconocido	
Zarzamora ⁽¹⁾	Yemas de flores durmientes	-27,2	-28,9
	Yemas de flores abiertas		-2,2

El 10% de mortandad y el 90% de mortandad implican que 30 minutos a la temperatura indicada se espera que provoque un 10% y un 90% de la parte de planta afectada durante el estadio fenológico indicado.

FUENTES: (1) Krewer, 1988. La temperatura crítica se presentó sin dar el porcentaje de mortandad.

(2) Powel y Himelrick, 2000. (3) Vaysse y Jourdain, 1992.

grande es la diferencia entre la temperatura del fruto y la del aire. El superenfriamiento también juega un papel en la temperatura de congelación y explica la importancia de la concentración de núcleos de congelación y la helada blanca o la formación del rocío en la superficie del fruto. También se sabe que la piel tiene una temperatura de congelación más baja que la pulpa del interior. En consecuencia, el daño por helada puede ocurrir en el interior del fruto sin un daño aparente en el exterior. A pesar de todos estos factores que producen confusión, en la Tabla 4.10 se presentan algunas temperaturas críticas de frutos para los cítricos más importantes.

Cuando la temperatura del aire (T_a) cae rápidamente después de un día cálido, las temperaturas de los frutos de los cítricos (T_{cf}) caen a continuación con un

TABLA 4.10

Temperaturas críticas de fruto (T_c) cuando los frutos de los cítricos, las yemas o las flores empiezan a congelar

ESPECIES DE CITRICOS	TEMPERATURA CRITICA (°C)
Naranjas verdes	-1,9 a -1,4
Naranjas, toronjas y mandarinas medio maduras	-2,2 a -1,7
Naranjas, toronjas y mandarinas maduras	-2,8 a -2,2
Limonos	-1,4 a -0,8
Limonos maduros	-1,4 a -0,8
Limonos verdes (diámetro >12 mm)	-1,9 a -1,4
Yemas y flores de limoneros	-2,8

FUENTE: Puffer and Turrell, 1967.

cierto retraso respecto a la disminución de la temperatura del aire, siendo la diferencia de temperatura ($T_{cf} - T_a$) más grande para los frutos más grandes. Cuando se protegen los frutos pequeños y hay una caída rápida de la temperatura del aire después de la puesta de Sol, los ventiladores y las estufas deberían funcionar cuando T_a alcanza T_c (Tabla 4.10). Para los frutos más grandes, en las noches con una caída rápida de la temperatura del aire durante el anochecer, hay que poner en marcha los ventiladores o las estufas cuando T_a es ligeramente más baja que T_c (e.g. cuando $T_a = T_c - 0,5$ °C). Durante las heladas de advección poco severas o en las noches con humedad más alta y una caída de temperatura más baja, T_{cf} está más cerca de T_a , por ello los ventiladores o las estufas deberían funcionar cuando $T_a \approx T_c$ (Tabla 4.10). Si los frutos y las hojas están húmedos por la lluvia, la niebla o el rocío y se espera que la temperatura del bulbo húmedo (T_w) caiga por debajo de T_c durante la noche, los ventiladores y las estufas deberían ponerse en marcha tan pronto como sea posible al anochecer para secar las superficies de los frutos antes de que la temperatura del fruto húmedo caiga por debajo de T_c . De lo contrario, es probable que se dañe la piel.

En las condiciones meteorológicas en las que se espera que la temperatura del aire alcance la temperatura del punto de rocío (T_d), que es más alta que T_c y la temperatura mínima prevista está por debajo de T_c , entonces es deseable poner en marcha los ventiladores o las estufas antes de que T_a caiga hasta T_d y el rocío o la escarcha empiece a condensarse sobre el fruto.

En las noches que siguen a una lluvia o nieve ligera o cuando el rocío o la escarcha se forman sobre el fruto, el daño puede ocurrir en la corteza del fruto

TABLA 4.11

Temperaturas del aire (°C) correspondientes a una temperatura del bulbo húmedo $T_w = 0\text{ °C}$ para un intervalo de temperaturas del punto de rocío y elevaciones

TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO (°C)	ELEVACION (METROS POR ENCIMA DEL NIVEL MEDIO DEL MAR)			
	0 m	500 m	1 000 m	1 500 m
0	0,0	0,0	0,0	0,0
-2	1,2	1,3	1,4	1,5
-4	2,3	2,5	2,6	2,8
-6	3,3	3,5	3,7	3,9
-8	4,1	4,4	4,6	4,9
-10	4,8	5,1	5,4	5,8
-12	5,4	5,8	6,1	6,5
-14	6,0	6,3	6,7	7,1
-16	6,4	6,8	7,2	7,7
-18	6,8	7,2	7,7	8,1

incluso cuando la temperatura protegida está por encima de la temperatura crítica de daño del fruto. Esto ocurre porque la temperatura de la parte húmeda del fruto puede caer hasta la temperatura del bulbo húmedo, debido a la eliminación del calor sensible conforme el agua se evapora. Esta es la causa del daño en zonas de la corteza que ocurre algunos años. Esto también es cierto para los daños por mancha en frutos durante las heladas de otoño. La temperatura del bulbo húmedo siempre está entre la temperatura del aire y la del punto de rocío y la temperatura del bulbo húmedo es más baja cuando el punto de rocío también lo está. Si al entrar la noche el fruto estuviera húmedo, la protección debería iniciarse tan pronto como sea posible. En estas condiciones, el objetivo es evaporar el agua del fruto antes de que la temperatura del bulbo húmedo alcance los 0 °C . Para ayudar a evaporar el agua de las plantas se pueden utilizar las estufas o los ventiladores antes de la caída de la noche. Sin embargo, si se utilizan ventiladores cuando el fruto está húmedo después de que la temperatura del bulbo húmedo haya caído por debajo de la temperatura crítica de daño en fruto podría causar más daño a la corteza. La Tabla 4.11 da la temperatura de aire correspondiente a la temperatura del bulbo húmedo $T_w = 0\text{ °C}$ para un intervalo de temperaturas del punto de rocío y para distintas elevaciones.

LA PREDICCIÓN DE LAS HELADAS Y SU SEGUIMIENTO

EL VALOR DE LA PREDICCIÓN DE LAS HELADAS

Evaluar el valor de la predicción de las heladas implica análisis complejos de toma de decisiones, que utilizan la economía y las probabilidades condicionales. La predicción precisa de heladas puede potencialmente reducir el daño por heladas, ya que proporciona una oportunidad a los agricultores de prepararse contra ellas. En este capítulo se presenta y se discute el valor de la predicción de heladas, algunos modelos actualmente utilizados para predecirlas, y un modelo sencillo para la predicción de la temperatura mínima durante una helada de radiación al nivel de explotación agrícola.

Mientras que el análisis de decisiones se utiliza en muchas disciplinas, su aplicación a la predicción de las heladas es escasa. Artículos de Banquet, Halter y Conklin (1976) y Katz, Murphy y Winkler (1982) tratan sobre el uso del análisis de decisiones para evaluar la relación coste efectividad de la predicción de heladas. Katz, Murphy y Winkler (1982) investigaron con detalle el valor de la predicción de las heladas en el valle Yakima en el estado de Washington, EE.UU. Este valle es bien conocido por la producción de manzanas y, en menor medida, de peras y de melocotones. El valle es también notorio por un problema de heladas frecuentes durante los estadios de apertura de yemas, floración y fruto pequeño de estos cultivos. Los autores han utilizado los procesos de toma de decisiones de Markov en un modelo que estructura el problema en la identificación de posibles acciones, eventos y consecuencias. La sensibilidad de los cultivos al enfriamiento cambia durante la apertura de yemas, la floración y el estadio de fruto pequeño, y por ello se han derivado funciones logísticas que relacionan las pérdidas del cultivo con la temperatura mínima para cada periodo de desarrollo donde la relación entre daño y temperatura era conocida. Estos autores evaluaron la utilidad de tres métodos de predicción de heladas. El primero, calculando la desviación típica condicional para realizar la predicción utilizando únicamente datos climáticos. El segundo, se corresponde con las predicciones oficiales que efectúa el Servicio Meteorológico Nacional de los EE.UU. y el tercero, se corresponde con una predicción perfecta donde la predicción de la temperatura mínima siempre es correcta. La desviación típica es “condicional” ya que se basa en un nivel asumido de precisión de la predicción.

Basándose únicamente en datos climáticos, Katz, Murphy y Winkler (1982) estimaron que la desviación típica condicional de la predicción mínima sería de 3,6 °C. Por definición, la desviación típica es 0 °C para una predicción perfecta. Basándose en las habilidades de los que realizaban el pronóstico en los años 70, la desviación típica condicional de la predicción “oficial” fue de 2,1 °C. Por ello, la habilidad predictiva del Servicio Meteorológico Nacional mejoró la desviación típica condicional en un 48% [i.e. $0,48 \approx (3,6 - 2,1) / 3,6$] de la diferencia entre utilizar datos climáticos y una predicción perfecta. Los valores relativos (i.e. valor económico de la predicción dividida por el valor total de la producción), expresados en porcentajes, se muestran en la Tabla 5.1. El valor económico de la predicción es el valor neto adicional de producción que resulta de tenerla. La tabla muestra que aumentar las capacidades de la predicción oficial hasta el nivel de la predicción perfecta aumentaría los valores relativos en un 18%, 15% y 23% para manzanos, perales y melocotoneros. En consecuencia, excepto para melocotoneros, los beneficios económicos de futuras mejoras en la predicción son menores que las mejoras comparables del pasado.

TABLA 5.1

Valor relativo (% de la producción total) y valor total de la producción (\$ por hectárea) para manzanos cv. Red Delicious, perales cv. Bartlett y melocotoneros cv. Elberta en el Valle del río Yakima en el Estado de Washington (EE.UU.) utilizando las predicciones climatológicas de los años 70 del Servicio Meteorológico Nacional, y un pronóstico perfecto

PREDICCIÓN	MANZANOS	PERALES	MELOCOTONEROS
Perfecta	52	42	45
Oficial	34	27	22
Climatología	0	0	0
Valor Total	5 802 \$ ha ⁻¹	4 586 \$ ha ⁻¹	3 064 \$ ha ⁻¹

NOTAS: Las desviaciones típica condicionales de la temperatura mínima real fueron 3,6°C para la climatología, 2,1°C para las predicciones oficiales y 0°C para una predicción perfecta (según Katz, Murphy y Winkler, 1982).

PREDICCIÓN DE LAS TEMPERATURAS MÍNIMAS

Es importante poder predecir cuándo cae la temperatura hasta un valor crítico para poner en marcha los métodos activos de protección contra las heladas. Poner en marcha y detener la protección a la temperatura apropiada es importante ya que evita las pérdidas que resultan de poner en marcha demasiado tarde y ahorra energía al reducir el tiempo de funcionamiento de los distintos métodos. Aunque está fuera de los objetivos de esta publicación obtener la

predicción de la temperatura mínima con modelos sinópticos o de meso-escala, es posible obtener algunas directrices de cómo predecir la temperatura mínima durante las condiciones de una helada de radiación, utilizando datos locales.

Idealmente, se podría desarrollar un modelo de predicción de temperatura a microescala (i.e. local) utilizando los cálculos del balance de energía. Esto ha sido extensamente revisado por Kalma *et al.* (1992). La principal conclusión de su revisión es que “las temperaturas del aire no puede predecirse con satisfacción a partir únicamente del balance de energía en la superficie, incluso estableciendo con precisión las diferencias entre las temperaturas de la superficie y del aire”. Ésta incapacidad la atribuye a las dificultades en: (1) la medida del flujo de calor sensible turbulento en el intervalo típico de las noches de helada; (2) tener en cuenta la advección; y (3) las variaciones espaciales en la emisividad de la radiación desde la superficie. Más que utilizar el balance de energía para estudiar la tasa de enfriamiento de la superficie del suelo, Kalma *et al.* (1992) propusieron estimar la tasa de enfriamiento de una columna de aire. Sin embargo, reconocieron que tanto el flujo radiativo como el flujo del calor sensible turbulento dependen de los perfiles verticales del viento, la humedad y la temperatura, lo que hace que el proceso sea impracticable por los problemas de medida.

Kalma *et al.* (1992) discuten los modelos unidimensionales de predicción de la temperatura de Sutherland (1980) y Cellier (1982, 1993). El modelo de Sutherland utiliza la ecuación del balance de energía de superficie asumiendo que las contribuciones del calor latente son negligibles, un modelo de flujo de calor al suelo y un modelo de flujo de calor sensible para los 9,0 m inferiores de la atmósfera. Las variables que utiliza el modelo son la temperatura a 0; 1,5; 3,0 y 9,0 m, la temperatura del suelo a 0,1 y 0,5 m de profundidad, la velocidad del viento a 10 m y la radiación neta. Se ha descrito que este modelo predice dentro de los 3 °C un 90% del tiempo y dentro de los 2 °C un 82% del tiempo. Finalmente, el modelo se combinó con un modelo estadístico para mejorar la predicción en Florida, EE.UU.

El modelo de temperatura de Cellier (1982, 1993) calcula los cambios de temperatura dentro de ocho capas hasta una altura de unos 100 m en la atmósfera y por debajo de 1,0 m en el suelo. Las variables que utiliza el modelo incluyen la temperatura media del suelo y la velocidad del viento y la temperatura del aire a 3,0 m de altura en el momento en que la radiación neta se hace negativa, el valor más expectante de radiación neta negativa y la temperatura del punto de rocío cuando la radiación neta alcanza su valor más negativo. Se ha indicado que el modelo proporciona estimaciones realistas del balance de energía de superficie durante la noche, pero se necesitan mejoras en la estimación de la transferencia de calor en el suelo y en los coeficientes de intercambio atmosférico (Kalma *et al.*, 1992).

Para estimar los cambios de temperatura durante la ocurrencia de heladas es preferible un modelo de balance de energía determinístico; Sin embargo, actualmente no está disponible ningún modelo de aplicación universal con variables que sean de fácil obtención. Se han documentado (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978) numerosos modelos empíricos de predicción de la temperatura mínima y se sabe que algunos dan una predicción razonablemente precisa. Por ejemplo, la ecuación de Young (1920) ha sido utilizada extensamente por el Servicio Meteorológico Nacional (NWS) de los EE.UU. con un éxito considerable a lo largo de la zona oeste de los EE.UU. Sin embargo, la ecuación de Young no fue utilizada directamente sino que se calibró para las condiciones locales para tener en cuenta la época del año y las condiciones locales. Estas modificaciones son específicas del lugar y no están ampliamente publicadas. No se sabe si modificaciones similares se han utilizado para mejorar la multitud de fórmulas predictivas que se utilizan en distintos países (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978). Está claro que considerar la época del año y las condiciones locales mejoraría la predicción de la temperatura mínima. De hecho, Bagdonas, Georg y Gerber (1978) recomendaron que un modelo de predicción que utilice factores meteorológicos locales y datos climáticos específicos del lugar, es probable que proporcione los mejores resultados. Además de pronosticar la temperatura mínima, también es útil predecir la tendencia de la temperatura durante una noche de helada. Se utilizó un modelo basado en el artículo original de Allen (1957) para desarrollar el modelo de tendencia de temperatura de la helada (FTrend.xls) incluido con este libro. Krasovitski, Kimmel, y Amir (1996) presentaron otro modelo más complicado.

CALIBRACIÓN DE PRONÓSTICOS DE LA MESO-ESCALA A LA MICRO-ESCALA

Durante varias décadas, el servicio NWS proporcionó pronósticos de heladas a los agricultores en regiones de los EE.UU. con cultivos de alto valor sensibles a las heladas. Como el personal que realiza la predicción en el NWS tiene más experiencia en predicción y más y mejores facilidades, pueden proporcionar predicciones más precisas que las que un agricultor puede realizar con un día o dos de antelación a la helada. Sin embargo, a finales de los años 80, el servicio meteorológico dejó de realizar este servicio y los agricultores tuvieron que emplear servicios de predicción privados o desarrollar sus propios métodos para predecir las temperaturas mínimas para sus cultivos.

Cuando el servicio de heladas estaba en funcionamiento, los meteorólogos del Servicio meteorológico realizaban la predicción para estaciones clave dentro de una región y los agricultores tenían que desarrollar factores de corrección para

predecir las temperaturas mínimas en sus cultivos. Generalmente, las correcciones consistían en añadir o sustraer una corrección a la estación clave usada para la predicción. Por ejemplo, un agricultor podía sustraer 0,5 °C de una estación clave usada para la predicción para un cultivo localizado en una zona baja. En algunos casos, los agricultores tenían que utilizar hojas de cálculo o programa estadísticos de ordenador para determinar la ecuación de regresión con las temperaturas mínimas de la estación clave como variable independiente y las temperaturas mínimas en su cultivo como la variable dependiente.

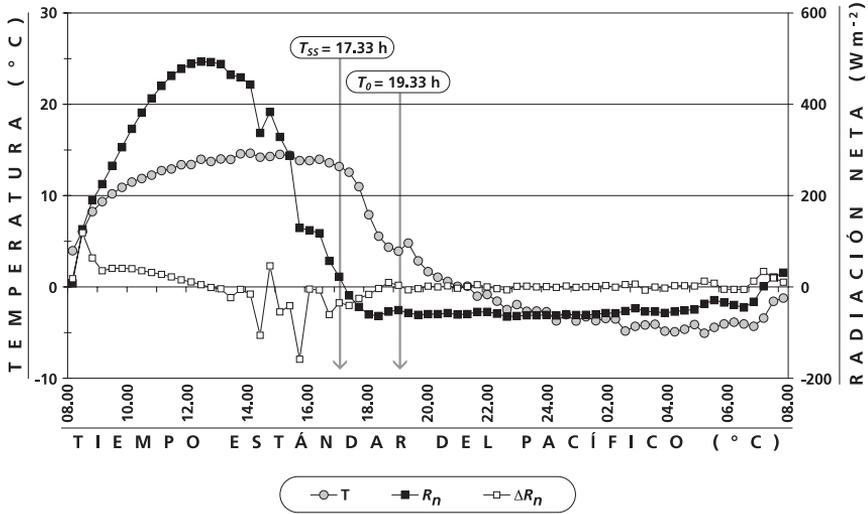
Una vez que el Servicio de predicción de heladas finalizó, los grandes agricultores y los que tenían importantes problemas con las heladas emplearon servicios de predicción privados para proporcionar las predicciones de temperatura mínima específicas para una determinada localidad. En muchos casos, agrupaciones de agricultores cooperaron y contrataron una persona privada para realizar la predicción para estaciones clave utilizadas por el NWS. Los factores de corrección todavía podían utilizarse para predecir las temperaturas mínimas en sus cultivos. Aunque el uso de los factores de corrección y de las estaciones clave para proporcionar un pronóstico de heladas específico para una determinada localidad es útil para una planificación y para su gestión durante dos o tres días, la utilización directa de datos recogidos en o cerca del cultivo es probable que proporcione mejor predicción durante una noche de helada en particular. En la siguiente sección se presenta un método para desarrollar predicciones locales.

UN MODELO SENCILLO DE PREDICCIÓN DE LA TEMPERATURA MÍNIMA

Con este libro se incluye un modelo empírico y sencillo de predicción, (FFST.xls), que puede calibrarse fácilmente para las condiciones locales. El modelo, que se basa en el método de Allen (1957), utiliza registros históricos de la temperatura del aire y del punto de rocío a las dos horas después de la puesta de Sol y la temperatura mínima observada durante las noches de heladas con el cielo despejado y en calma para desarrollar los coeficientes de regresión necesarios para predecir la temperatura mínima durante un periodo en particular del año. Dos horas después de la puesta de Sol es el tiempo de partida (t_0) para el modelo. Este tiempo corresponde al momento en que la radiación neta ha alcanzado el valor más negativo (Figura 5.1). Si se asume que durante la noche la cobertura por nubes o por niebla es pequeña o nula, la radiación neta cambia poco desde el momento t_0 hasta la salida del Sol la mañana siguiente. En una noche con cobertura intermitente por nubes o por niebla o con una velocidad del viento variable, el modelo puede predecir una temperatura que es

FIGURA 5.1

Temperatura del aire a 2,0 m de altura, radiación neta y cambio de la radiación neta utilizando datos a intervalos de 20 minutos registrados durante una noche de helada (28 de febrero a 1 de marzo de 2002) en una plantación de nogales cerca de Ladoga, California (EE.UU.)



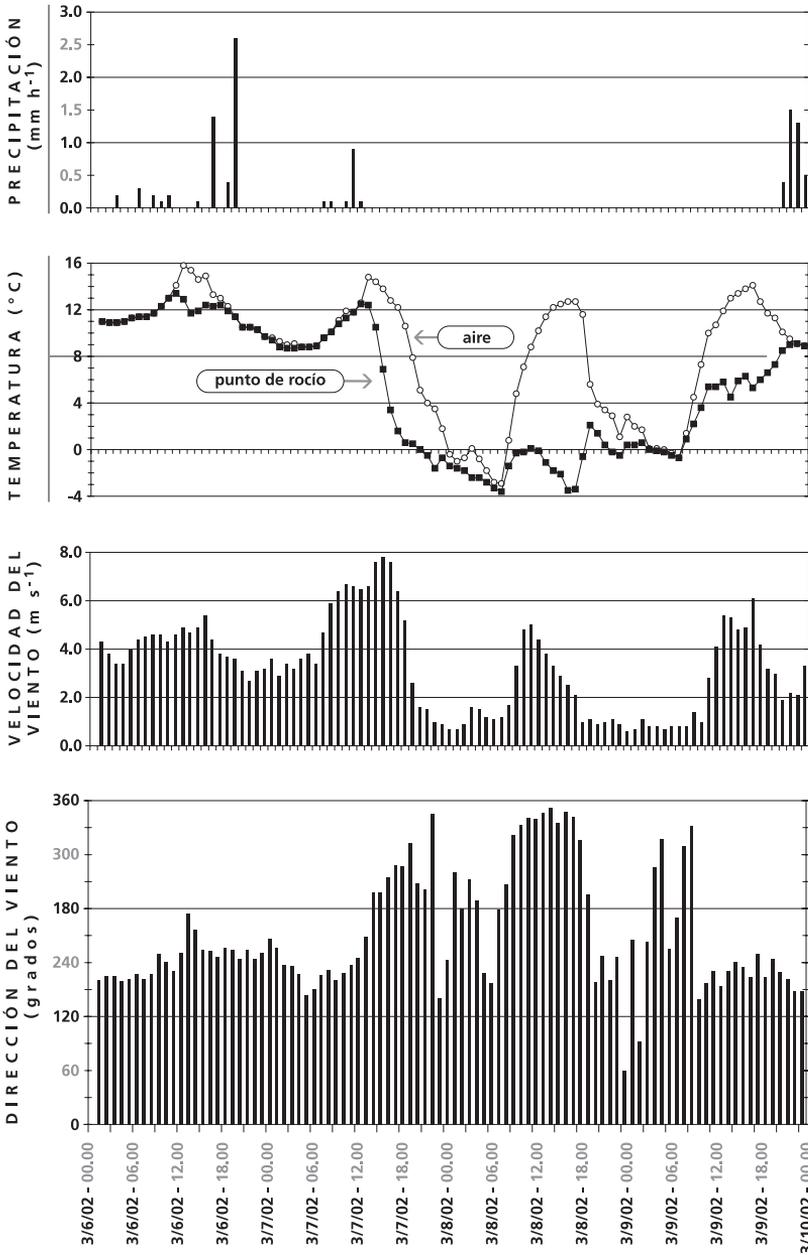
Clave: T_{ss} = Hora de la puesta de Sol. T_0 = 2 horas después de la puesta de Sol.

más baja que la observada. El modelo puede predecir una temperatura mínima demasiado alta si pasa un frente frío o si hay drenaje de aire frío.

Para ser utilizados en el programa FFST.xls, únicamente se deben seleccionar datos de noches de heladas de radiación. Hay que evitar incluir noches con velocidades del viento superiores a los $2,0 \text{ m s}^{-1}$ y noches nubosas o con niebla. Por ejemplo, la Figura 5.2 ilustra el problema de selección de datos. El 6 de marzo, hubo condiciones de viento y lluvia, que continuaron hasta cerca de mediodía del 7 de marzo. A continuación se paró la lluvia, pero el viento cambió desde el sur hacia el oeste-noroeste y la velocidad del viento fue alta hasta las 21.00 h. Una caída brusca de la temperatura de punto de rocío es típica con el paso de un frente frío. La puesta de Sol ocurrió sobre las 17.42 h, con lo que la velocidad del viento fue alta durante más de tres horas tras la puesta de Sol. La radiación neta no se midió en la zona, y por ello se desconoce la información sobre la cobertura de nubes. Sin embargo, tras el paso de un frente frío sigue una cobertura de nubes intermitente. A las dos horas después de la puesta del Sol, las temperaturas del aire y del punto de rocío fueron $5,1 \text{ }^\circ\text{C}$ y $0,0 \text{ }^\circ\text{C}$ y la velocidad

FIGURA 5.2

Muestra de datos meteorológicos durante una helada de advección cerca de Zamora, California (EE.UU.), en marzo de 2002. La puesta de Sol fue hacia las 19.42 h. Las fechas vienen dadas en notación de EE.UU. (mm/dd/aa)



del viento cayó de 2,6 a 1,6 m s⁻¹. Todavía hubo una larga caída en la temperatura después de este punto que no es característico de una helada de radiación. Basándose en estos datos meteorológicos, las condiciones meteorológicas del 7 al 8 de marzo fueron de demasiado viento al atardecer siendo poco típico de una helada de radiación. El 8 y 9 de marzo, las temperaturas del aire y del punto de rocío fueron 3,9 °C y 1,4 °C a las dos horas después de la puesta del Sol y la velocidad del viento cayó pronto al atardecer (i.e. cerca de la puesta del Sol). No hubo evidencia de advección de aire frío, y por ello los datos del 8 al 9 de marzo pueden utilizarse en el programa FFST.xls para determinar un modelo de predicción. Observa que se pueden utilizar datos de noches cuando la temperatura mínima del aire no ha caído por debajo de los 0 °C mientras la noche tenga los cielos despejados y en calma o con muy poco viento.

El programa FFST.xls está escrito en MS Excel para facilitar los datos de entrada y la representación gráfica así como para la representación de los datos que proporciona el modelo en formato de tabla. Durante 50 noches, la temperatura del aire y del punto de rocío a las dos horas tras la puesta del Sol son datos de entrada junto con la temperatura mínima observada a la mañana siguiente. En la figura 5.3 se muestra un ejemplo de pantalla con los datos de entrada de 10 días.

FIGURA 5.3

Muestra de datos de entrada y cálculo del programa FFST.xls de predicción de la temperatura mínima (T_p)

		RMSE (°C)								
		0,65	$T_p' = 0,494 \times T_p + -5,074$							
		0,64	$T_p = 0,494 \times T_p + 0,027 \times T_d + -5,784$							
Muestra número	Observaciones dos (2) horas después de la puesta del sol		Mínimo observado	Predicción a partir de la	Residuo	Residuo a partir del	Temperatura mínima	Residuo de la		
	Temperatura	Punto de rocío	Temperatura	temperatura		punto de rocío	prevista	temperatura		
	T_a (°C)	T_d (°C)	T_m (°C)	T_p' (°C)	$R_1 = T_m - T_p'$	R_1'	T_p (°C)	$T_m - T_p$ (°C)		
1	3,2	-4,2	-3,1	-4,3	1,2	0,0	-4,3	1,2		
2	0,8	-8,8	-8,0	-5,5	0,5	-0,2	-5,6	0,7		
3	0,2	-6,5	-6,3	-5,8	-0,5	-0,1	-5,9	-0,4		
4	2,6	-6,2	-6,4	-6,6	-0,9	-0,1	-4,7	-0,8		
5	4,4	-6,1	-4,9	-3,7	-0,3	-0,1	-3,8	-0,2		
6	5,2	2,6	-3,5	-3,3	0,8	0,2	-3,2	0,6		
7	2,7	-0,7	-4,8	-4,5	-0,3	0,1	-4,5	-0,4		
8	1,2	-1,7	-6,0	-5,3	0,4	0,0	-5,3	0,3		
9	4,5	-1,2	-4,4	-3,7	-0,7	0,1	-3,6	-0,8		
10	6,6	0,1	-3,3	-3,1	-0,2	0,1	-3,0	-0,2		
11										
12										

Los datos son de las heladas de diciembre de 1990 y de 1998 en la región de cítricos de Lindcove, California (USA).

En la Figura 5.3, los datos de entrada se utilizaron para determinar una regresión lineal entre la temperatura mínima observada (T_n) y la del aire a las dos horas después de la puesta de Sol (T_0), y los resultados se muestran en la columna “Predicción a partir de la temperatura (T_p')”. La ecuación que proporciona el resultado $T_p' = b_1 \times T_0 + a_1$ se muestra en la parte superior de la página. A la izquierda de la ecuación se muestra la raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE). Este estadístico es similar a la desviación típica siendo una medida de cómo de cerca están los valores observados y los predichos. En la figura 5.3, el RMSE es 0,65 °C para la fórmula que se basa únicamente en la temperatura de dos horas tras la puesta de Sol. Esto implica que una desviación de la línea 1:1 es aproximadamente 0,65 °C, y dos desviaciones de la línea 1:1 sería de 1,3 °C. Dado que la variación de RMSE es casi la misma que la de la desviación típica, ello significa que la desviación de la línea 1:1 sería menor de 1,3 °C un 85% del tiempo. Una vez calculado T_p' , se calculan y se muestran los residuos ($R_1 = T_n - T_p'$). A continuación, se calcula una regresión lineal entre R_1 y la temperatura del punto de rocío (T_d) y se muestran los valores residuales predichos (R_1'). Si $T_p' = b_1 \times T_0 + a_1$ y $R_1' = b_2 \times T_d + a_2$, entonces la temperatura mínima pronosticada viene dada por: $T_p = T_p' + R_1' = b_1 \times T_0 + b_2 \times T_d + (a_1 + a_2)$. En el programa Excel, la ecuación que proporciona el modelo $T_p = b_1 T_0 + b_2 T_d + a_3$, donde $a_3 = a_1 + a_2$, se muestra en la parte superior de la tabla de cálculo para una mejor visualización. De nuevo, la RMSE de comparar las temperaturas mínimas observadas y predichas se muestra a la izquierda de la ecuación. En este conjunto particular de datos, los valores RMSE fueron casi idénticos para las dos ecuaciones de predicción, por tanto no hubo una ventaja aparente por el hecho de incluir la temperatura del punto de rocío en la predicción de la temperatura mínima. Sin embargo, si se incluye la temperatura del punto de rocío en el modelo mejorará la predicción.

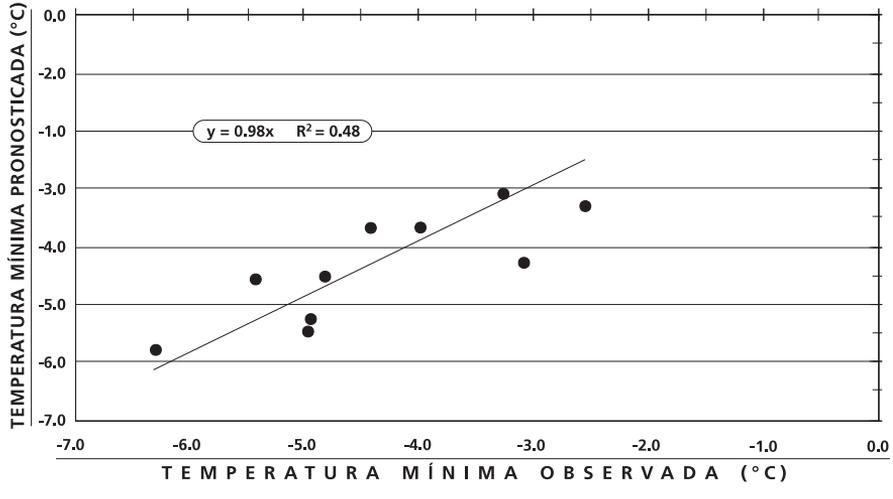
El programa FFST.xls también traza la temperatura predicha contra la observada, tanto para el modelo que utiliza únicamente la temperatura (Figura 5.4) como para el modelo de predicción con temperatura y punto de rocío (no mostrado).

UN MODELO SENCILLO DE PREDICCIÓN DE LA TENDENCIA DE LAS TEMPERATURAS

Además de predecir la temperatura mínima, es útil tener la tendencia de temperatura durante la noche para decidir cuándo se ponen en marcha y cuándo se detienen los métodos de protección. Conocer la tendencia de temperatura durante la noche ayuda a los agricultores a prever cuándo hay que iniciar los métodos activos durante la noche. El modelo FTrend.xls estima la tendencia de temperatura desde las dos horas siguientes a la puesta del Sol hasta la salida del

FIGURA 5.4

Temperatura mínima prevista frente a la observada a partir de los datos de la Figura 5.3, utilizando únicamente los datos de temperatura de las dos horas después de a la puesta de Sol



Sol a la mañana siguiente. La salida y la puesta del Sol se determinan a partir de los datos de latitud, longitud y fecha. El programa utiliza un modelo de tendencia empírico de la temperatura para predecir cuánto cambiará la temperatura durante la noche. Este modelo utiliza una función raíz cuadrada para predecir la temperatura del aire a partir de las dos horas siguientes de la puesta de Sol (i.e. tiempo t_0) hasta alcanzar la temperatura mínima prevista (T_p) a la salida del Sol la mañana siguiente (i.e. tiempo t_p). Además de la temperatura del aire, la aplicación calcula el cambio de la temperatura del bulbo húmedo basándose en la tendencia de temperatura y la temperatura inicial del punto de rocío.

La aplicación FTrend.xls contiene las hojas de cálculo “Título”, “Ayuda”, “Entrada”, “Gráfica”, “BulboHúmedo” y “Previsión”. Las hojas “Título” y “Ayuda” proporcionan información sobre los programadores e instrucciones de cómo utilizar el programa. La hoja Input se utiliza para los datos de entrada de temperatura y para mostrar los resultados de los cálculos de tendencia. La hoja “BulboHúmedo” se utiliza para calcular la temperatura del aire que se corresponde con la temperatura del aire y del punto de rocío a una elevación dada. Se utiliza como ayuda para determinar la temperatura del aire para detener los aspersores después de una noche de helada. La hoja “Previsión” se utiliza para calcular una estimación de la temperatura mínima a la salida del Sol la mañana

siguiente utilizando como input las temperaturas del aire y del punto de rocío medidas a las dos horas siguientes a la puesta de Sol. En las secciones que vienen a continuación se discute estas hojas de cálculo y sus funciones.

HOJA DE CÁLCULO “PREVISION”

Para la aplicación FTrend.xls se necesita prever la temperatura a la salida del Sol. Esta predicción puede provenir de un servicio de predicción meteorológico o basarse en el modelo desarrollado en el programa FFST.xls. Si se utiliza el servicio de predicción, entonces no se necesita la hoja “Previsión” del programa FTrend.xls. Si la predicción de la temperatura mínima proviene del programa FFST.xls, entonces se utiliza la hoja “Previsión” en FTrend.xls para realizar el cálculo.

La Figura 5.5 muestra unos datos de entrada como ejemplo para la hoja “Previsión”. Primero se entran los coeficientes de regresión tanto de la ecuación $T_p' = b_1 \times T_0 + a_1$ como de la ecuación $T_p = b_1 T_0 + b_2 T_d + a_3$ en las celdas apropiadas de la hoja predicción (e.g. $b_1 = 0,494$, $b_2 = 0,027$, $a_1 = -5,872$ y $a_3 = -5,783$ en la Figura 5.5). Las dos ecuaciones en la hoja Previsión son completamente independientes y los datos pueden entrarse en cualquiera de ellas para predecir la temperatura mínima. En la Figura 5.5, la temperatura del aire a las dos horas de la puesta de Sol $T_0 = 9,0$ °C se entró en la ecuación superior y la predicción fue $T_p = -1,4$ °C. Las temperaturas del aire y del punto de rocío que se entraron en la ecuación inferior fueron $T_0 = 9,0$ °C y $T_d = -5,0$ °C y la predicción resultante fue $T_p = -1,5$ °C.

FIGURA 5.5

Muestra de entrada de los coeficientes de predicción de temperatura mínima y de temperaturas en la hoja “Previsión” del programa de aplicación FTrend.xls

T_p previsto	=	T_0 mult	x	T_0	+	Offset				
-1,4	=	0,494	x	9,0	+	-5,872				
T_p previsto	=	T_0 mult	x	T_0	+	T_d mult	x	T_d	+	Offset
-1,5	=	0,494	x	9,0	+	0,027	x	-5,0	+	-5,783

Utilice la primera ecuación si se utiliza la temperatura dos horas después de la puesta de Sol para la previsión. Introduzca el multiplicador y el "offset" del programa FFST.xls y después introduzca el valor de T_0 para la predicción de la temperatura mínima.

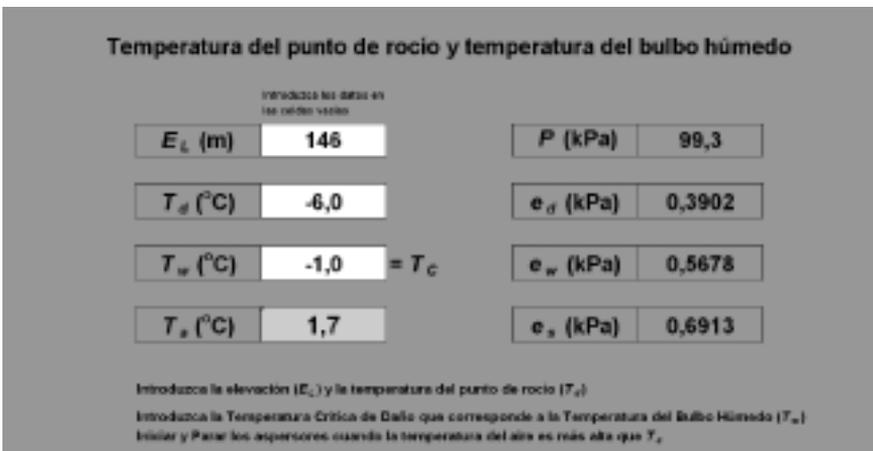
Utilice la segunda ecuación si se utiliza la temperatura del aire y la temperatura del punto de rocío dos horas después de la puesta de sol para la predicción de la temperatura mínima. Introduzca los multiplicadores de T_0 y T_d y el "offset" asociados del programa FFST.xls. Después introduzca los valores T_0 y T_d para prever la temperatura mínima.

HOJA DE CÁLCULO "BULBOHÚMEDO"

La hoja de cálculo "BulboHúmedo" en la aplicación FTrend.xls sirve para determinar la temperatura del aire correspondiente a un valor de entrada de la temperatura del bulbo húmedo y del punto de rocío a una elevación definida. Se utiliza como ayuda para determinar cuando hay que poner en marcha y cuando hay que detener los aspersores en la protección contra heladas. En la Figura 5.6 se muestra un ejemplo de la hoja bulbo húmedo. En el ejemplo, la elevación se entró como $E_L = 146$ m por encima del nivel del mar. Si la temperatura crítica de daño para el cultivo a proteger es $T_c = -1,0$ °C, entonces $T_w = -1,0$ es input como se muestra en la Figura 5.6. Recuerda que la temperatura crítica variará en función del cultivo, de la variedad, del estadio fenológico y del endurecimiento. En la Figura 5.6, el valor $T_d = -6,0$ °C fue un dato de entrada para la temperatura del punto de rocío. Tras la elevación, se entran las temperaturas del bulbo húmedo y del punto de rocío, el programa calcula la correspondiente temperatura del aire. Cuando se utilizan aspersores para la protección contra heladas, deben ponerse en marcha y detenerse cuando la temperatura del aire medida contra el viento desde el cultivo protegido es más alta que la temperatura del aire que muestra la hoja de cálculo bulbo húmedo. La hoja de cálculo bulbo húmedo también calcula la presión barométrica como una función de la elevación y de las presiones de vapor a saturación a las temperaturas del punto de rocío (e_d), del bulbo húmedo (e_w) y del aire (e_s). Observa que la presión del vapor de agua real (e) es igual a e_d .

FIGURA 5.6

Muestra de los datos de entrada y de los cálculos de la hoja de cálculo bulbo húmedo del programa de aplicación FTrend.xls



HOJA DE CÁLCULO “ENTRADA”

Pronosticar la tendencia de temperaturas del aire

La hoja de cálculo “Entrada” se utiliza para entrar la temperatura del aire (T_0) a las dos horas después de la puesta de Sol y para predecir la temperatura mínima (T_p) a la mañana siguiente (Figura 5.7). La latitud, la longitud, la elevación y la hora meridiana local se entran en la hoja de cálculo Input para determinar la longitud del día, la hora estándar local y las constantes que dependen de la elevación. Entra latitud positiva para el Hemisferio Norte (°N) y latitud negativa para el Hemisferio Sur (°S). Entra longitud positiva por las posiciones al oeste de Greenwich (°W) y longitud negativa para las posiciones al este de Greenwich (°E). Entra la elevación en metros por encima del nivel del mar. La tendencia de temperatura durante la noche se calcula utilizando una función raíz cuadrada y los resultados se muestran en la hoja de cálculo Input (Figura 5.7) y se dibujan en la gráfica (Figura 5.8) de la aplicación FTrend.xls. En este caso se ha entrado una temperatura crítica $T_c = -1,5$ °C.

FIGURA 5.7

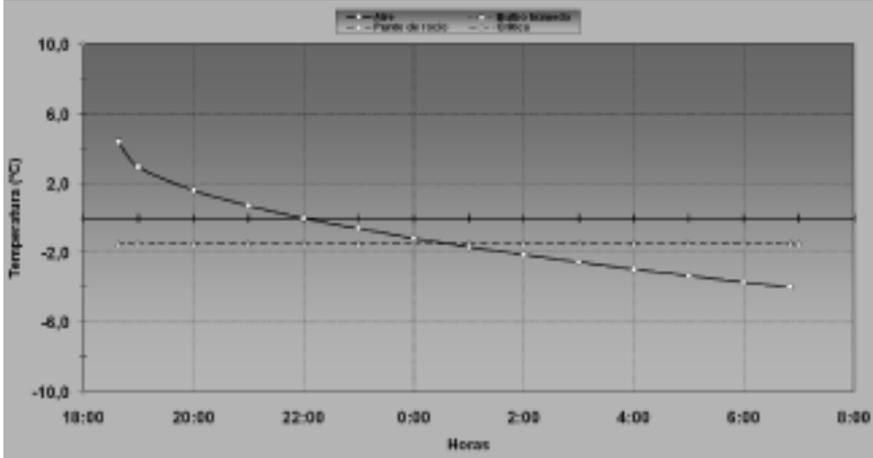
Muestra de hoja de cálculo “Entrada” de la aplicación FTrend.xls con la temperatura del aire a las dos horas después de la puesta del Sol cuando $T_0 = 4,4$ °C y la temperatura mínima pronosticada $T_p = -4,0$ °C

Fecha	24-NOV-02	latitud	35,25	grados (+ norte - sur)	longitud	112,1	grados (+ oeste - este)	elevación	142,3	metros arriba del nivel del mar	hora meridiana del tiempo	170	grados (+ oeste - este)
T_0	4,4	Temp. del aire 2 horas de noche											
T_p	-4,0	Temperatura mínima pronosticada											
hora	16:30	horas											
temp. crítica	-1,5	grados											

Fecha	hora	Temperatura	T	T_w	T_0	T_c
24-nov	18:30		4,4	N/A	N/A	-1,5
24-nov	19:00		3,0	N/A	N/A	-1,5
24-nov	20:00		1,6	N/A	N/A	-1,5
24-nov	21:00		0,7	N/A	N/A	-1,5
24-nov	22:00		0,0	N/A	N/A	-1,5
24-nov	23:00		-0,6	N/A	N/A	-1,5
25-nov	0:00		-1,2	N/A	N/A	-1,5
25-nov	1:00		-1,7	N/A	N/A	-1,5
25-nov	2:00		-2,1	N/A	N/A	-1,5
25-nov	3:00		-2,6	N/A	N/A	-1,5
25-nov	4:00		-3,0	N/A	N/A	-1,5
25-nov	5:00		-3,3	N/A	N/A	-1,5
25-nov	6:00		-3,7	N/A	N/A	-1,5
25-nov	6:48		-4,0	N/A	N/A	-1,5
25-nov	7:00		N/A	N/A	N/A	-1,5
25-nov	8:00		N/A	N/A	N/A	-1,5
25-nov	9:00		N/A	N/A	N/A	-1,5
25-nov	10:00		N/A	N/A	N/A	-1,5

FIGURA 5.8

Muestra de gráfica que resulta de los datos entrados en la hoja de cálculo "Entrada" de la aplicación FTrend.xls, utilizando los datos mostrados en la Figura 5.7



Pronosticar la tendencia en la temperatura del bulbo húmedo

Si la temperatura del punto de rocío a las dos horas de la puesta de Sol también se entra en la hoja de cálculo de inputs, entonces la aplicación calculará el cambio en la temperatura del bulbo húmedo y del punto de rocío así como de la temperatura del aire. Una muestra de la hoja de cálculo de inputs con $T_d = -2,8$ °C se muestra en la Figura 5.9 y la gráfica se muestra en la Figura 5.10. La temperatura del punto de rocío se fija como valor input durante la noche a no ser que la temperatura del aire caiga por debajo del input punto de rocío (Figura 5.10). Entonces, la temperatura del punto de rocío cae con la temperatura del aire hasta la temperatura mínima pronosticada. Por ejemplo, tanto el aire como el punto de rocío caen desde $T = -2,8$ °C, cuando el aire alcanza la temperatura del punto de rocío, hasta $T_p = -4,0$ °C a la salida del Sol (Figura 5.10). Esto ocurre normalmente en las noches en las que el aire se satura.

La curva de la temperatura del bulbo húmedo en la aplicación FTrend.xls se utiliza para estimar cuándo se necesita poner en marcha los aspersores para la protección contra heladas. Por ejemplo, la temperatura del bulbo húmedo cae hasta la temperatura crítica de daño $T_c = -1,5$ °C a las 23.00 h en la Figura 5.10. En esta situación, los aspersores deberían ponerse en marcha antes de las 23.00 h, antes de que la temperatura del bulbo húmedo (T_w) caiga por debajo de $T_c = -1,5$ °C. Si

FIGURA 5.9

Una muestra de la hoja de cálculo de inputs del programa de aplicación FTrend.xls con la entrada adicional de la temperatura del punto de rocío (T_d) a las dos horas de la puesta de Sol

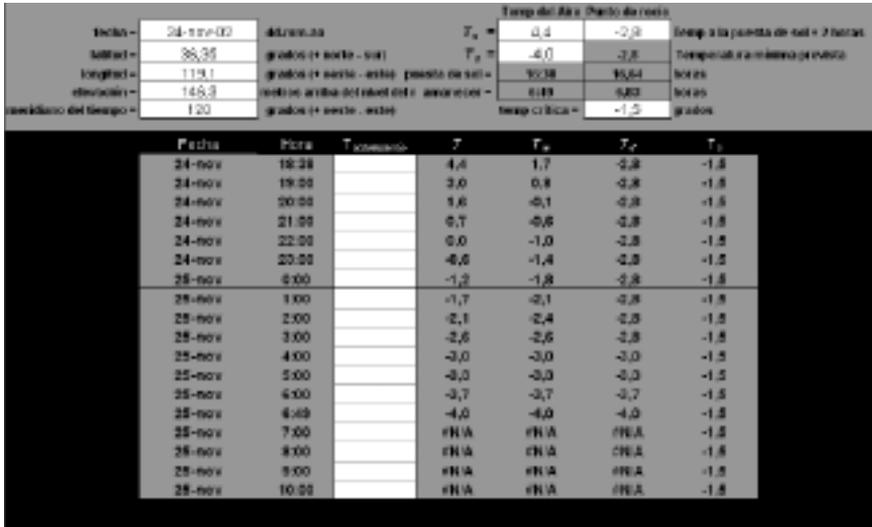
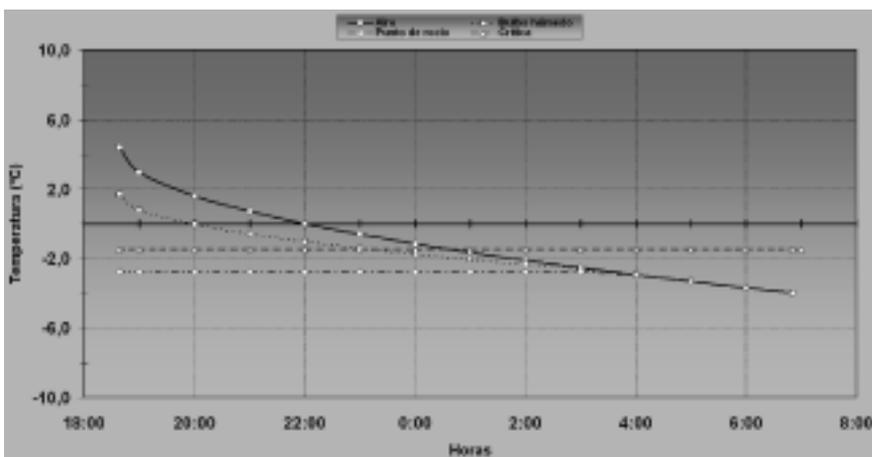


FIGURA 5.10

Muestra del gráfico que resulta a partir de los datos de entrada en la hoja de cálculo "Entrada" de la aplicación FTrend.xls utilizando datos de la Figura 5.9 con una temperatura del punto de rocío de $T_d = -2,8$ °C a las dos horas de la puesta de Sol



asumimos que la latitud, la longitud y la fecha son correctas, la gráfica de tendencias de temperatura va desde las dos horas después de la puesta de Sol hasta la salida del Sol (e.g. 18.38 h hasta 07.05 h en la Figura 5.10).

Decidir cuándo poner en marcha los aspersores

La gráfica de la aplicación FTrend.xls también es útil para ayudar en la toma de decisiones sobre si los aspersores deben usarse o no. Para agricultores sin problemas de encharcamiento del suelo, de falta de agua o preocupados por el coste, es mejor poner en marcha los aspersores cuando la temperatura del bulbo húmedo se aproxima tanto a 0 °C como a la temperatura crítica de daño, dependiendo del valor del cultivo y de la preocupación por las pérdidas. Sin embargo, para agricultores que están preocupados con estos problemas, el uso de la aplicación FTrend.xls les ayudará a determinar cuándo poner en marcha los aspersores para minimizar el daño, el encharcamiento, el uso de energía y la pérdida de suministro de agua.

Cuando se utilizan micro-aspersores bajo la cubierta vegetal, la temperatura de puesta en marcha es menos importante que para otros sistemas de aspersión ya que principalmente se humedece el suelo y no las plantas. Al principio de la puesta en marcha, puede haber un periodo corto en que la temperatura cae conforme el agua aplicada se evapora; sin embargo, si la tasa de aplicación es suficiente, la temperatura debería recuperarse rápidamente. Con micro-aspersores por debajo de la cubierta vegetal, se pueden poner en marcha cuando la temperatura del aire se aproxima a 0 °C, sin demasiado riesgo. Lo mismo se aplica a los sistemas de aspersores bajo la cubierta convencionales que no mojan las ramas más bajas de los árboles. Si los aspersores bajo la cubierta mojan las ramas más bajas, entonces se debería utilizar el mismo criterio de puesta en marcha que para los aspersores por encima de la cubierta.

Los aspersores sobre la cubierta deberían ponerse en marcha de forma que estén todos en funcionamiento cuando la temperatura del bulbo húmedo se aproxima a la temperatura crítica de daño (T_c). No obstante, observa que las temperaturas críticas de daño publicadas no son siempre correctas, por lo que es aconsejable seleccionar una T_c ligeramente más alta (e.g. unos 0,5 °C) que los valores publicados. La elección depende del riesgo que se quiere tomar. Si la temperatura mínima (T_p) se pronostica que será más de 1,0 °C inferior que T_c , se aconseja en general poner en marcha los aspersores conforme la temperatura del bulbo húmedo se aproxima a T_c utilizando el programa FTrend.xls, que se ha descrito previamente. El problema surge cuando se pronostica que T_p es cercano a T_c . Incluso si T_p es ligeramente superior que T_c , es posible que la ecuación no sea correcta en cualquier noche dependiendo de las condiciones locales. Por

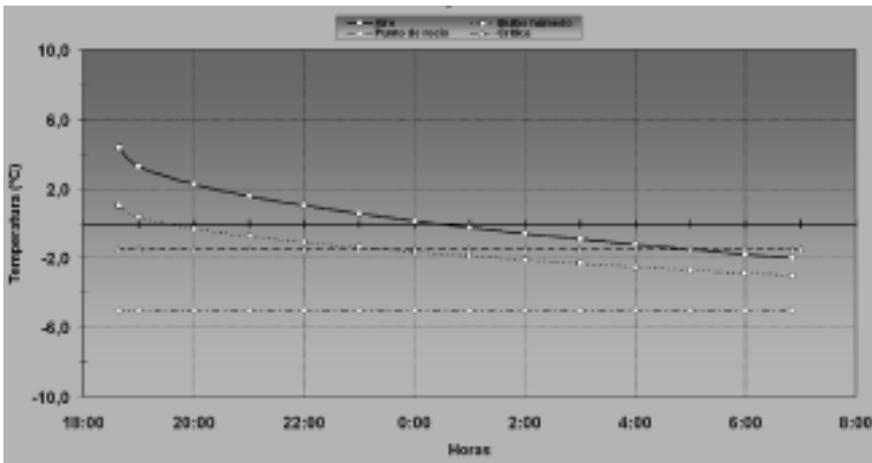
ejemplo, la ecuación de pronóstico de T_p podría trabajar bien durante años y podría fallar completamente una noche debido a condiciones extrañas durante esa noche (e.g. a menudo se relaciona con drenaje poco frecuente del aire frío). El hecho no es extraño y les ha sucedido a meteorólogos profesionales con heladas en frutales en California. Sin embargo, en muchos casos, las ecuaciones de predicción deberían trabajar bien. Ésta es una buena razón para un minucioso seguimiento de la temperatura durante una noche de helada.

Cuando se pronostica que T_p será cercana a T_c , la decisión de si debe protegerse y cuándo debe protegerse depende de la temperatura del punto de rocío. Si la temperatura del punto de rocío es baja, entonces es aconsejable poner en marcha los aspersores antes que T_w caiga por debajo de T_c . Ésto se ilustra en la Figura 5.11, donde $T_p = -2,0\text{ }^\circ\text{C}$ y $T_d = -5,0\text{ }^\circ\text{C}$ eran los inputs. Aunque T_p es escasamente más baja que T_c , como T_d es baja, T_w cae hasta T_c antes de medianoche. En consecuencia, la decisión de si utilizar o no los aspersores debe hacerse antes de la medianoche. En este ejemplo, los aspersores deben funcionar durante más de siete horas. Si los aspersores no se han puesto en marcha, es muy probable que la temperatura del aire caiga ligeramente por debajo de T_c durante unas dos horas. Dependiendo de la precisión de la predicción, del endurecimiento del cultivo, etc., el cultivo experimentará probablemente algún daño. No obstante, si la predicción es baja o T_c se fija demasiado alta, puede que no haya daño o que sea muy pequeño. Ésto hace que la decisión de poner en marcha los aspersores sea una decisión difícil. De nuevo, depende de la cantidad de riesgo que el agricultor quiera aceptar y si hay problemas de encharcamiento, o de falta de agua o problemas de costes. No obstante, si se utilizan aspersores en este ejemplo, éstos deberían ponerse en marcha antes de la medianoche.

La Figura 5.12 muestra una gráfica de la tendencia de temperatura siendo el input la temperatura del punto de rocío $T_d = T_p = -2,0\text{ }^\circ\text{C}$. En este caso, T_p es inferior a T_c y quizás se necesite protección. Sin embargo, como la temperatura del punto de rocío es relativamente alta, el agricultor puede esperar hasta más tarde en la noche para decidir si toma medidas o no de protección. Si se utilizan los aspersores, el agricultor debería ponerlos en marcha hacia las 04.00 h, y deberían funcionar durante algo más de tres horas. Si los aspersores han funcionado correctamente será extraño que haya resultado algún tipo de daño con una helada moderada en la noche descrita en la Figura 5.12. Si no se han utilizado los aspersores, no se sabe si hubiera habido o no daño. De nuevo, depende del pronóstico y de otros factores físicos y económicos. También, algunos cultivos que abortan frutos (e.g. manzanos), pueden perder yemas, flores, frutas o frutos secos dañados por congelación, aunque la producción global puede que no se vea muy afectada. Para otros cultivos que

FIGURA 5.11

Gráfica de tendencia de temperatura utilizando los datos de la Figura 5.9, pero con la temperatura mínima prevista $T_p = -2,0\text{ °C}$ y la temperatura del punto de rocío $T_d = -5,0\text{ °C}$

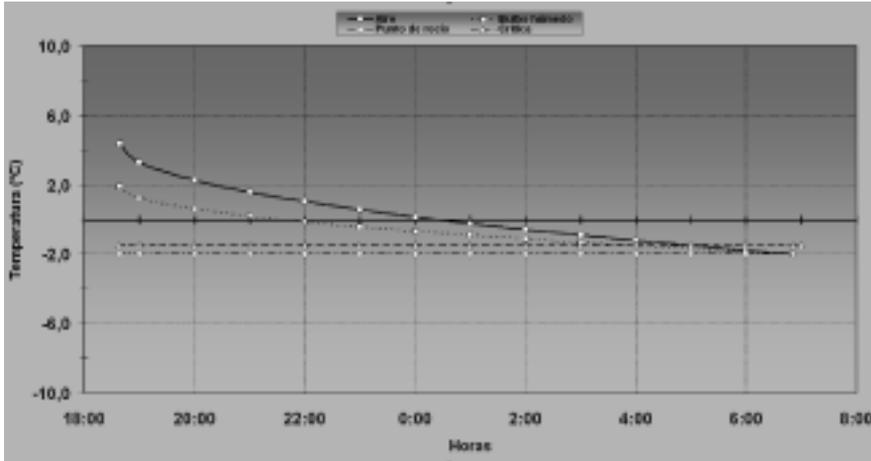


pierden la producción debido a la pérdida de algunas yemas, flores, frutos secos o frutas (e.g. almendros), debe evitarse el daño y tomar menos riesgos. Otra decisión importante está relacionada con el que las condiciones sean o no muy graves para que la tasa de aplicación de los aspersores proporcione la protección adecuada. Esto se discute en el capítulo sobre protección activa contra heladas.

Los aspersores pueden pararse después de la salida del Sol cuando la temperatura del bulbo húmedo sube de nuevo por encima de la temperatura crítica de daño. El aumento de temperatura después de la salida del Sol depende de muchos factores y es casi imposible hacer un pronóstico con exactitud. Para determinar cuándo hay que parar los aspersores, se debería medir la temperatura del bulbo húmedo o la temperatura del punto de rocío contra el viento desde el cultivo protegido, y entonces utilizar la hoja de cálculo “BulboHúmedo” del programa de aplicación FTrend.xls para calcular la temperatura mínima del aire para detener los aspersores. Entra la elevación, la temperatura del punto de rocío y la temperatura del bulbo húmedo igual a la temperatura crítica de daño (i.e. $T_w = T_c$). Los aspersores pueden detenerse si el Sol está elevado y radiante sobre el cultivo y la temperatura del aire es más alta que la temperatura del aire calculada en la hoja de cálculo “BulboHúmedo”. Para una seguridad absoluta, ponga 0 °C para la temperatura del bulbo húmedo y detenga los aspersores cuando el Sol esté radiante y la temperatura

FIGURA 5.12

Gráfica de tendencia de temperatura utilizando los datos de la Figura 5.9, pero con la temperatura mínima prevista $T_p = -2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la temperatura del punto de rocío $T_d = -2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$



del aire medida contra el viento desde el campo protegido sea más alta que la temperatura del aire calculada en la hoja de cálculo “BulboHúmedo”.

Actualización con las observaciones de las temperaturas actuales

Otra característica del programa FTrend.xls es que la tendencia de temperatura puede actualizarse durante la noche con las temperaturas observadas. Por ejemplo, si estuviera nublado entre las 20.00 h y las 22.00 h durante la noche descrita en la Figura 5.9 y la temperatura medida a las 22.00 h fuera $T = 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ más que los $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ previstos en la Figura 5.9, entonces se entraría $T = 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para las 22.00 h en la columna T_{update} (Figura 5.13) y todas las temperaturas posteriores se mueven hacia arriba en respuesta a la actualización (Figura 5.14). Las tendencias de la temperatura mínima prevista y de la temperatura del bulbo húmedo desde las 22.00 h hasta la salida del Sol serían ambas incrementadas. El cambio en la tendencia de la temperatura del bulbo húmedo es significativo, ya que la hora en que la temperatura del bulbo húmedo intercepta a la temperatura crítica de daño ha sido desplazada de las 23.00 h a las 01.00 h. Por tanto, poner en marcha los aspersores para la protección contra heladas podría retrasarse unas dos horas. Esto ilustra la importancia del seguimiento de temperaturas y la actualización del modelo de la aplicación FTrend.xls durante la noche.

FIGURA 5.13

Un ejemplo de la hoja de cálculo del programa FTrend.xls con la temperatura del aire de las 22.00 h actualizada para $T_{update} = 1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$

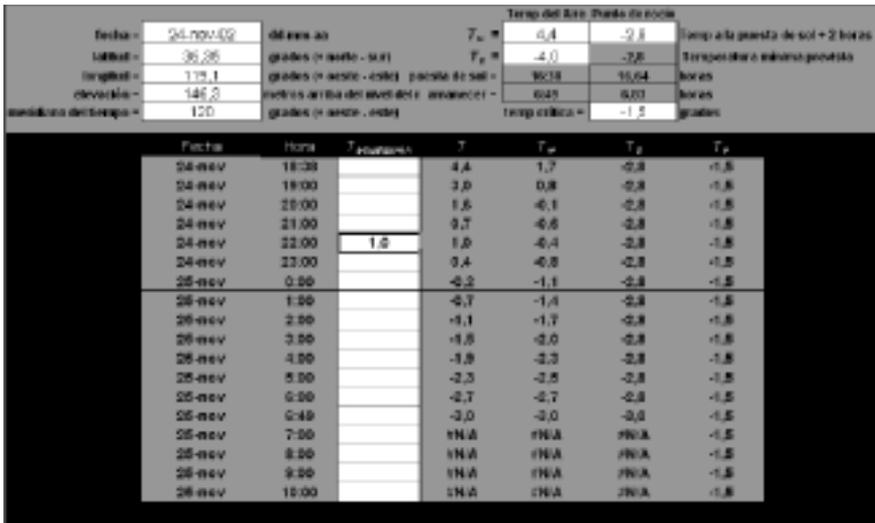
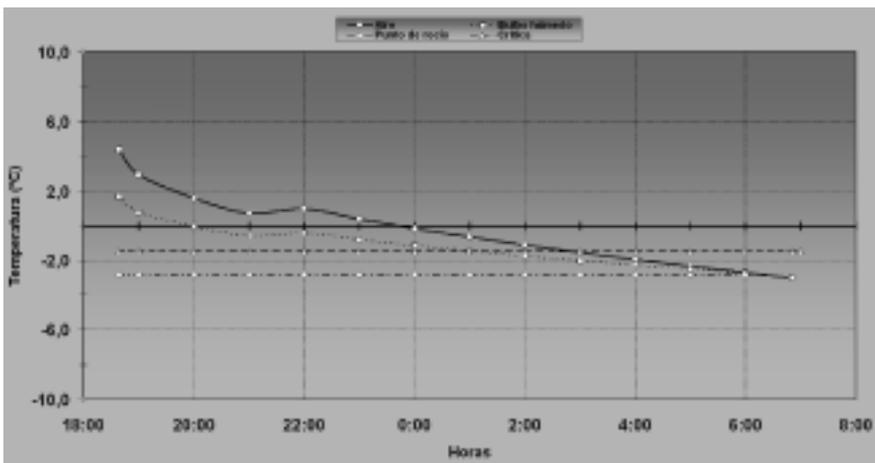


FIGURA 5.14

Un ejemplo de la gráfica trazada a partir de la hoja de cálculo FTrend.xls utilizando los datos de la Figura 5.12 con la temperatura del aire medida actualizada a las 22.00 h



Documentación de la aplicación FTrend.xls

El cálculo de la tendencia de la temperatura utiliza la función raíz cuadrada de las dos horas después de la puesta de Sol (i.e. tiempo t_0) hasta la salida del Sol (i.e. tiempo t_p) de la mañana siguiente. Primero se calcula un factor de calibración b' a partir de la Temperatura mínima predicha (T_p) y la temperatura en el momento t_0 (T_0) como:

$$b' = \frac{T_p - T_0}{\sqrt{h}} \quad \text{Ec. 5.1}$$

donde h es el tiempo (horas) entre t_0 y t_p (e.g. $h = (24 - t_0) + t_p$). La temperatura (T_i) en cualquier momento t_i horas después de t_0 se estima como:

$$T_i = T_0 + b' \sqrt{t_i} \quad \infty\text{C} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Si únicamente se utilizan los datos de temperatura de T_0 y T_p , entonces la aplicación FTrend.xls calcula únicamente la tendencia de temperaturas. Sin embargo, si se utiliza como input la temperatura del punto de rocío a las dos horas después de la puesta de Sol (T_d), la aplicación también calcula la temperatura del bulbo húmedo entre t_0 y t_p . Durante la noche, el punto de rocío se fija como el valor inicial de T_d a menos que la tendencia de temperatura caiga por debajo de T_d . Cuando la tendencia de la temperatura del aire es menor que T_d , la temperatura del punto de rocío se iguala a la temperatura del aire. La temperatura del bulbo húmedo se calcula como una función de las correspondientes temperaturas del aire y del punto de rocío y de la presión barométrica, que se estima a partir de la elevación.

La temperatura del bulbo húmedo (T_w) se calcula a partir de la temperatura del punto de rocío (T_d) y de la temperatura del aire (T_a) en °C como:

$$T_w = T_a - \left(\frac{e_s - e_d}{\Delta + \gamma} \right) \quad \infty\text{C} \quad \text{Ec. 5.3}$$

donde e_s y e_d son las presiones de vapor a saturación (kPa) a las temperaturas del aire y del punto de rocío, Δ es la pendiente de la curva de la presión de vapor a saturación a la temperatura del aire (T_a) en °C:

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T_a + 237,3)^2} \quad \text{kPa } \text{°C}^{-1} \quad \text{Ec. 5.4}$$

y γ es aproximadamente igual a la constante psicrométrica.

$$\gamma = 0,00163 \frac{P_b}{\lambda} \quad \text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1} \quad \text{Ec. 5.5}$$

donde P_b es la presión barométrica en kPa y λ es el calor latente de vaporización:

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} T_a \quad \text{MJ kg}^{-1} \quad \text{Ec. 5.6}$$

donde T_a es la temperatura del aire en $^\circ\text{C}$. Observa que γ de la Ecuación 3.6 proporcionará los mismos resultados que utilizando las Ecuaciones 5.5 y 5.6.

Alarmas y seguimiento meteorológico durante una noche de helada

Aunque prever cuál es la tendencia de la temperatura durante las noches de heladas es importante para estimar si es necesaria la protección y cuándo ésta es necesaria, puede ser más importante un buen programa de seguimiento de la temperatura. Lo esencial incluye una alarma de helada para levantarnos a tiempo de poner en marcha cualquiera de los métodos de protección antes de que se produzca el daño y una red de estaciones de temperatura distribuida por el cultivo. Las alarmas de helada están disponibles comercialmente. El coste de una alarma depende de sus características. Algunas alarmas tienen cables con sensores de temperatura que pueden situarse en la parte exterior de una vivienda en una caseta meteorológica estándar mientras que la alarma está situada en el interior con un despertador para despertarnos. También hay alarmas que realizan una llamada por teléfono o que utilizan señales de radio o infrarrojas para comunicarse con la vivienda y hacer funcionar la alarma desde una estación alejada. No obstante, el coste se incrementa con el nivel de sofisticación de la alarma contra heladas.

Normalmente, los porcentajes de daño por helada se basan en la exposición de tejidos de plantas a temperaturas críticas durante media hora, donde las temperaturas del aire se miden en una garita meteorológica a una altura de 1,5 m. Perry (1994) recomienda que los termómetros sean colocados a la altura más baja que se desea proteger. Perry (1994) también aconseja que los sensores deben situarse donde no sean afectados directamente por los métodos de protección (e.g. radiación de las estufas). La recomendación general es colocar los termómetros más bajos en cultivos densos y bajos y más altos en cultivos espaciados y más altos. La idea es disponer de la temperatura del aire protegida lo más cerca posible de la temperatura de la planta que hay que proteger.

En realidad la temperatura de una hoja, de una yema o de un fruto pequeño es probablemente más baja que la temperatura de la garita. Igual que existe una capa

límite sobre una superficie cultivada, también existe una capa límite sobre micro superficies (e.g. hojas, yemas, frutas o frutos secos). Debido a las pérdidas de radiación de onda larga, las hojas, yemas, flores, etc. estarán normalmente más frías que la temperatura del aire durante una noche de helada. El calor sensible se difunde desde el aire a las superficies más frías a través de la capa límite, pero la tasa de difusión es insuficiente para reemplazar las pérdidas de calor por radiación. Como resultado, el contenido de calor sensible de los tejidos de las plantas y del aire cerca de la superficie causa una caída de temperaturas y conduce a una condición de inversión sobre los tejidos de las plantas. La profundidad de la capa límite a esta micro-escala y el gradiente de calor sensible ayudan a determinar cuánto de rápido el calor sensible se transfiere a la superficie.

La importancia de la capa límite a esta micro-escala puede ilustrarse considerando lo que ocurre en nuestra piel en un ambiente cálido (e.g. en una sauna seca). Si permanecemos en una sauna “seca” y no nos movemos, nos sentiremos calientes debido a que la temperatura del ambiente es más alta que la temperatura de la piel. El calor sensible se transfiere por difusión desde el ambiente a través de la pequeña capa límite a nuestra piel. Sin embargo, si empezamos a hacer ejercicio (e.g. hacer calistenia), entraremos en calor rápidamente. Esto ocurre porque al realizar ejercicio ventilamos la piel reduciendo el grosor de la capa límite, lo cual favorece la transferencia de calor sensible a la superficie más fría (i.e. hacia nuestra piel). El balance de energía de una hoja, yema, fruta o fruto seco es similar. Aumentando la ventilación (e.g. velocidad del viento más alta) se reducirá el grosor de la capa límite y se favorecerá la transferencia de calor sensible. Durante una noche de helada, las diferentes partes de la planta tenderán a estar más frías que el aire, y por ello una velocidad del viento más alta calentará las plantas aun nivel tan alto como la temperatura del ambiente. Si la temperatura del ambiente es suficientemente alta, entonces el daño que se produce es muy poco o ninguno.

Aparecen algunos problemas si se utiliza la temperatura del aire en una garita (T_a) como temperatura crítica para el daño (T_c). La temperatura de la planta puede ser bastante diferente de la temperatura del aire dependiendo de la radiación neta, la exposición al cielo, y al suelo, y de las condiciones de la hoja y de ventilación (viento). Las temperaturas críticas de daño se determinan a menudo colocando ramas escindidas en una cámara fría. En la cámara, la temperatura se baja lentamente y se mantiene por debajo de una temperatura específica durante 30 minutos y, a continuación, se evalúa en la rama el porcentaje de daño en las yemas, los botones florales, los frutos o frutos secos. No existe una solución fácil para poder comparar los valores publicados de T_c con lo que realmente ocurre en una noche de helada. En la práctica, deberíamos utilizar únicamente los valores de T_c

como una directriz y recordar que la temperatura a la que están expuestas las ramas está probablemente por debajo de la temperatura medida en una garita.

Si conocemos las relaciones entre la temperatura de los tejidos de la planta más sensibles y la temperatura de la garita ayudará en la toma de decisiones en la protección contra heladas. Por ejemplo, se sabe que las hojas de los cítricos se congelan aproximadamente a $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Powell y Himelrick, 2000). Sin embargo, la relación entre la temperatura de la hoja y la temperatura de la garita depende de las condiciones ambientales locales. Si controlamos que la temperatura de la hoja de los cítricos no caiga por debajo de $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ podemos salvar un cultivo bajo condiciones de una helada muy severa. Sin embargo, la medida de la temperatura de la hoja es un trabajo intenso y que no realiza normalmente. Por ello es conveniente estimar la temperatura de la hoja a partir de la temperatura de la garita. Además de los cítricos, la relación entre la temperatura de la hoja y la temperatura de la garita no está disponible para yemas, botones florales, pequeños frutos, y frutos de hueso en estadio inicial de crecimiento y en frutos del bosque (Powell y Himelrick, 2000).

El super-enfriamiento de las partes de las plantas dificulta la identificación de las temperaturas críticas. Por ejemplo, los cítricos tienen concentraciones relativamente bajas de bacterias nucleadoras de hielo, y esto puede explicar porque la T_c de las hojas de los cítricos se encuentran de forma consistente a $-5,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. En muchos cultivos de hoja caduca, identificar una temperatura crítica de forma clara es más difícil ya que el súper-enfriamiento varía con la concentración de bacterias nucleadoras de hielo.

La presencia de agua sobre las superficies de las plantas también afectará al daño por helada. Powell y Himelrick (2000) observaron que las superficies secas de las plantas congelan a una temperatura del aire más baja que las superficies húmedas. Citaron trabajos realizados en California que mostraban como los frutos húmedos de los cítricos se enfriaban más rápidamente que los frutos secos durante las heladas. A la misma temperatura del aire, un fruto húmedo está más frío que un fruto seco debido a que el agua se evapora y extrae calor sensible. El fruto húmedo puede enfriar hasta la temperatura del bulbo húmedo, que siempre es menor o igual que la temperatura del aire. Las zonas con agua en la piel de la fruta de un cítrico, en una noche de helada, pueden dañarse, ya que la piel bajo estas zonas con agua puede enfriarse hasta la temperatura del bulbo húmedo mientras que las partes secas del fruto están más calientes. Daños similares se producen en la piel de otras frutas si se humedecen en una noche de helada. Por lo tanto, es poco aconsejable humedecer las plantas antes de una noche de helada a no ser que los aspersores se utilicen durante la noche.

MÉTODOS DE PROTECCIÓN PASIVOS

Los métodos de protección pueden ser pasivos o activos. La protección pasiva incluye métodos que se han realizado con antelación a una noche de helada para evitar tener que necesitar una protección activa. Por ejemplo, las actividades de gestión pasiva incluyen:

1. La selección del emplazamiento
2. La gestión del drenaje de aire frío
3. La selección de plantas
4. Las cubiertas arbóreas
5. La gestión de la nutrición de las plantas
6. La poda adecuada de las plantas
7. El retrasar la floración mediante enfriamiento
8. La aplicación de productos químicos para retrasar la floración
9. Las cubiertas de plantas
10. El evitar el laboreo del suelo
11. La aplicación de riego
12. Eliminar las cubiertas de los cultivos
13. Las cubiertas de suelo
14. El pintar los troncos
15. Las envolturas de los troncos
16. El control de las bacterias
17. El tratamiento químico de las semillas

La gestión adecuada de cada uno de los métodos pasivos se discute en las secciones que vienen a continuación. En el capítulo 2 se presenta una discusión menos técnica que permite una visión breve del tema.

LA SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO Y SU GESTIÓN

Las heladas de advección están asociadas con el viento y con la pequeña estratificación vertical de la temperatura. Durante las heladas de advección, las temperaturas más bajas normalmente se observan en las partes medias y superiores de las pendientes que están abiertas y están expuestas al viento. Las

temperaturas nocturnas más altas se observan en las partes más bajas de las laderas y en los sitios más bajos protegidos del viento. Las heladas de radiación están asociadas con las condiciones de calma o de viento muy suave y flujos catabáticos (i.e. drenaje de aire frío). El aire frío se acumula en las depresiones, donde el aire se estratifica verticalmente de forma que la temperatura aumenta con la altura. Durante las heladas de radiación, las temperaturas nocturnas más altas se observan en las cimas y en las partes superiores de las pendientes que están libres de obstáculos que bloquean el drenaje del aire frío.

FACTORES DE SELECCIÓN DEL EMPLAZAMIENTO PARA LAS HELADAS DE RADIACIÓN

1. Debido al drenaje de aire frío a las partes más bajas, las temperaturas mínimas nocturnas tienden a seguir las curvas de nivel.
2. Las grandes masas de agua situadas contra el viento tienden a disminuir la frecuencia de heladas.
3. Las masas rocosas (acantilados) y las cubiertas vegetales (i.e. plantas cercanas más altas) pueden incrementar la radiación durante la noche hacia abajo y aumentar las temperaturas mínimas. Sin embargo, en algunas posiciones, pueden bloquear el drenaje de aire frío y favorecer la estratificación y el estancamiento del aire frío. Cada situación es única y las ventajas y desventajas de la proximidad a masas rocosas y cubiertas vegetales deben ser consideradas separadamente en cada localidad.
4. El tipo de suelo afecta al almacenamiento y liberación de energía y en consecuencia afecta a la temperatura nocturna.
5. La topografía local y los obstáculos en el paisaje afectan al drenaje de aire frío

La selección del emplazamiento es el método más importante de protección contra las heladas. Los factores a considerar son el drenaje de aire frío, la pendiente y la orientación, y el tipo de suelo. Muchos agricultores conocen los emplazamientos que son más propensos al daño por heladas. Normalmente, los emplazamientos más bajos de la topografía de una zona tienen temperaturas más bajas y como consecuencia, son más propensos a sufrir daños. Sin embargo, a veces, el daño ocurre en una sección del área cultivada y no en otra, sin que se aprecien diferencias topográficas. En algunos casos, esto puede ser debido a las diferencias en el tipo de suelo, al afectar a la conducción y al almacenamiento de calor. Naturalmente, el manejo del suelo y la cobertura del cultivo también pueden afectar al almacenamiento de calor y al daño que se produce. Aunque normalmente no se cita como factor de selección del emplazamiento, la proximidad a gramíneas

y otras plantas con concentraciones elevadas de bacterias formadoras de núcleos del hielo pueden ser un factor que afecte al daño por helada.

FACTORES QUE AFECTAN AL DRENAJE DE AIRE FRÍO

1. Deberían eliminarse los obstáculos que impiden el drenaje de aire frío desde un cultivo pendiente abajo.
2. La nivelación de tierras puede mejorar el drenaje de aire frío y eliminar las zonas bajas donde se acumula el aire frío.
3. Las hileras de las plantaciones frutales y de los viñedos deberían orientarse a favor del drenaje natural del aire frío. Sin embargo, las ventajas que se derivan de orientar las hileras de los cultivos deben evaluarse frente a las desventajas de una mayor erosión y otros inconvenientes.
4. Minimizar las áreas en la parte superior de la pendiente, donde el aire frío puede acumularse y drenar en el cultivo. Por ejemplo, las hierbas y los rastrojos de las plantas en las áreas de la parte superior de la pendiente pueden hacer el aire más frío y favorecer el drenaje del aire frío en el cultivo.

Una característica universal de los agricultores es que son conscientes de los daños potenciales por helada y que estudian a fondo los emplazamientos antes de implantar un cultivo que pueda ser dañado por temperaturas bajo cero. Para algunos cultivos es deseable tener temperaturas frías (e.g. las temperaturas nocturnas frías favorecen la calidad de la uva para vino); sin embargo no es deseable tener temperaturas bajo cero que causan daño por heladas. La estratagema es disponer de un buen microclima para una producción de buena calidad sin que se produzcan daños debido a las temperaturas que produzcan pérdidas de rendimiento. Una buena estrategia económica, si se tienen temperaturas bajo cero de forma intermitente y poco frecuente, es utilizar un método de protección activo para evitar tener daños durante las heladas al mismo tiempo que se obtiene un efecto beneficioso de las bajas temperaturas. Sin embargo, para determinar la relación eficacia-coste, el coste de la protección y las pérdidas potenciales deben equilibrarse con los retornos incrementados por un producto de alta calidad.

En general, los cultivos crecen donde las condiciones meteorológicas son favorables, y el daño potencial por heladas es con frecuencia el factor limitante. Por ejemplo los cítricos se cultivan extensamente en la zona este del Valle de San Joaquín en California (EE.UU.) ya que los daños por heladas no son frecuentes. El Valle de San Joaquín tiene unas pendientes suaves de unos 100 km desde el borde este hacia el centro del valle siendo los cítricos cultivados en la zona situada en los 30 km más hacia el este. La principal época de lluvias en la región

es de diciembre a febrero, estando muy a menudo el cielo nublado. Sin embargo, incluso en periodos no nubosos, el Valle de San Joaquín tiene tendencia a la formación de niebla. Tanto la cobertura por nubes como la niebla incrementan la radiación de onda larga hacia abajo y reducen las pérdidas de radiación neta. La ocurrencia de una helada de radiación es poco frecuente en condiciones de niebla o de nubosidad ya que las pérdidas de radiación neta son menores. En raras ocasiones las temperaturas bajo cero ocurren durante condiciones de nubosidad asociadas con una helada de advección. No obstante, las heladas de radiación son más frecuentes en la zona que las heladas de advección.

Además de que las nubes y la niebla reduzcan la frecuencia de las temperaturas bajo cero, el aire frío también drena en dirección al oeste fuera del área de cítricos. La elevación es más alta en el este (i.e. donde se cultivan los cítricos) que en el fondo del valle hacia el oeste de la región. A escala regional, el aire frío drena lentamente hacia el oeste. Consecuentemente, un agricultor sin experiencia intentaría plantar cítricos más hacia el oeste donde el daño potencial por heladas es considerablemente más alto debido al drenaje de aire frío a escala regional.

Una tercera razón para cultivar cítricos en la zona es que la niebla se levanta por la tarde, y por tanto la luz del Sol puede incidir en el suelo y en las plantas para almacenar algo de calor durante el día. Esto no sería el caso en la cara oeste del valle ya que una cadena de montañas hacia el oeste bloquea la radiación hacia el final del atardecer. En la cara este del valle, la pendiente del terreno mira generalmente hacia el oeste, y por tanto durante la tarde la recepción de energía solar por unidad de superficie es mejor en la cara este del valle que en la cara oeste.

El primer paso a la hora de seleccionar un emplazamiento para realizar una nueva plantación es hablar con la gente del lugar sobre los cultivos y variedades que son apropiadas en la zona. Los cultivadores locales y los agentes de extensión tienen una acertada impresión sobre qué lugares pueden ser problemáticos. Se debería evitar plantar en áreas donde se forman en primer lugar las nieblas bajas cercanas al suelo. Las nieblas más cercanas al suelo son nieblas de radiación, y como las heladas de radiación, tienden a formarse en las zonas más frías. Esto no debería confundirse con las nieblas de inversión altas que se forman por encima de la superficie, o las nieblas de vapor que llegan del océano o de grandes superficies de agua. Las áreas con una inversión térmica alta o las nieblas de vapor son en realidad menos propensas a causar daño por helada.

El siguiente paso para identificar un buen emplazamiento para establecer una plantación es caracterizar la probabilidad y el riesgo de daño por helada observando los datos climáticos. Una buena fuente de datos climáticos es la base de datos de FAO CLICOM, a la cual se puede acceder a través del sitio web de

la FAO (http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_climwat.html). En las localidades donde no se dispone de datos climáticos o son muy limitados, vale la pena llevar a cabo un estudio de las temperaturas mínimas en el lugar donde se va a realizar la plantación durante al menos una estación de heladas antes de arriesgar pérdidas debidas al daño por helada. Idealmente, se debería registrar la temperatura del aire cada día con un sensor, que registre de forma continua, instalado dentro de una garita meteorológica estándar tipo Stevenson (Figura 6.1). Una ventaja de utilizar una garita Stevenson es que las temperaturas son entonces comparables con los registros climáticos de los servicios meteorológicos que

FIGURA 6.1

Garita meteorológica Stevenson



Foto: J P de Melo-Abreu (USA)

normalmente utilizan garitas Stevenson para proteger los instrumentos. Si posible, es preferible medir, también es deseable medir la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento. En décadas recientes, normalmente se utilizan sensores electrónicos. Si posible, es preferible medir de temperatura y de humedad y es preferible una protección de la radiación tipo Gill (Figura 6.2) más que una garita Stevenson. Como no son caros y son fáciles de construir, a menudo se utilizan las protecciones meteorológicas para heladas en frutales para medidas de temperatura nocturna durante las heladas (Figura 6.3). Independientemente de la protección del sensor, los sensores de temperatura están normalmente montados entre 1,25 y 2,0 m de altura por encima del nivel del suelo. La altura escogida debería ser la misma que la utilizada por el servicio meteorológico local. Algunos meteorólogos y agricultores utilizan un “índice actinotérmico”, que es simplemente un termómetro sin protección montado en un soporte de madera (Durand, 1965; Perraudin, 1965; Schereiber, 1965). El termómetro se monta a 0,1 m de altura para los cultivos bajos y a 0,5 m de altura

FIGURA 6.2

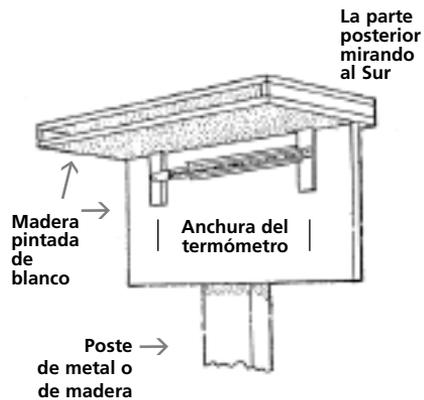
Pantalla de protección de la radiación tipo Gill para proteger los sensores de temperatura y de humedad relativa de la radiación de onda corta



Foto: J P de Mélo-Abreu (ISA)

FIGURA 6.3

Protección meteorológica para registrar la temperatura de las heladas en frutales para ser utilizada en el hemisferio Norte. En el hemisferio Sur debería girarse hacia el Norte



para los cultivos más altos. Como los termómetros no están protegidos, se pretende que la temperatura sea cercana a la de las ramas de las plantas. Para evaluar la conveniencia de un emplazamiento, recoger datos nocturnos de 10 a 20 noches frías y despejadas proporcionaría suficiente información para valorar el potencial de daño por helada (Bouchet, 1965).

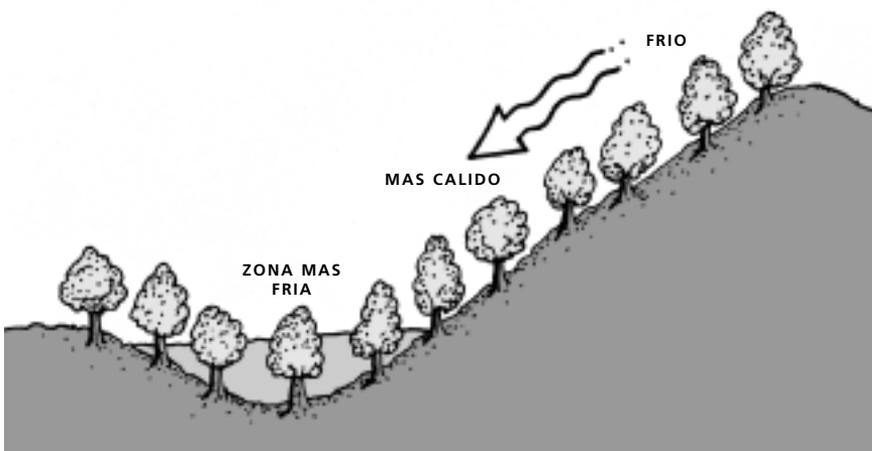
Drenaje de aire frío

El aire frío es más denso que el aire caliente, y por ello fluye ladera abajo y se acumula en las zonas más bajas como el agua (Figura 6.4). En consecuencia, se deben evitar las partes más bajas, por tanto más frías, a no ser que se disponga como estrategia de manejo a largo plazo de métodos de protección activa con una relación coste efectividad adecuada. Esto es importante tanto a escala regional como a escala de parcela.

Quizás uno de los mejores ejemplos de la protección contra el drenaje de aire frío a escala regional se encuentra en un campo de almendros al sur de Sacramento, California. El campo está junto a un río y está completamente rodeado por una cerca alta y sólida de madera (Figura 6.5). Al estar situado junto al río, el campo está en una zona baja del valle y donde son habituales las temperaturas frías. La cerca se construyó alrededor de los árboles como un dique contra el aire frío para proteger el cultivo del daño por helada. Además de la cerca contra el aire frío, el cultivo también dispone de ventiladores como un método de protección activo.

FIGURA 6.4

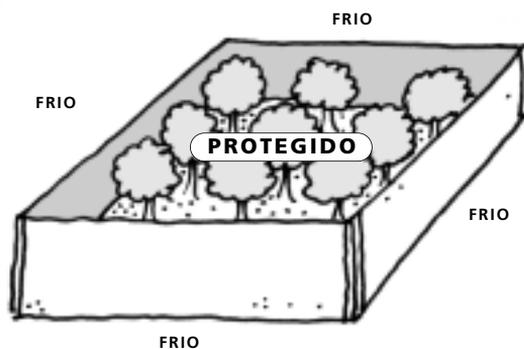
El aire frío fluye ladera abajo como el agua



El aire frío drena hacia abajo por la ladera y se establece en las zonas más bajas, donde hay más probabilidad de daño por helada.

FIGURA 6.5

Bloqueo del aire frío



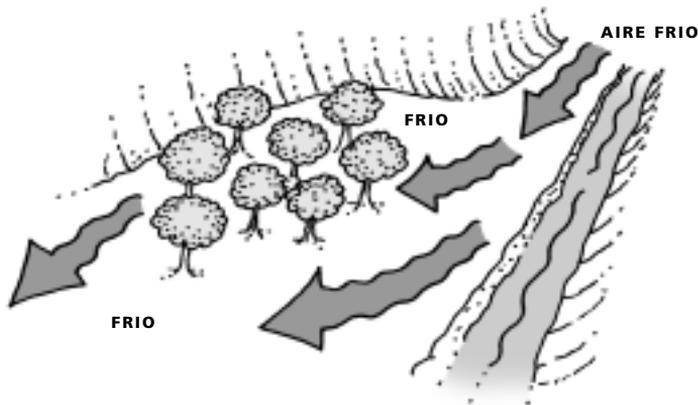
Cerca sólida construida alrededor de un campo de frutales para mantener fuera el aire frío.

A veces se utilizan árboles, arbustos, terraplenes, montones de heno y vallas, para controlar el flujo de aire en las áreas agrícolas próximas y el propio emplazamiento puede afectar el potencial de daño por helada. Si las vallas sólidas, los setos, los edificios, las carreteras elevadas, etc. bloquean el drenaje de aire frío desde un campo cultivado, el aire frío se embalsará detrás de la obstrucción causando potencialmente un daño por helada más grande. Este fenómeno ocurre a menudo cuando la topografía local se modifica debido a la construcción de una carretera o de un edificio. Un estudio en detalle de los mapas topográficos puede, a menudo, prevenir de problemas mayores debido al daño por heladas. También puede dar información, el uso de bombas de humo o de otros equipos de producción de humo para estudiar el flujo de aire frío pendiente abajo durante la noche. Estos estudios necesitan realizarse en noches con características de una helada de radiación, pero no necesariamente cuando la temperatura está bajo cero. Una vez que se conoce el patrón del flujo del drenaje de aire frío, entonces la colocación apropiada de obstáculos para la desviación del aire frío puede proporcionar un alto grado de protección.

Hay ejemplos donde desviar el drenaje de aire frío ha conducido a una protección efectiva contra las heladas. Un buen ejemplo es el de un productor de flor cortada de gran valor. El cultivo estaba localizado en un cañón a un lado de un río (Figura 6.6). En la cara opuesta del río desde el campo cultivado, las paredes del cañón eran escarpadas. En la zona cultivada del río, el suelo era relativamente llano, pero en la zona opuesta del campo desde el río la pared del

cañón de nuevo toma una pendiente escarpada hacia arriba. Pendiente arriba desde el campo, el cañón se estrecha hasta donde solamente el río atraviesa el cañón. Pendiente arriba desde allí, el cañón se ensancha hacia un área amplia relativamente llana. Durante las noches de helada, el denso aire frío se acumula sobre el área llana arriba de la pendiente de la zona estrecha del cañón. Mientras el viento predominante fluya suavemente pendiente arriba, el aire frío se mantendría en la zona pendiente arriba del cañón. Sin embargo, si se para el viento, al aire frío drenaría a través de la zona estrecha hacia el campo cultivado (Figura 6.6).

FIGURA 6.6

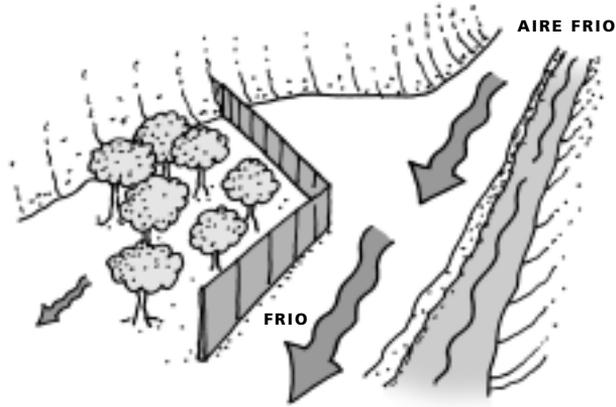
Drenaje de aire frío

El aire frío drena pendiente abajo a lo largo del valle de un río y dentro del campo de cultivo.

Después de estudiar los mapas topográficos del área, se decidió que construir una pared en el suelo o una cerca pendiente arriba del cultivo a lo largo del río contendría el flujo de aire frío y se movería alrededor del campo (Figura 6.7). Una vez construida la pared para desviar el aire frío, el agricultor fue capaz de reducir de forma importante el daño por helada al cultivo. La pared para desviar el aire frío puede realizarse acumulando suelo, construyendo una cerca, o simplemente apilando balas de heno.

FIGURA 6.7

Aire frío desviado



Flujo del drenaje de aire frío controlado utilizando una pared construida.

Pendiente y orientación

En general, plantar cultivos de hoja caduca en pendientes no encaradas hacia el Sol retrasa la floración en primavera y, con frecuencia, proporcionan una protección considerable. La probabilidad de congelación disminuye rápidamente con el tiempo en primavera y los cultivos de hoja caduca en las pendientes encaradas al Sol florecerán más temprano. Como resultado, los cultivos de hoja caduca en las pendientes encaradas al Sol son más susceptibles al daño por helada. Los árboles subtropicales (e.g. cítricos y aguacates) son dañados por la congelación independientemente de la estación, por ello es mejor plantarlos en las pendientes encaradas al Sol donde el suelo y el cultivo pueden recibir y almacenar más energía directa procedente del Sol.

Tipo de suelo y contenido de agua

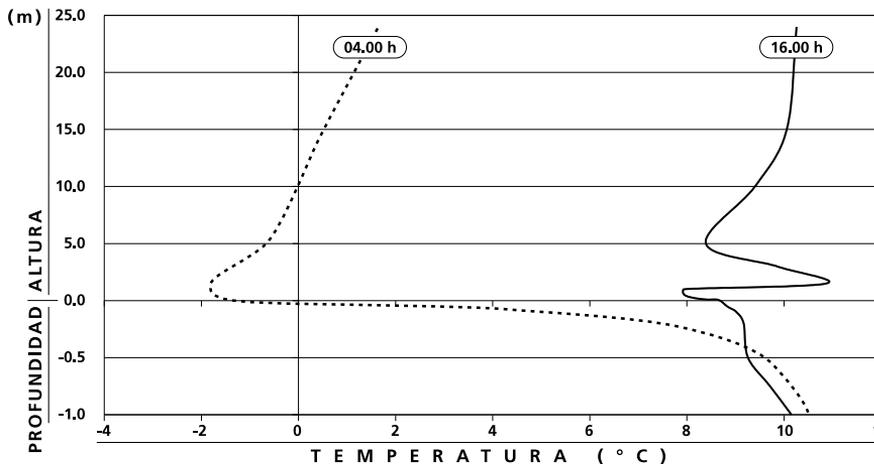
Los agricultores, en unas mismas condiciones topográficas y de clima general, encuentran, a menudo, diferencias en el daño provocado por las heladas que parecen inexplicables. Entre las posibles explicaciones se incluyen las diferencias en el tipo de suelo, en el contenido de agua en el suelo y en las concentraciones de bacterias formadoras de núcleos de hielo. El tipo de suelo es claramente uno de los aspectos a considerar en la selección del emplazamiento. Por ejemplo, las zonas pantanosas, recientemente drenadas, son altamente susceptibles a las temperaturas bajo cero (Blanc *et al.* 1963). Los suelos secos altamente orgánicos cerca de la

superficie tienen una conductividad térmica y capacidad de calor reducidas, lo que significa que se producirán unas temperaturas mínimas más frías. En otro ejemplo, Valmari (1966) indica que la temperatura mínima aumenta de 1 °C a 3 °C cuando el suelo mineral se mezcla con suelo orgánico. Claramente, el tipo de suelo afecta a las temperaturas mínimas, y los factores involucrados se discuten en este capítulo.

La Figura 6.8 muestra un perfil de temperatura del suelo cerca de la puesta de Sol (16.00 h) y a las 04.00 h durante una noche de helada en primavera en una plantación de manzanos en el Norte de Portugal. Hubo pocos cambios en la temperatura por debajo de los 0,3 m de profundidad en el suelo y la mayor parte de los cambios de temperatura se dieron cerca de la superficie. La temperatura del aire hasta 1,5 m de altura a las 04.00 h era casi isotérmica, pero por encima de este nivel aumentó con la altura hasta unos 2 °C a 24 m de altura.

FIGURA 6.8

Perfiles de temperatura del suelo y del aire en una plantación de manzanos cerca de Bragança, Portugal, cuando la temperatura de la superficie estaba en su máximo y mínimo. Observar que la escala de profundidad es distinta de la escala de altura



En general, los suelos con conductividad térmica y capacidad de calor más altas tienen un intervalo de temperatura en la superficie más pequeño (i.e. la diferencia entre la temperatura máxima y mínima en la superficie es más pequeña). Cuando el intervalo de temperatura es más pequeño, la temperatura mínima en la superficie y la temperatura del aire en el cultivo son normalmente más altas.

La conducción y el almacenamiento de calor en el suelo dependen de la densidad aparente, de la capacidad de calor, de la conductividad térmica y finalmente de la difusividad. La densidad aparente del suelo se expresa kg m^{-3} . Se denomina “aparente” porque el suelo es una mezcla de minerales, de material orgánico, de agua y de espacios de aire, todos ellos con distintas características. El calor específico de un suelo ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) es la energía necesaria para elevar en $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (1 K), 1 kg de suelo. Si se multiplica la densidad aparente por el calor específico da la capacidad de calor volumétrica (C_V) en $\text{J m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, que es la energía en julios necesaria para aumentar $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (1 K) la temperatura de un metro cúbico de suelo.

La conductividad térmica (K_s) en $\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ es un factor que relaciona la densidad del flujo de calor en el suelo (G) en W m^{-2} con el gradiente de temperatura en el suelo.

$$G = -K_s \left(\frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} \right) \text{ W m}^{-2} \quad \text{Ec. 6.1}$$

donde T_1 es la temperatura a la profundidad z_1 y T_2 es la temperatura a la profundidad z_2 , que está más alejada de la superficie. El signo menos se incluye para hacer G positivo cuando el flujo es hacia abajo. La conductividad térmica es una medida de cómo de rápido se transfiere el calor a través del suelo y la capacidad de calor es una medida de cuánta energía se necesita para aumentar la temperatura en $1 \text{ }^\circ\text{C}$. La difusividad (κ_T) en $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$, que es una medida de cómo de rápida la temperatura se propagará a través del suelo, viene dada por:

$$\kappa_T = \frac{K_s}{C_V} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \quad \text{Ec. 6.2}$$

Una estimación de los intervalos de temperatura en la superficie del suelo (R_o) en $^\circ\text{C}$, para un suelo con propiedades uniformes, viene dado por:

$$R_o = R_z \exp \left[z \left(\frac{\pi}{\kappa_T p} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 6.3}$$

donde (R_z) es el intervalo de temperatura en $^\circ\text{C}$ a la profundidad z en metros y (p) es el período de la oscilación en segundos (= $86\,400 \text{ s}$ por día). Para un valor fijado de R_z , R_o disminuye conforme aumenta la magnitud de κ_T . Para la protección contra las heladas, el objetivo es minimizar el intervalo de R_o , que se consigue al maximizar κ_T . Por ello, los suelos con una alta κ_T son menos propensos al daño por heladas y el contenido de agua en el suelo debería

manejarse para alcanzar la κ_T más alta posible durante los periodos sensibles de helada. En la Figura 6.9 se muestran ejemplos de características térmicas para suelos arenosos, arcillosos y orgánicos (turbas) (Monteith y Unsworth, 1990).

Los suelos de color oscuro, pesados y húmedos tienden a absorber más luz solar pero tienen una conductividad térmica más baja que los suelos arenosos más ligeros (Figura 6.9). En consecuencia, la difusividad es menor y son más susceptibles al daño por heladas. La capacidad de calor de un suelo orgánico (turba) cambia considerablemente, siendo menor que la de un suelo arenoso y arcilloso cuando están secos y mayor que cuando están húmedos. Sin embargo, la conductividad térmica es bastante baja independientemente del contenido de agua en el suelo. En consecuencia, la difusividad es baja y los cultivos en suelos orgánicos son considerablemente más susceptibles a los daños por heladas. Cuando se selecciona un emplazamiento en una región propensa a las heladas, hay que evitar plantar en los suelos orgánicos (turbas).

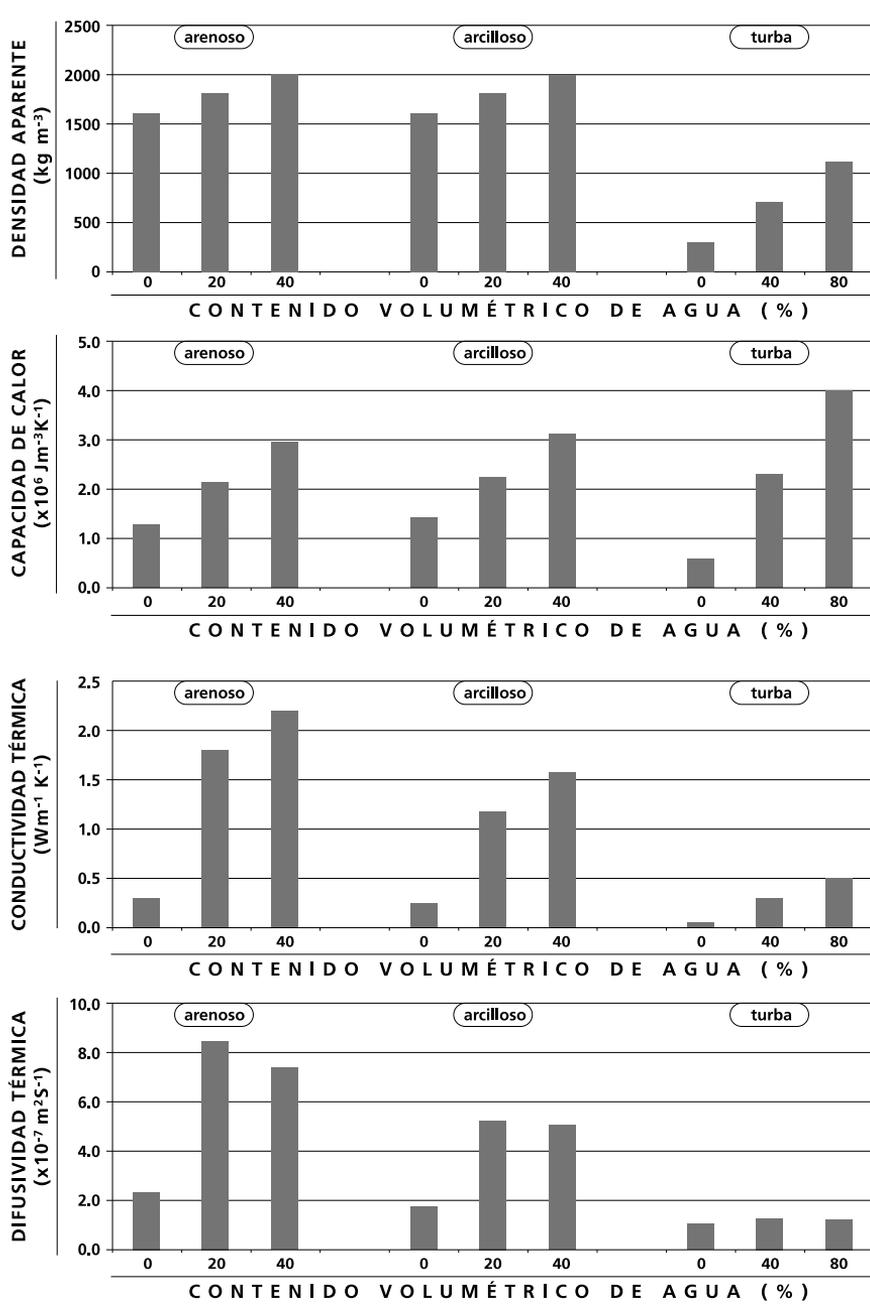
Observe que la difusividad es más alta para los suelos arenosos y arcillosos con un contenido volumétrico de agua del 20% (Figura 6.9). Esto implica que el calor se transfiere y se almacena más eficientemente cuando el suelo está húmedo pero no saturado. Por ello, si el suelo se humedece para mejorar el almacenamiento de calor, antes de una helada, debería humedecerse un día o dos con antelación para permitir el drenaje de agua gravitacional desde la capa de la superficie. Hay pocos cambios en la temperatura del suelo por debajo de los 0,3 m en una base diaria (Figura 6.8), por ello no hay ninguna ventaja en regar a profundidades más grandes. Como recomendación práctica, se debería intentar mantener los 0,3 m superiores del suelo cerca de la capacidad de campo, y por ello hay que permitir el drenaje 1-2 días antes de la helada.

A pesar de que capturar y almacenar más calor en el suelo es beneficioso para algunos cultivos (e.g. cítricos), puede ser más problemático para los árboles de hoja caduca y para las vides. Las plantas de hoja caduca cultivadas en estos suelos tienden a florecer más pronto en primavera, cuando hay una probabilidad más grande de temperaturas bajo cero. Una vez plantados el tipo de suelo en una plantación frutal o viñedo no puede cambiarse, pero plantar variedades con unas necesidades de frío más grandes retrasará la floración y puede reducir el riesgo de daño por helada de los frutales plantados en los suelos oscuros y pesados. Después de realizar la plantación, el suelo debería manejarse para mantener la conductividad térmica y la capacidad de calor tan altas como sea posible, lo cual mantendrá la temperatura mínima de la superficie del suelo lo más alta posible.

Un método sencillo para determinar el mejor manejo del agua del suelo para ser usado como protección contra las heladas es medir la temperatura mínima de la

FIGURA 6.9

Propiedades térmicas típicas de suelos arenosos, arcillosos y turbas (orgánicos) (basado en Monteith y Unsworth, 1990)



superficie del suelo cuando el suelo está expuesto a diferentes manejos. Para llevar a cabo el experimento se necesitaran varios termómetros de registro de mínimas. Cada día durante 5–7 días, se humedece una parcela distinta de suelo de 1,0 m² o más hasta unos 30 cm de profundidad. Después, durante varios días y noches con cielos relativamente despejados, se realiza un seguimiento de las temperaturas mínimas observadas de la superficie utilizando termómetros dispuestos horizontalmente en la superficie del suelo de cada parcela. La parcela que tenga la temperatura mínima observada más alta tiene el mejor contenido de agua para ese suelo. Hay que anotar el número de días desde que se humedeció el suelo que dio el mejor resultado. Entonces, si se pronostica una helada, hay que humedecer el suelo con esos días de antelación para alcanzar la mejor protección.

SELECCIÓN DE PLANTAS

Hay diferencias muy grandes en cuanto a la sensibilidad al daño por helada entre las variedades de los cultivos, y los asesores locales de los agricultores a menudo tienen información sobre qué variedades son más o menos propensas al daño por helada. De forma similar, algunos porta-injertos afectan a la tolerancia a las heladas de los cítricos (Powell y Himelrick, 2000). Se sabe que algunos porta-injertos retrasan la floración de los árboles de hoja caduca y esto puede ser beneficioso en las regiones propensas a las heladas. Por ejemplo, el porta-injerto de melocotonero Siberian C es resistente y bien adaptado a las condiciones de frío, y los porta-injertos Boone Country y Bailey, desarrollados en la zona centro de Norte América, son porta-injertos de floración tardía para los melocotoneros (Faust, 1989), que salen de la dormancia lentamente. En la industria de los cítricos, es bien conocido que las naranjas navel son más resistentes a las heladas sobre los porta-injertos trifoliados que cuando se cultivan sobre el porta-injerto de naranjo dulce. El porta-injerto limón rugoso (*Citrus jambhiri* Lush.) es el más frágil, el naranjo dulce es menos frágil, el naranjo amargo es bastante resistente, y el trifoliado es muy resistente a las heladas.

Es importante escoger plantas que evitan el daño desarrollándose y madurando durante periodos con riesgo bajo, y seleccionar plantas que son más tolerantes a la congelación. Por ejemplo, los árboles de hoja caduca y las vides normalmente no sufren daño por helada en los troncos, ramas o yemas dormidas. El hecho de seleccionar plantas de hoja caduca que tienen el desborre y la floración retrasadas, proporciona una buena protección ya que la probabilidad y el riesgo de daño por helada disminuyen rápidamente en primavera. En los cítricos, puede ser que la congelación no sea evitable en una localidad en particular, pero seleccionar variedades más resistentes aumenta la tolerancia a la temperatura bajo cero (Ikeda, 1982).

Cuando se selecciona un cultivo o una variedad para crecer en una localidad particular, debería considerarse el momento de los estadios sensibles y la temperatura crítica de daño (T_c) relativa a la probabilidad y al riesgo de temperatura bajo cero. Para los cultivos herbáceos, es importante determinar la fecha de plantación que minimiza el potencial de temperatura bajo cero. En algunos casos, los cultivos herbáceos no se plantan directamente en el exterior, sino que se plantan en ambientes protegidos y se transplantan al campo una vez que el daño de congelación ha pasado. Para los cultivos de hoja caduca y cultivos subtropicales, es de utilidad conocer la probabilidad y el riesgo de temperatura perjudicial durante el desarrollo temprano. Con este libro se incluyen algunos programas Excel sobre probabilidad y riesgo, y su utilización se discute en la sección de probabilidad y riesgo.

Si no se puede evitar los periodos con una elevada probabilidad de congelación, entonces las plantas son elegidas basándose en su tolerancia a las temperaturas bajo cero. Por ejemplo, los cítricos son más tolerantes a las temperaturas de congelación que los limoneros, y por ello plantar naranjos es más sensato en áreas sujetas a estas temperaturas. También es importante la selección de variedades de hoja caduca a plantar dentro de una región en lugares con diferente orientación. Por ejemplo, las variedades de floración temprana pueden plantarse en las pendientes orientadas en la umbría, que retrasa la floración, mientras que las variedades de floración tardía puede ser mejor plantarlas en las solanas.

ÁRBOLES QUE DAN COBERTURA

En climas fríos, la gente aparca sus coches bajo los árboles, durante la noche, para mantenerlos más calientes y evitar la formación de escarcha en las ventanas. Las temperaturas son más cálidas porque los árboles están más calientes que el cielo despejado y por ello la radiación de onda larga desde los árboles es más grande que desde el cielo. Un planteamiento similar se utiliza en ocasiones para prevenir el daño por helada a los cultivos. Por ejemplo, en el desierto del Sur de California, los agricultores plantan cultivos intercalados de cítricos y de palmeras datileras, parcialmente porque las palmeras datileras dan alguna protección contra las heladas a los cítricos. Como los dátiles también son un producto vendible, es un método eficiente para proporcionar protección contra las heladas sin experimentar pérdidas económicas.

Otro ejemplo sobre el uso de cubiertas vegetales para la protección se encuentra en Alabama donde los agricultores intercalan pinos en las plantaciones de pequeños mandarinos Satsuma (Powell y Himelrick, 2000). De nuevo, la protección contra las heladas proviene de favorecer la radiación de onda larga

hacia abajo desde los árboles. También, un método usual para proporcionar protección contra el daño por helada a las plantas de café en Brasil es intercalar las plantas con árboles que dan sombra para reducir las pérdidas de radiación neta. Por ejemplo, Baggio *et al.* (1997) informaban sobre una mejora desde el 50% al 10% de daño en hoja cuando árboles de sombreado espaciados a 10×14 m y 8×10 m fueron intercalados con las plantas de café en plantaciones en el Sur del Brasil. De forma similar, Caramori, Androcioli Filho y Leal (1996) encontraron buenos resultados cuando se intercaló *Mimosa scabrella* Benth. con plantas de café para protegerlas contra las heladas de radiación.

MANEJO DE LA NUTRICIÓN DE LAS PLANTAS

Se sabe que la fertilización nitrogenada y de otros nutrientes afecta a la sensibilidad al daño por helada. En general, los árboles enfermos son más susceptibles al daño y la fertilización mejora la salud de las plantas. Los árboles que no están adecuadamente fertilizados tienden a perder sus hojas más temprano en otoño, la floración es más temprana en primavera y aumenta la susceptibilidad al daño de las yemas por heladas. Powell y Himelrick (2000) recomendaban la poda en verano y/o la fertilización para mejorar el vigor en los melocotoneros, la fertilización en verano para los arándanos, pero no recomendaban la fertilización en verano para manzanos y perales.

La resistencia al daño por helada aumenta cuando las plantas acumulan fotosintatos en sus tejidos sensibles (Proebsting, 1978). En consecuencia, una buena nutrición y un buen estado sanitario de las plantas favorecen la aclimatación y la resistencia a la congelación (Alden y Hermann, 1971; Bagdonas, Georg y Gerber, 1978). Sin embargo, no está clara la relación entre nutrientes específicos y el aumento de la resistencia al daño por helada. Los ataques de parásitos, la defoliación, cosechas grandes y el retraso en las cosechas también pueden aumentar el daño por helada. Después del daño por helada, los árboles son más susceptibles al daño por insectos.

En general, el nitrógeno aumenta la susceptibilidad al daño por helada (Alden y Hermann, 1971; Bagdonas, Georg y Gerber, 1978). Sin embargo, Valmari (1966) encontró que las patatas eran menos sensibles a la congelación cuando la aplicación de fertilizante nitrogenado condujo a un crecimiento vegetativo exuberante antes de la helada. Bagdonas, Georg y Gerber (1978) citaban estudios que indican que plantas de judías verdes aumentaron la resistencia al daño por helada cuando se daban dosis altas de nitratos. Sin embargo, el aumento de tolerancia pudo resultar del hecho que las plantas más grandes tenían las vainas más alejadas de suelo donde la temperatura era menos fría. Para favorecer el

endurecimiento de las plantas, hay que evitar las aplicaciones de fertilizante nitrogenado al final del verano o muy pronto en otoño. El crecimiento nuevo tiende a tener menos solutos que las partes de las plantas más viejas que se han endurecido. Como los solutos en el agua contribuyen a disminuir el punto de congelación, cualquier actividad de manejo que favorezca el crecimiento, disminuye el contenido de solutos y aumenta la sensibilidad a la congelación.

Es conocido que el fósforo mejora la aclimatación de las plantas, pero también intensifica el crecimiento y el crecimiento nuevo es más sensible a la congelación (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978). Sin embargo, el fósforo también es importante para la división celular y por eso es importante para la recuperación de los tejidos después de la congelación. Muchas variedades con mayor tolerancia a las heladas tienen una absorción más alta de fósforo en suelos fríos, lo que conduce a la aclimatación (Alden y Hermann, 1971).

El potasio tiene un efecto favorable en la regulación hídrica y en la fotosíntesis de las plantas. Como el daño por helada a menudo resulta de la deshidratación del protoplasma, el aumento de potasio puede conducir a una mejor fotosíntesis y aclimatación. Sin embargo, los investigadores están divididos sobre los beneficios del potasio en la protección contra las heladas (Alden y Hermann, 1971; Ventskevich, 1958; Bagdonas, Georg y Gerber, 1978).

PODA ADECUADA

La poda favorece el nuevo crecimiento de los árboles, por ello se recomienda la poda tardía para los árboles de hoja caduca y para los viñedos. Retrasar la poda de los melocotoneros, durante la yema rosa o más tarde, reduce la muerte invernal de las yemas de la fruta y retrasa la floración (Powell y Himelrick, 2000). La poda tardía resulta en un total de yemas vivas más alto y un retraso de la floración. En zonas donde la temperatura de invierno es consistentemente bajo cero, la poda temprana permite la entrada de microorganismos patógenos a través de los cortes y acelera el crecimiento cerca de esos cortes (Savage, Jensen y Hayden, 1976).

Si las heladas dañan las yemas activadas por una poda temprana, todavía está disponible el recurso madera para la producción cuando se practica la doble poda (Blanc *et al.* 1963; Bouchet, 1965). Powell y Himelrick (2000) recomiendan podar primero las ramas más bajas y después, una vez que el daño por helada ha pasado, podar las ramas más altas. En una helada de radiación, el daño normalmente ocurre de abajo a arriba en las plantaciones de árboles de hoja caduca. En consecuencia, si se produce una helada, esta práctica mejorará las oportunidades de un buen cultivo.

Podar las cepas para subir más el fruto por encima del suelo proporciona alguna protección contra las heladas porque normalmente la temperatura aumenta con la altura por encima del suelo durante las noches de helada de radiación. En algunos casos, subir el fruto unos 0,3 a 0,5 m puede aumentar la temperatura en 1 °C o 2 °C. La densidad de la cubierta y la poda pueden afectar a la sensibilidad a las heladas de los árboles de hoja caduca. Las cubiertas muy cerradas con alta densidad aumentan indirectamente la sensibilidad al daño por helada por la reducción de la fotosíntesis y por lo tanto la acumulación de azúcar en la parte más baja de la cubierta donde hace más frío.

ENFRIAR PARA RETRASAR LA FLORACIÓN

Es bien conocido que hacer funcionar los aspersores durante los días cálidos en invierno puede retrasar la floración y con ello proporcionar una medida de protección contra las heladas (Anderson *et al.*, 1973; Proebsting, 1975). Los aspersores enfrían el cultivo debido a que la evaporación convierte el calor sensible en calor latente, lo cual produce la caída de la temperatura. La probabilidad de temperaturas bajo cero en primavera disminuye de forma importante durante periodos cortos de tiempo, por ello enfriar los cultivos para retrasar la floración disminuye las probabilidades de daño por helada.

La investigación en varias especies de árboles de hoja caduca ha demostrado que es posible el retraso de la floración en dos semanas o más aplicando la aspersión desde el final del reposo hasta la floración siempre que la temperatura del aire está por encima de 7 °C (Powell y Himelrick, 2000). Por ejemplo, Anderson *et al.* (1973) publicaron retrasos en la apertura de las yemas de 15 y 17 días para cerezos y manzanos, respectivamente, cuando se aplicó riego por aspersión a los árboles siempre que la temperatura del aire excedía los 6,2 °C entre la interrupción del reposo y el desborre. La aplicación de riego por aspersión para retrasar la floración se ha aconsejado como un método para retrasar la floración de los viñedos (Schultz y Weaver, 1977). Sin embargo, los beneficios de la aspersión dependen tanto de la humedad como de la temperatura. Cuando los aspersores están funcionando, la temperatura caerá cerca de la temperatura del bulbo húmedo, por ello hay poco beneficio en intentar enfriar mediante la aspersión en los ambientes húmedos donde la temperatura del punto de rocío está cercana a la temperatura del aire.

Aunque la investigación ha demostrado que la floración de los árboles frutales se retrasa con el funcionamiento de los aspersores, Powell y Himelrick (2000) observaron que el método no era ampliamente adoptado porque hay reducciones en la producción de los cultivos que no son bien entendidas (Powell y Himelrick, 2000).

Evans (2000) también publicó el uso de los aspersores para el retraso de la floración en manzanos y en melocotoneros. Sin embargo, recomendó no usar el procedimiento porque aunque la floración se retrasa el aumento de la sensibilidad de las yemas al daño por las heladas contrarresta los beneficios de retrasar la floración. Evans observó que las yemas recobran la resistencia después de ser humedecidas si se dejan secar durante un periodo frío. Aunque no se conocen investigaciones sobre el tema, otra posibilidad puede ser nebulizar el aire más que utilizar aspersores. Esto podría enfriar el aire sin añadir agua al suelo. Sin embargo, esto podría ser o no efectivo desde el punto de vista del coste dependiendo de la frecuencia e intensidad de la congelación en el área.

PRODUCTOS QUÍMICOS PARA RETRASAR LA FLORACIÓN

Los crioprotectores y los antitranspirantes se venden y se usan como protección contra el daño por helada. Sin embargo, no se ha encontrado que ninguno de estos materiales proporcione de una forma consistente protección a las yemas florales, a las flores, a las frutas pequeñas o a los frutos secos pequeños. El regulador del crecimiento que libera etileno “Etefón” aumenta la resistencia de las yemas y retrasa la floración de 4 a 7 días si se aplica pronto en otoño al comienzo del enfriamiento (Powell y Himelrick, 2000). Se ha utilizado en melocotoneros y cerezos. El ácido giberélico retrasa la floración de algunos cultivos, pero se necesitan aplicaciones múltiples y es caro. Se sabe que las aplicaciones de giberelinas o de ácido α -naftalenacético durante los días cálidos a finales de invierno y en primavera retrasan la salida de hojas (Nigond, 1960; Schultz y Weaver, 1977).

El utilizar reguladores de crecimiento para reducir la actividad del cambium y prolongar la dormancia ayuda tanto a los árboles de hoja perenne como a los árboles de hoja caduca a tolerar las temperaturas bajo cero. Está generalmente aceptado que un retraso del crecimiento reduce el alargamiento de las células. Además, las células más pequeñas tienen concentraciones más altas de solutos, lo cual les ayuda a evitar la congelación.

LAS CUBIERTAS DE PLANTAS

Las cubiertas de hileras de plantas aumentan la radiación de onda larga hacia abajo durante la noche y reducen las pérdidas de calor al aire por convección del calor (y advección). Las cubiertas deben tener un coeficiente de conducción bajo e idealmente deberían ser opacas a la radiación de onda larga. El suelo seco tiene una conductividad térmica más baja, por ello algunas veces se ha utilizado para cubrir plantas pequeñas (e.g. patatas, tomates y las plantas de café) o para proteger los

troncos de los árboles jóvenes durante periodos bajo cero de corta duración. En algunos países con inviernos severos, el suelo se amontona para cubrir el injerto de los cítricos jóvenes para proteger los troncos de las heladas (Blanc *et al.* 1963).

Las cubiertas con paja se usan, extensivamente en Suiza, para la protección contra las heladas de las vides. Sin embargo, debido a una aplicación más fácil, la paja está siendo sustituida con materiales sintéticos. Ambos tipos de recubrimientos se dejan sobre las plantas hasta que ha pasado el peligro de congelación (Peyer, 1965). Las esteras y otros materiales aislantes también se han utilizado en la India para proteger las plantas de té (*Camellia sinensis*) de la congelación (Von Legerke, 1978). En Portugal, los métodos de protección de plantas individuales incluyen (1) esteras horizontales o inclinadas para los árboles jóvenes; (2) protecciones de formas diversas para plantaciones pequeñas de cítricos o de arbustos de jardín; (3) envolturas de caña enrollada alrededor de los troncos de los árboles jóvenes; y (4) tejas, protecciones de adobe, hojas de plantas, etc., para plantas pequeñas. Para hileras de plantas, los métodos incluyen (1) esteras horizontales más grandes o inclinadas para hileras de árboles; (2) protecciones formando media cabaña con paredes verticales encaradas a la dirección de los vientos predominantes; y (3) capas de paja sobre los viveros hortícolas, donde las esteras y los abrigos utilizan materiales locales (e.g. paja, bambú, madera, tableros, heno, etc.) (Abreu, 1985).

Aunque los materiales empleados como cubiertas, en general, no son caros, la mano de obra que se necesita para su aplicación puede hacerlos prohibitivos. Generalmente, este método se utiliza únicamente en pequeñas plantaciones o sobre plantas pequeñas que no requieren una estructura sólida. A veces, se dan problemas de enfermedades debido a una mala ventilación.

Las cubiertas para hileras se utilizan a veces para la protección de cultivos de alto valor. Normalmente se utilizan los plásticos de polipropileno tejidos (woven) y no tejidos (spunbonded) y el grado de protección varía con el espesor del material (e.g. desde 1 °C para las hojas delgadas de plástico hasta 5 °C para el plástico grueso). Los plásticos blancos proporcionan algo de protección y a veces se utilizan en plantas de vivero. Normalmente no se utilizan para la protección de cultivos frutales y hortícolas. Schultz (1961) publicó que láminas de polietileno negro de 1,2 m de ancho, se utilizaron para cubrir hileras de vides y que la temperatura del aire cercana al follaje aumentó en unos 1,5 °C.

Las cubiertas de plástico transparente permiten que la luz del Sol pase a su través durante el día y hacen más lenta la pérdida de calor desde la superficie durante la noche. La radiación hacia abajo desde el cielo, durante la noche, depende de su temperatura aparente, pero cuando se cubren con plástico, la

radiación hacia abajo depende principalmente de la temperatura del plástico de la cubierta. Como las capas superiores de aire están mucho más frías que el aire cerca del suelo y el plástico tendrá una temperatura más cercana a la temperatura del aire, la radiación hacia abajo se ve favorecida cubriendo las plantas. Si se forma condensación debajo del plástico, esto liberará calor latente, calentará el plástico y proporcionará incluso más protección. Bajo condiciones de helada de advección, las cubiertas plásticas también pueden bloquear el viento y proporcionar alguna protección. Algunas características de las cubiertas para aplicar por encima de las plantas en hilera se dan en la Tabla 6.1.

Para cubrir las plantas y para sujetar el plástico se utiliza una amplia variedad de métodos. Para que las plantas no sean tocadas por las cubiertas de plástico, a veces se montan sobre unos aros. Si no, el plástico puede flotar sobre la cubierta vegetal y subir conforme el cultivo crece, pero son más probables los problemas por enfermedades. Los invernaderos de PVC se utilizan a veces para proteger a los cítricos. El plástico puede utilizarse hasta tres años dependiendo del diseño estructural y de la calidad del plástico.

Un problema común es que los requerimientos de mano de obra para instalar las cubiertas son altos y en consecuencia el valor del cultivo debe ser alto. También, las plantas se hacen menos resistentes contra la congelación y, a menudo, hay problemas con la polinización si las cubiertas no se eliminan después de la helada. Los costes de mano de obra no han fomentado la amplia expansión en el uso de las cubiertas de plástico.

Para heladas particularmente severas, los túneles o invernaderos de plástico se calientan. Los túneles se calientan utilizando agua caliente, electricidad, vapor de agua, aire caliente, etc. Las dificultades relacionadas con la ventilación y la mecanización hacen que aumente la popularidad de los túneles grandes, tanto con como sin calefacción. Las cubiertas reducen ligeramente la penetración de la luz, pero muchos materiales permiten la penetración del agua y de los pesticidas.

Caplan (1988) reportó que las cubiertas plásticas protegieron cultivos hortícolas jóvenes de temperaturas tan bajas como -2°C durante periodos cortos de tiempo. Las cubiertas con perforaciones para la ventilación proporcionan alrededor de 1°C de protección, mientras que las cubiertas flotantes para hileras pueden proteger hasta unos -2°C . La formación de túneles con plástico se considera la cubierta temporal más eficiente. Tiene una mayor estabilidad y resistencia al daño por viento, y puede colocarse mecánicamente. Las dimensiones varían de acuerdo con el cultivo, la amplitud de la lámina de plástico, y las restricciones vienen impuestas por la máquina de instalación y las necesidades de ventilación. En Japón, los agricultores utilizan túneles de plástico

cubiertos por esteras de paja hechas de cañas, bolsas de papel, paja de arroz y otros materiales locales obteniendo una buena protección. Han desarrollado máquinas para ondular las esteras de paja de arroz para cubrir los cítricos como protección contra las heladas (Ikeda, 1982).

TABLA 6.1

Características de las cubiertas para la protección contra las heladas

TIPO DE CUBIERTA	PROTECCION	COMENTARIOS
Polietileno transparente (con anillas o aros)	Razonable	Económico – Mano de obra intensiva
Polietileno transparente (flotante)	Razonable	Acumulación de calor excesiva
Polietileno con cortes (slitted)	Razonable	Permite que se escape el calor – difícil de instalar
Polietileno perforado	Razonable	Acumulación de calor excesiva
Poliéster hilado “Spun bonded” (flotante)	Buena	Posible abrasivo – Coste elevado
Polipropileno hilado “Spun bonded” (flotante)	Buena	Coste elevado
Polipropileno “Extruded” (flotante)	Pobre	Económico – Se quiebra fácilmente

FUENTE: de la publicación de divulgación de la Universidad de Georgia: Cold Weather and Horticultural Crops in Georgia: Effects and Protective Measures.

EVITAR EL LABOREO DEL SUELO

El laboreo del suelo debería evitarse durante los periodos en que se espera que las heladas puedan dañar a los cultivos. El suelo tiene muchos espacios con aire, y el aire es un pobre conductor y tiene un calor específico bajo. En consecuencia, el suelo con más espacios y más grandes tenderá a transferir y a almacenar menos calor. El laboreo tiende a crear espacios de aire en el suelo y en consecuencia hace que el suelo sea más frío. Por ejemplo, en Holanda, Smith (1975) publicó que el laboreo en primavera favorecía más los daños por helada que si el laboreo se realizaba en otoño. Si se labra un suelo, se pasa el rodillo para romper los terrones y compactar el suelo, seguido de un riego,

mejorará la transferencia y almacenamiento del calor al disminuir el tamaño de los poros del suelo y aumentar la conductividad térmica y la capacidad de calor (Brindley, Taylor y Webber, 1965).

EL RIEGO

La conductividad térmica y el contenido de calor de los suelos están afectados de forma importante por el contenido de agua del suelo, y entre los suelos secos y los húmedos se observan diferencias considerables en la conductividad térmica y en la capacidad de calor (Figura 6.9). Casi todos los artículos sobre protección contra las heladas recomiendan mantener la capa más superficial del suelo húmeda, pero no saturada. Snyder, Paw U y Thompson (1987) recomendaban humedecer hasta una profundidad de 30 cm ya que la variación de temperatura diurna es insignificante por debajo de 30 cm. La cantidad a aplicar varía de acuerdo con el tipo de suelo y el contenido de agua previo. Normalmente, son suficientes 25 mm para suelos ligeros (arenosos) hasta 50 mm para suelos pesados (arcillosos).

En una base anual, la transferencia de calor por debajo de los 30 cm de profundidad del suelo es importante y puede afectar a la protección contra las heladas si un suelo está seco por un periodo largo de tiempo. Consecuentemente, si el suelo está seco y se espera poca precipitación antes del período de heladas, humedecer el suelo hasta una profundidad de 1,0 a 1,5 m resultará en una temperatura de la superficie del suelo más alta durante los períodos de heladas. Los agricultores a veces humedecen sus suelos antes de una noche bajo cero para oscurecer el suelo y aumentar la absorción de la radiación solar; sin embargo, hay más evaporación desde la superficie del suelo húmedo, por ello el beneficio de humedecer un suelo para oscurecerlo es normalmente compensado por el aumento de pérdida de energía por evaporación.

ELIMINAR LAS CUBIERTAS DE LOS CULTIVOS

Cuando en una plantación frutal o en un viñedo están presentes cubiertas herbáceas o malas hierbas, más radiación solar es reflejada desde la superficie y hay más evaporación durante las horas diurnas. Como consecuencia, la cantidad de energía almacenada en el suelo durante el día es reducida por la cubierta y entonces hay menos energía disponible para la transferencia de calor hacia arriba durante la noche de helada. La vegetación también afecta a la transferencia de energía desde el suelo hasta la superficie radiante en la parte superior de la vegetación y esto puede tener un efecto en las diferencias de temperatura entre el suelo desnudo y las cubiertas vegetales. Como consecuencia, una plantación frutal o un viñedo con una cubierta herbácea o de malas hierbas es más dada al

daño por helada que una con el suelo desnudo entre las hileras (Blanc *et al.*, 1963; Bouchet, 1965; Snyder, Paw U y Thompson, 1987). En la literatura se han publicado, como efecto de las cubiertas entre las hileras, amplias variaciones en la temperatura, pero todas ellas, en general, coinciden en que la presencia de la cubierta entre las hileras aumentará el potencial de daño por helada.

Snyder y Connell (1993), con un termómetro de infrarrojos, encontraron que la temperatura superficial de los suelos desnudos estaba generalmente de 1 °C a 3 °C más alta que los suelos con una cubierta herbácea o de malas hierbas más alta de 0,05 m durante febrero y marzo. La cubierta se eliminó con un herbicida a principios de diciembre, por ello el suelo de la plantación tuvo unos dos meses para desarrollar una cubierta y mostrar diferencias de temperatura. Sin embargo, durante el invierno, la meteorología fue generalmente nubosa y con niebla. En la mayoría de días, encontraron que el suelo de la plantación frutal con la cubierta de hierbas estaba más frío, pero se encontró una excepción después de varios días de un viento fuerte y seco. El viento pareció secar la capa superficial de suelo desnudo más que la del suelo cubierto con hierbas, al disminuir la conductividad térmica e inhibir el almacenamiento de calor. Después de este periodo, el suelo desnudo estuvo más frío que el suelo cubierto por las hierbas. Consecuentemente, tras varios días de viento secante, se recomienda humedecer la superficie de una suelo desnudo para mejorar la transferencia y almacenamiento de calor.

Se estudiaron varias estrategias para el control de malas hierbas para determinar el efecto sobre la temperatura mínima a la altura del cordón (1,2 m) en la viñas en el Valle de Napa de California (Donaldson *et al.*, 1993). Los métodos incluyeron la siega, el laboreo y el uso del herbicida glifosato en post-emergencia. La siega se realizó justo antes de que se tomaran las medidas y el laboreo se realizó dependiendo de las condiciones meteorológicas y del suelo. Los herbicidas se aplicaron antes de que las malas hierbas alcanzaran los 0,15 m de altura a finales de febrero o principios de marzo. En algunos casos, se repitieron las aplicaciones de herbicida.

En la Tabla 6.2 se muestra una comparación del número de días cuando las parcelas segadas o tratadas con herbicida tenían la temperatura mínima más caliente, más fría o aproximadamente igual que las parcelas cultivadas. Los resultados indican que la siega y el laboreo tienen efectos similares sobre la temperatura mínima, siendo la siega ligeramente más fría. Sin embargo, la aplicación de herbicida para el control de las malas hierbas resultó en la misma temperatura mínima o más caliente la mayoría de días. Un análisis de frecuencias y un análisis chi-cuadrado indicó que la temperatura mínima fue generalmente 0,25 °C a 0,5 °C más alta que los otros tratamientos. En un

TABLA 6.2

Número de días en que la siega o los tratamientos herbicidas tuvieron una temperatura mínima más cálida, igual o más fría que el tratamiento de laboreo en viñedos desde marzo hasta mayo de 1987 hasta 1989

ANO	SIEGA			TRATAMIENTO HERBICIDA		
	más cálido	igual	más frío	más cálido	igual	más frío
1987	7	39	18	24	21	4
1988	13	44	22	58	21	1
1989	4	32	7	17	23	2

experimento distinto, Leyden y Rohrbaugh (1963) encontraron un aumento medio de $0,9^{\circ}\text{C}$ en la temperatura a 1,5 m de altura en sólo una noche de helada, cuando se eliminaron las hierbas con herbicidas respecto a mantener una cubierta de hierbas en el cultivo. Como hay muchos factores meteorológicos, de suelo y de planta que afectan a la temperatura medida sobre las cubiertas de los cultivos, es imposible dar valores de protección universal relacionados con el manejo de cubiertas. Sin embargo, eliminar o minimizar las cubiertas de hierbas en las plantaciones frutales y en los viñedos se sabe que es definitivamente beneficioso. Hay muchos ejemplos de experiencias de agricultores que han tenido pérdidas severas en cultivos con cubiertas mientras que las pérdidas en los mismos cultivos sin cubierta fueron mínimas.

En el experimento de Donaldson *et al.* (1993), las diferencias en la temperatura mínima se atribuyeron al hecho de que la hierba segada se mantuvo en el suelo del viñedo e impidió que la radiación solar alcanzase la superficie del suelo y reduciéndose la conductividad térmica y el calor específico en el suelo cultivado. El laboreo crea espacios de aire que aíslan de la transferencia de calor y aumenta la evaporación, que disminuye el contenido de agua del suelo y reduce la capacidad de calor. Sin embargo, el suelo no se compactó después del laboreo y esto pudo haber mejorado la protección. Los suelos tratados con herbicidas estaban más limpios y más firmes y húmedos que los otros dos tratamientos.

Las cubiertas con plantas altas (i.e. gramíneas y malas hierbas) aíslan el suelo de la transferencia de calor y pueden dificultar el drenaje de aire frío, resultando en un mayor daño por helada. Sin embargo, las cubiertas más altas proporcionan una superficie para la congelación mayor en sistemas de protección contra las heladas por aspersión bajo los árboles y en consecuencia, en estos casos, podría ser beneficioso (Evans, 2000). Una investigación en Bolonia, Italia (Anconelli *et al.*, 2002) también demostró que las cubiertas altas son beneficiosas cuando se

utilizan aspersores bajo los árboles. Su hipótesis es que la temperatura de la superficie humedecida se mantiene cerca de los 0 °C y subir la altura de la superficie haciendo crecer una cubierta aumentaría la temperatura por encima de los 0 °C. Aunque la protección puede verse favorecida por la presencia de una cubierta alta es más probable que se necesite un método de protección activo cuando hay una cubierta en el suelo.

Se han observado grandes variaciones en las concentraciones de bacterias activas en la nucleación de hielo (INA) sobre diferentes cultivos. En algunos casos, las concentraciones son bajas (e.g. cítricos y vides). Sin embargo, la concentración de bacterias INA sobre pastos y malas hierbas y en cultivos de cereales es normalmente alta. Por tanto, la presencia de cubiertas de cultivos dentro de una plantación frutal o de un viñedo, o cultivos de cereal cerca de un cultivo sensible, aumenta las concentraciones de bacterias INA y el potencial de heladas.

CUBIERTAS DEL SUELO

Cubiertas del suelo plásticas

Cubrir el suelo directamente con plástico para subir la temperatura de la superficie es un método viable que puede proporcionar alguna protección. Esto es especialmente cierto para pequeñas plantaciones (e.g. jardines o pequeñas plantaciones frutales), donde no están disponibles otros métodos de protección. Debido a que la temperatura del aire por encima del suelo está relacionada con la temperatura de la superficie, cualquier manejo que suba la temperatura mínima de la superficie proporcionará una protección adicional. A menudo, puede realizarse un análisis sencillo para verificar los beneficios de la estrategia de manejo. Por ejemplo, un cultivador de cítricos cuestionado sobre si es mejor mantener o eliminar un plástico transparente en el suelo de una plantación recientemente plantada antes de que llegue el periodo de heladas. Si la temperatura mínima de la superficie registrada durante la noche es consistentemente más caliente para la superficie cubierta con plástico que para la superficie no cubierta, entonces es mejor dejar el plástico sobre el suelo. Si el suelo cubierto con plástico tiene una mínima más fría, entonces debería quitarse. Se sugirió al agricultor eliminar una pequeña sección del plástico y emplazar al anochecer, después de la puesta de Sol en noches frías, unos cuantos termómetros de registro de mínimas sobre el suelo desnudo y otros pocos sobre el plástico. De hecho, el ensayo no tiene que realizarse obligatoriamente durante condiciones bajo cero. Se instruyó al agricultor para registrar las temperaturas y anotar que superficie tuvo una temperatura mínima más fría. La superficie con la temperatura más cálida es la más deseable como método de protección pasivo.

Aunque los experimentos no se han publicado, los autores han observado que los acolchados de plástico claro, que aumentan la transferencia de calor en el suelo, normalmente mejoran el almacenamiento de calor resultando en una temperatura mínima de la superficie más alta. Como la temperatura de la superficie está estrechamente relacionada con la temperatura del aire en la cubierta vegetal, tener una temperatura de la superficie más alta proporcionará algo de protección. El plástico negro absorbe una cantidad de radiación considerable, pero el espacio de aire entre el plástico y el suelo inhibe la transferencia de calor hacia el suelo donde la capacidad de calor es mayor. En consecuencia, el plástico negro es menos efectivo para la protección contra las heladas.

Humedecer el suelo antes de cubrirlo con plástico mejorará el posterior almacenamiento de calor, lo que hace subir la temperatura mínima de la superficie y proporciona más protección. Esto es especialmente cierto para el plástico claro, que permite que más energía radiante alcance la superficie del suelo. Parte de las razones para un aumento de la temperatura de la superficie, cuando el suelo es humedecido antes de colocar el plástico, es que se evaporará el agua del suelo y se condensará en la parte interior del plástico conforme la cobertura se enfríe, hasta la temperatura del punto de rocío. Esto cambiará el calor latente a calor sensible bajo el plástico y ayudará a mantener la temperatura de la superficie más caliente.

Cubiertas orgánicas

Los acolchados con residuos vegetales reducen la transferencia de calor hacia el suelo y favorecen que los cultivos puedan sufrir heladas. Snyder, Pherson y Hatfield (1981) investigaron el efecto de eliminar el mantillo de hojas en las temperaturas mínimas en plantaciones de cítricos y encontraron que no había beneficio al eliminar el mantillo de hojas de los cítricos. Sin embargo, O'Connell y Snyder (1999) encontraron que eliminar el mantillo, tanto entre las hileras como bajo los árboles, era beneficioso. Parte de la diferencia entre los dos experimentos se atribuyó a las diferencias en la poda de los árboles. Después del primer experimento, los agricultores empezaron a podar los árboles para permitir que más luz solar alcanzara el suelo de la plantación. Basándose en estos experimentos, la eliminación del mantillo de hojas de entre medio de las hileras puede tener algún beneficio para la protección contra las heladas.

En los climas muy fríos donde el agua del suelo se congela, el empuje del suelo puede dañar a las raíces. Donde existe una cubierta de nieve, el daño de las raíces debido al empuje del hielo es menos probable ya que la nieve aísla de los grandes cambios diarios de la temperatura del suelo. Cuando no hay nieve, los acolchados orgánicos se utilizan a veces para reducir las variaciones diarias en la temperatura

del suelo y el daño de las raíces debido al empuje del hielo. Sin embargo, deben evitarse los acolchados orgánicos en las plantaciones donde el suelo no se congela ya que durante el día se almacena menos calor en el suelo.

La existencia de un acolchado orgánico (e.g. paja, serrín) reduce la evaporación, pero disminuye la temperatura mínima diaria del aire. El acolchado reduce el flujo de calor desde el suelo hacia la superficie, causando unas temperaturas mínimas de la superficie, que conduce también a una temperatura del aire mínima. Por ejemplo, los cultivadores de fresas conocen el peligro que resulta de una aplicación temprana de acolchado en primavera (Bouchet, 1965).

PINTAR LOS TRONCOS

La corteza de los árboles de hoja caduca a veces se separa debido a grandes fluctuaciones de la temperatura. Cuando el Sol de repente queda obstaculizado, la temperatura de la corteza de los árboles puede caer y causar grietas longitudinales. Las diferencias entre las temperaturas del aire y de la corteza del orden de 20 °C son observadas normalmente en la cara soleada de los troncos de los árboles de hoja caduca donde el daño es peor. Un método para reducir este problema es pintar los troncos con una pintura blanca de látex diluida con un 50% de agua para reflejar la luz del solar durante el día (Powel y Himelrick, 2000). No hay que utilizar pinturas tóxicas ni que utilicen como base el aceite. Es mejor pintar los troncos a finales de otoño cuando la temperatura del aire está por encima de los 10 °C. Además de evitar las grietas, la pintura blanca, el aislamiento o otras envolturas se sabe que mejora la resistencia al daño por helada en melocotoneros (Jensen, Savage y Hayden, 1970). Las pinturas o envolturas disminuyen las altas temperaturas del cambium a finales de invierno debido a la radiación diurna en el tronco que hubiera reducido la resistencia. Se ha descrito que pintar de blanco la corteza de los manzanos reduce de forma importante la temperatura de la corteza y se retrasa unos días la floración (Zinoni *et al.*, 2002a), lo que reduce el riesgo de daño por helada.

ENVOLTURAS DE TRONCOS

Es normal el uso de envolturas aislantes para proteger los cítricos jóvenes (Fucik, 1979). Las envolturas aislantes están hechas de materiales que contienen espacios de aire que resisten la transferencia de calor. Sin embargo, si los espacios se rellenan de agua, la conductividad del material aumenta de forma importante. Por ejemplo, un cocinero cogería inmediatamente una cazo caliente con una almohadilla seca, pero ningún cocinero con experiencia utilizaría una almohadilla húmeda. La conductividad térmica de la almohadilla húmeda es mucho más

grande ya que los espacios de aire están llenos de agua, y por ello el calor se transferirá rápidamente a través del material. De forma similar, un factor crítico al usar envolturas aislantes es estar seguro que los espacios de aire en el material no se llenan con agua.

Fucik (1979) publicó que las envolturas de fibra de vidrio y de poliuretano alrededor de los troncos de los árboles aumentó la temperatura dentro de la envoltura unos 8 °C por encima de la temperatura mínima del aire. Las envolturas de los troncos disminuyen el ritmo de caída de la temperatura y, como resultado, el tiempo de exposición a una temperatura perjudicial se ve reducido. Fucik y Hensz (1966) recomendaron el uso de la relación de la tasa de cambio de la temperatura de la corteza por hora respecto al cambio de la temperatura del aire por hora como una medida de la eficiencia de las envolturas. Se ha sugerido un valor de 0,45 para una buena protección de las envolturas. Fucik (1979) reportó de relaciones de 0,47; 0,58 y 0,92 para poliuretano de 76 mm, poliuretano de 25 mm y para envolturas de “flujo de aire”, respectivamente, durante una noche en que la temperatura del aire caía a 1,11 °C h⁻¹. Los troncos envueltos con poliuretano de 76 mm no se dañaron, mientras que los troncos se congelaron para las otras dos envolturas. Savage, Jensen y Hayden (1976) encontraron que las relaciones entre las temperaturas del aire y de la corteza de una envoltura con una lámina de aluminio cubierta con fibra de vidrio fueron de 0,38, que es comparable con el poliuretano de 76 mm.

Incluso durante las heladas de advección importantes, los troncos de los cítricos jóvenes (naranjos; vides o naranjos amargos) se han protegido con fibra de vidrio sostenido por una red de alambre, y con espuma de poliuretano (Fucik, 1979; Hensz, 1969b). Cuando las partes no protegidas son dañadas, crece una nueva cubierta desde el injerto en 2–3 años. Normalmente, las envolturas de los troncos se eliminan después de unos 3 a 4 años (Fucik, 1979). Se publicó que envolver los troncos de cítricos jóvenes con bolsas de agua da mejor protección que la fibra de vidrio o la espuma de poliuretano (Raposo, 1967). Cuando el agua se congela, libera calor latente y ralentiza la caída de temperatura en la superficie del tronco.

Fucik (1979) estimó el coste de envolver los troncos de los árboles en unos \$0,20 más por árbol que el coste anual de construir y remover montones de tierra. Como las envolturas son relativamente libres de mantenimiento y el único coste adicional es de unos \$0,15 por árbol para retirarlas después de 3-4 años, utilizar envolturas permanentes de los árboles es más efectivo desde el punto de vista del coste. El poliuretano no atrae a los roedores y las envolturas también ayudan a proteger el tronco de otros daños. El principal inconveniente es el aumento potencial de problemas por enfermedades. La podredumbre de las raíces (*Phytophthora*

parasitica) puede ser un problema cuando se utilizan envolturas de árboles. Por ello, las uniones de los injertos deberían estar por lo menos 0,15 m por encima del suelo. Las aplicaciones de fungicidas antes de la envoltura pueden ayudar a reducir la podredumbre de las raíces. Las envolturas necesitan atarse de forma ajustada alrededor del tronco para evitar el daño en las superficies expuestas.

CONTROL DE BACTERIAS

El agua se derrite pero no necesariamente se congela a 0 °C. Para que ocurra la congelación ha de iniciarse la formación de hielo (i.e. formación de núcleos de hielo). La formación de núcleos de hielo homogéneos ocurre cuando el agua líquida se ha superenfriado a temperaturas muy bajas (e.g. normalmente más bajas de -40 °C) y las moléculas de agua se organizan en una estructura cristalina (hielo) sin que materiales foráneos o la agitación inicien el proceso. La formación de núcleos heterogéneos ocurre cuando el agua superenfriada es agitada o cuando las partículas foráneas (formadoras de núcleos de hielo) son introducidas para iniciar el proceso de la formación de cristales de hielo. Por ejemplo, cuando se vaporiza yoduro de plata en las nubes, causa que las gotas de las nubes superenfriadas se congelen ya que el yoduro de plata inicia el cambio de fase del agua a hielo.

Por encima de -5 °C, las bacterias activas formadoras de núcleos de hielo (INA) causan la mayoría de las formaciones de hielo sobre las superficies de las plantas (Lindow, 1983). De hecho en algunas plantas de invernaderos estériles no se muestra formación de núcleos de hielo hasta que la temperatura alcanza de -8 °C a -10 °C (Lindow, 1983). Las principales bacterias INA que forman núcleos en el hielo son *Pseudomonas syringae*, *Erwinia herbicola* y *P. fluorescens*. *P. syringae* y *E. herbicola* que lo hacen a temperaturas tan altas como -1 °C (Lindow, 1983). Después de formar hielo sobre las superficies de las plantas, éste se propaga dentro de las plantas a través de las oberturas en la superficie (e.g. estomas) y dentro de los espacios extracelulares. Dependiendo de la sensibilidad de la planta, el daño puede que resulte o no de la formación de hielo en los espacios extracelulares.

Aunque una bacteria puede iniciar el proceso de formación de núcleos del hielo, es más probable el daño cuando la concentración de bacterias INA es alta. Por ello, reducir la concentración de bacterias INA reduce el potencial para la congelación. Normalmente los pesticidas (e.g. compuestos que utilizan cobre) se utilizan para matar las bacterias, o se aplican bacterias inactivas en la nucleación de hielo (NINA) competitivas para competir y reducir las concentraciones de bacterias INA. Normalmente, del 0,1 a 10% de las bacterias en las superficies de las plantas son bacterias INA (Lindow, 1983), pero hay poblaciones insignificantes de bacterias NINA para competir con ellas y mantener bajo el

número de bacterias INA. Consecuentemente, aplicar de forma suplementaria bacterias NINA sobre las plantas puede ayudar a reducir la concentración de bacterias INA, al competir con ellas. Cuando se aplican NINA, normalmente una aplicación es suficiente y las bacterias NINA continuarán aumentando la población y competir con bacterias INA conforme las plantas crecen. Cuando se utilizan pesticidas, se matan las bacterias, pero consiguen repoblar de nuevo las plantas rápidamente, por ello los bactericidas deben aplicarse de nuevo frecuentemente para mantener bajas las concentraciones de bacterias INA. También son los aminoácidos de las bacterias los que causan la formación de núcleos, por ello se requiere que las aplicaciones de bactericidas se realicen con bastante antelación a los eventos esperables de heladas para que se degraden los aminoácidos. También se requieren aplicaciones tempranas de bacterias NINA para permitir la competencia para reducir el número de bacterias INA. Cualquier aplicación de bactericidas matará tanto bacterias NINA como bacterias INA y esto puede ser problemático si se utilizan los bactericidas para otro propósito que no sea la protección contra las heladas.

Las concentraciones de bacterias INA fueron reducidas de 10 a 100 veces después de tres aplicaciones semanales de bactericida (i.e. hidróxido de cobre) al inicio del desborre de los almendros, o una aplicación de una bacteria NINA (competitiva) cuando la floración era del 10% (Lindow y Connell, 1984). Las bacterias NINA tuvieron poca influencia sobre la población de bacterias INA inmediatamente después de la aplicación, pero el efecto aumentó con el tiempo. La aplicación de bacterias NINA redujo la concentración de bacterias INA y ambas aplicaciones de bactericida de NINA redujo el daño por helada en ramilletes separados que fueron enfriados hasta $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Además de las vaporizaciones que permiten matar o competir con bacterias INA, hay productos químicos que inhibe la capacidad de formación de núcleos de hielo de las bacterias. Los análisis de laboratorio demostraron que la actividad de bacterias INA es sensible al pH y a los metales pesados en un estado soluble (e.g. cobre y zinc) y detergentes catiónicos (Lindow et al., 1978). Los productos químicos que inactivan la actividad de las bacterias INA se denominan “inhibidores de la formación de núcleos de hielo en bacterias” y pueden inactivar las bacterias en unos minutos hasta unas pocas horas (Lindow, 1983). Por ejemplo, en un experimento con perales Bartlett, cuando la temperatura cayó a $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, los inhibidores Na_2CO_3 (0,1 M), Urea (0,5 M) + ZnSO_4 (0,05 M) y Urea (0,5 M) + NaCO_3 (0,1 M) se encontró que tenían fracciones de fruto dañado del 0,11, 0,16 y 0,29, respectivamente, mientras que el control tuvo una fracción de fruto dañado de 0,95. Una gran ventaja es que los materiales pueden aplicarse

inmediatamente antes de una noche de helada. Una desventaja es que esos materiales a veces pueden causar fototoxicidades en las plantas. También hay que tener en cuenta que los materiales son solubles en agua, por ello la lluvia puede limpiarlos de las plantas y puede que sean necesarias nuevas aplicaciones.

Muchos tratamientos disponibles en el mercado pretenden proporcionar protección contra el daño por heladas. Sin embargo, en la mayoría de los casos, hay poca o ninguna evidencia de que funcionen. Matar bacterias INA, competir con ellas o inactivarlas reducirá la oportunidad de congelación y ayuda a evitar el daño por helada; sin embargo, la mayoría de tratamientos comerciales de protección contra las heladas no tienen un efecto conocido sobre las bacterias INA. Uno buscaría una explicación científica y válida sobre cómo funciona un tratamiento de protección por parte de una Universidad o un laboratorio con reputación antes de invertir en cualquier producto de tratamiento para la protección contra las heladas. Esto no significa que la pulverización sea inefectiva; simplemente significa que la evidencia es reducida y puede que no funcione. No hay que comprar productos químicos que pretenden evitar el daño por helada reduciendo la desecación. El daño por helada resulta del daño a la pared celular debido a la deshidratación interna de las células de las plantas. No está relacionado con la transpiración (i.e. evaporación desde las hojas de las plantas).

Pocas veces ha habido historias satisfactorias de agricultores que han utilizado tratamiento con productos químicos contra el daño por helada. Resultados más positivos se han dado en experimentos bien controlados en las universidades. Por ejemplo, el uso de tratamientos químicos (e.g. zinc; cobre; antitranspirantes) no ofrecía un claro beneficio en las investigaciones científicas realizadas en plantaciones de árboles frutales en el estado de Washington (EE.UU.) (Evans, 2000). Asimismo, no se ha encontrado beneficio en los tratamientos para eliminar las bacterias “formadoras de núcleos de hielo” debido a la gran abundancia de materiales formadores de núcleos de hielo “naturales” en la corteza, en los tallos, etc. más que compensar la falta de bacterias (Evans, 2000). Los resultados de los tratamientos químicos para la protección contra las heladas están claramente mezclados. Parte del problema es la gran variación en bacterias INA sobre los diferentes cultivos. Por ejemplo, los cítricos y las vides tienden a presentar concentraciones más pequeñas de bacterias INA, mientras que los árboles de hoja caduca y las hierbas tienden a tener grandes poblaciones. Parte de la variación en los resultados es debida a estas diferencias. Además, el momento de aplicación y la concentración de los tratamientos están todavía bajo investigación. En resumen, es bien conocido que las bacterias INA están involucradas en la formación de núcleos de hielo sobre las plantas, y por ello

reducir las concentraciones de bacterias INA puede proporcionar alguna medida de protección contra las heladas. Sin embargo, se necesita claramente más investigación para determinar si es beneficioso y cuándo es beneficioso el control de bacterias INA, y qué manejo daría resultados aceptables.

TRATAMIENTO DE SEMILLAS CON PRODUCTOS QUÍMICOS

Se ha informado de bastantes casos donde tratamientos, que contenían microelementos y elementos secundarios (Cu, B, Mg, Zn, Al, Mo, Mn) aplicados a las semillas (maíz, pepino, algodón, tomate) y a plantas han conducido a un aumento en la resistencia a la congelación (Bagdonas, Georg y Gerber, 1978).

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)

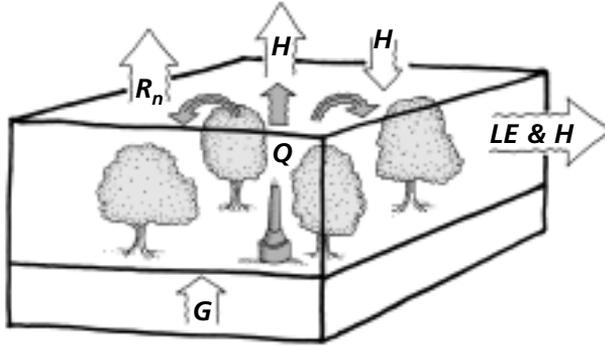
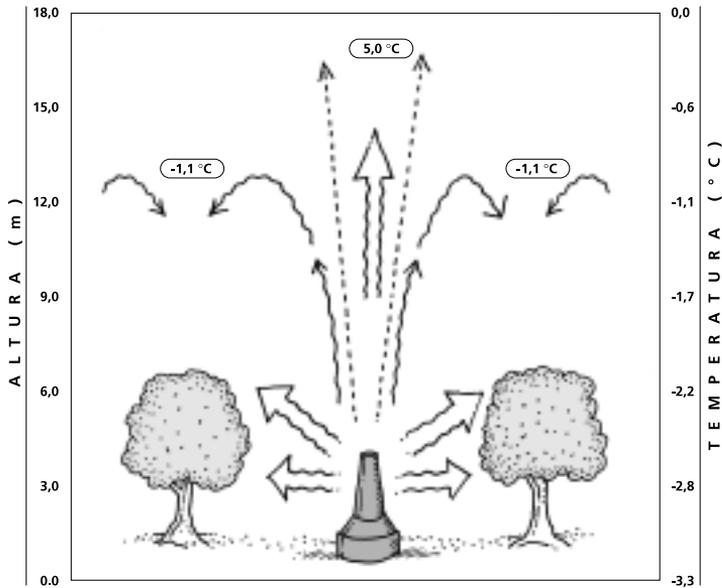


FIGURA 7.2

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



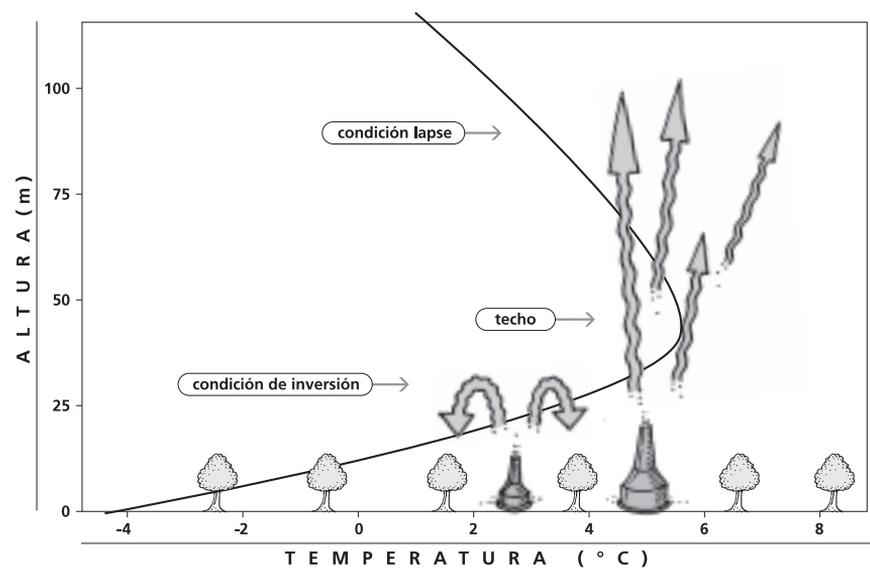
y descenderá, lo que crea un patrón de circulación dentro de la capa de inversión térmica (Figura 7.2). Si la inversión es débil o si los fuegos son demasiado grandes y calientes, el aire calentado asciende demasiado alto y el patrón de circulación dentro de la inversión no se produce. Las estufas modernas 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

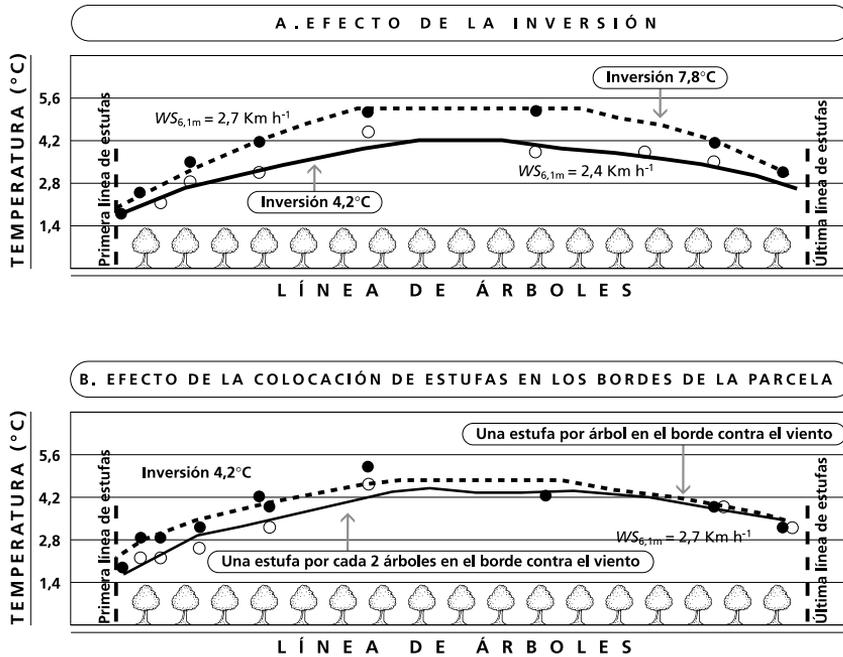


En la Figura 7.4, el aumento de la temperatura fue más alto en la parte central de la plantación frutal y los beneficios de calentar fueron menores cerca de los bordes contra el viento y a favor del viento. En la noche con 4,2 °C de fuerza de inversión, el aumento de temperatura en el borde contra el 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:

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

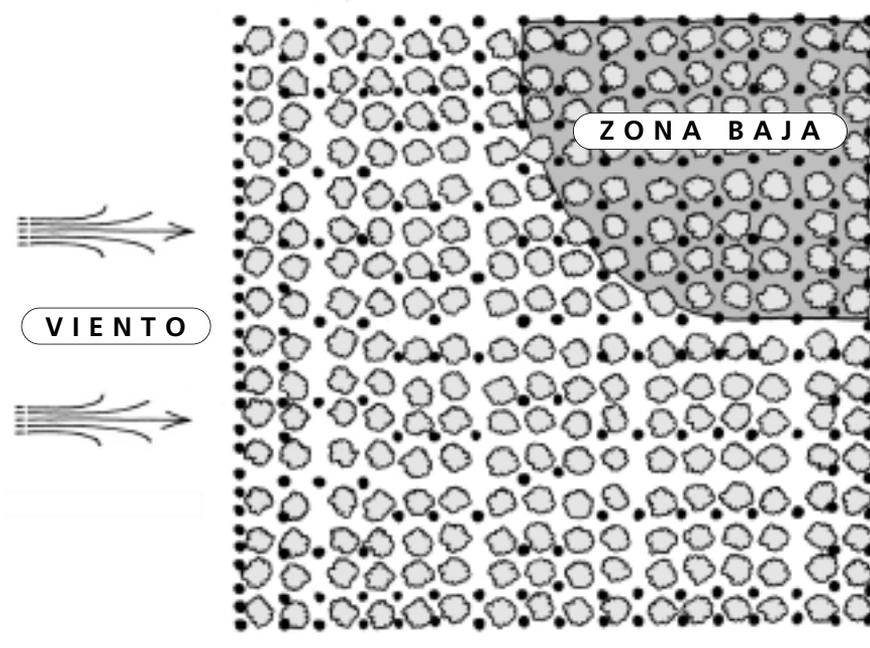
El coeficiente $3,6 \times 10^7$ convierte E_R en $W m^{-2}$ a $J h^{-1} ha^{-1}$. Para los combustibles sólidos, utilice la Ecuación 7.1 para determinar el número de estufas por hectárea (H_H) a partir del requerimiento de energía (E_R) en $W m^{-2}$, la producción de energía del combustible (E_O) en $MJ kg^{-1}$ 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

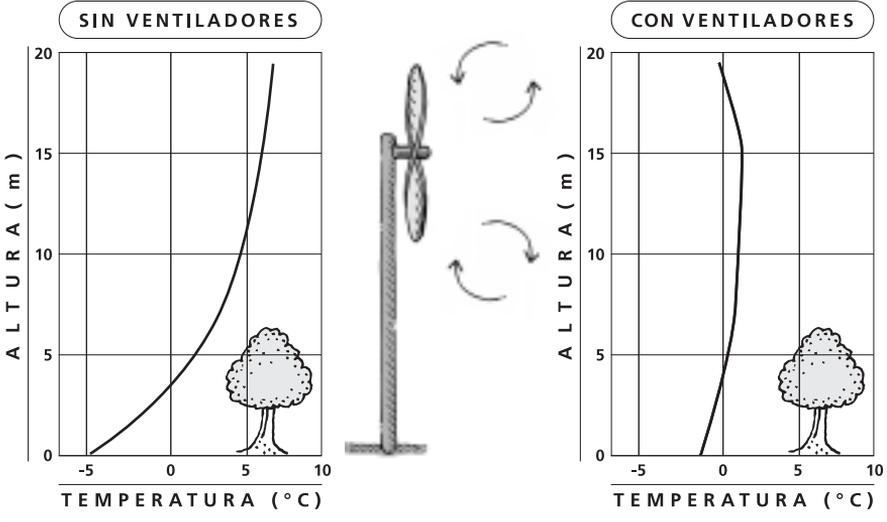
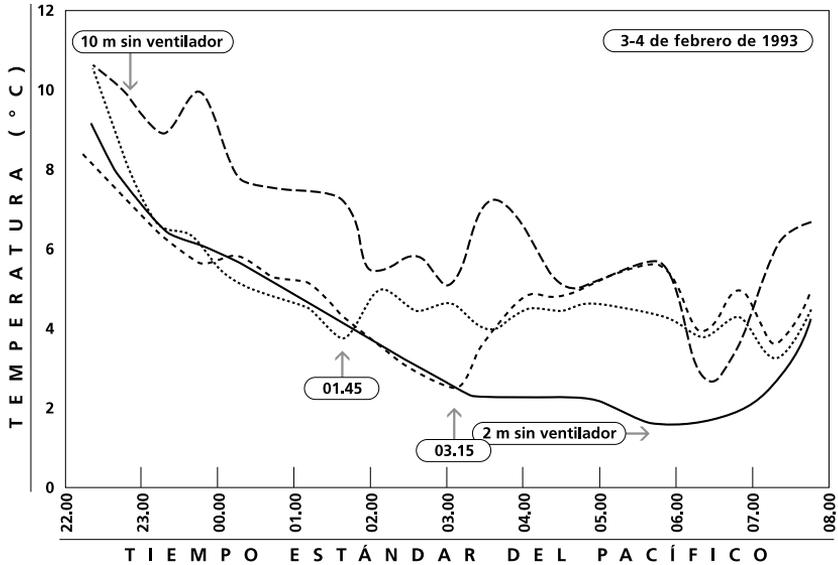


FIGURA 7.8

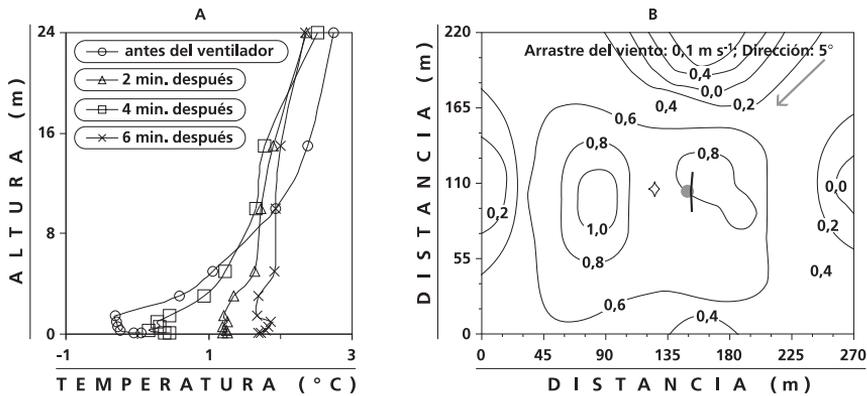
Trazas de tendencias de la temperatura a 10 m y a 2 m sin (w/o) un ventilador y tendencias de temperatura a 2 m medidas cerca de los ventiladores puestos en marcha a las 01.45 h y a las 03.15 h



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.

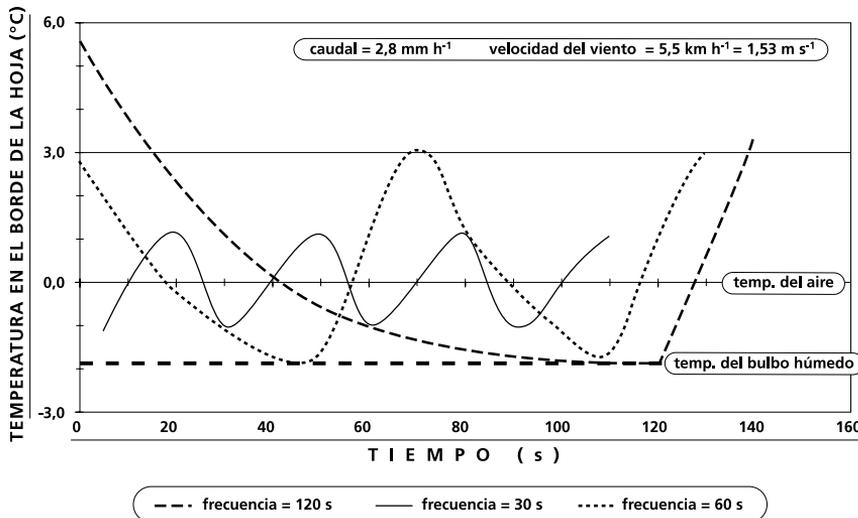
Puesta en marcha y parada

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.

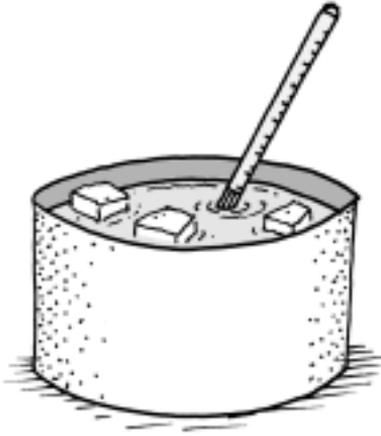
Incluso si el Sol está brillando sobre las plantas y la temperatura del aire está por encima de los 0 °C, los aspersores no deberían pararse a menos que la temperatura del bulbo húmedo contra el viento desde el cultivo esté por encima de T_c . Si el encharcamiento del suelo o la falta de agua no son 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 °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 °C o 2 °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 °C) se estima a partir de la temperatura del bulbo húmedo (T_w en °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:

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

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

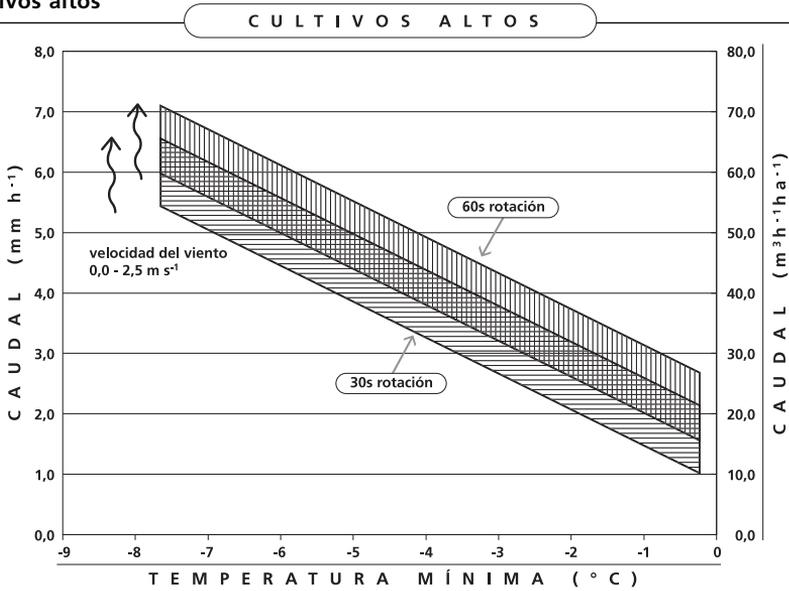
TABLA 7.7

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

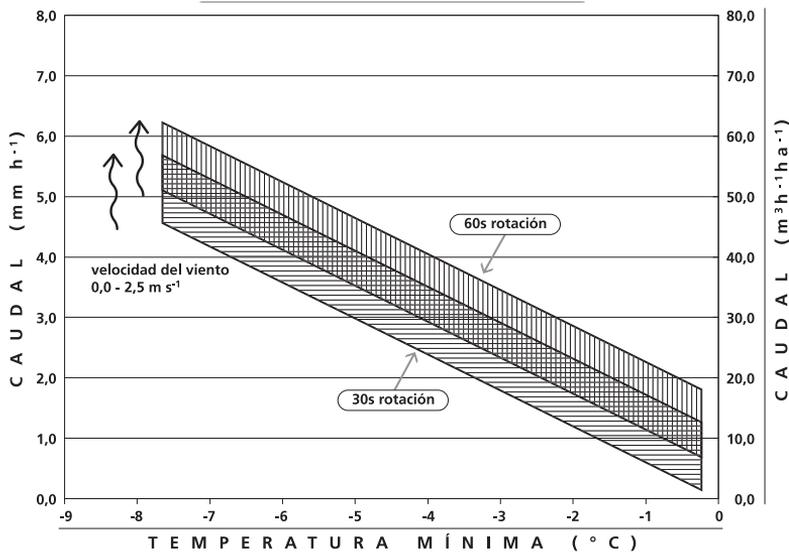
TABLA 7.8

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 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 $-2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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, las 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.

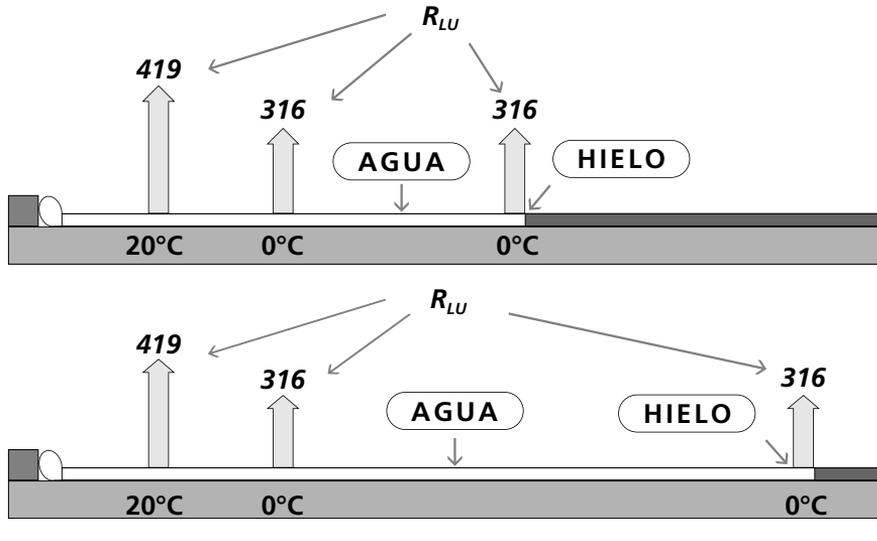
El agua líquida es más densa cuando la temperatura es cercana a 4 °C que a temperaturas más bajas, por ello el agua a temperaturas menores de 4 °C subirá hasta la superficie y favorecerá que el agua se congele de arriba abajo. Una vez se ha formado hielo sobre la superficie, se desarrolla un espacio 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 Martsof (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 apagara 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.

TECNOLOGÍAS ADECUADAS

INTRODUCCIÓN

La protección pasiva se practica extensamente en todos los países con problemas de heladas. En realidad, los métodos pasivos son a menudo más beneficiosos y efectivos desde el punto de vista del coste que los métodos activos. Estos métodos incluyen:

- Seleccionar emplazamientos, para plantar, que son menos propensos a las heladas;
- Plantar variedades de árboles de hoja caduca y de viña que florecen más tarde en primavera;
- Plantar cultivos anuales una vez que la probabilidad de helada ha disminuido en primavera;
- Plantar cultivos de hoja caduca en pendientes que no estén encaradas al Sol;
- Plantar cítricos en las pendientes que miran al Sol (solanas);
- Evitar plantar en los suelos orgánicos;
- Mantener alto el contenido de agua en el suelo para obtener la difusividad térmica lo más alta posible; y
- Minimizar o eliminar los cultivos que cubren el suelo (e.g. hierbas y malas hierbas) entre las hileras de los árboles cultivados y de las viñas.

En todos los países debe practicarse la eliminación de obstáculos para el drenaje del aire frío y se debe utilizar la topografía y los obstáculos para modificar el flujo de aire frío alrededor de los cultivos de forma que proporcionen protección. Si los métodos pasivos no son adecuados para proporcionar protección, entonces puede que se necesiten los métodos activos.

Los agricultores han utilizado, y continúan haciéndolo, las estufas de combustible sólido y de combustible líquido para combatir las heladas a escala mundial; sin embargo, el coste y la disponibilidad del combustible representan un problema creciente que se agrava con el tiempo. Hoy en día, el uso de estufas con chimenea está generalmente restringido a cultivos de alto valor en países desarrollados o en países con unos costes de combustible bajos. En algunas áreas de Sudamérica, el petróleo se quema en pequeños potes y muchos países queman combustibles sólidos. Debido al coste, los ventiladores y los helicópteros se utilizan mayoritariamente en cultivos de alto valor (e.g. cítricos y vides para

vino). Los aspersores por encima de las plantas y bajo las plantas se utilizan en una variedad muy amplia de árboles, vides y cultivos en hilera en muchos países; sin embargo, el método es más efectivo desde el punto de vista del coste en climas áridos donde los beneficios del riego cubren parcialmente los gastos de la protección contra las heladas.

Qué métodos activos hay que utilizar para la protección contra las heladas depende de una combinación de factores meteorológicos y económicos. La mayoría de los métodos activos de protección contra heladas son más efectivos cuando hay presente una inversión de temperatura. En localidades con viento, son más probables las heladas de advección que las de radiación y muchos métodos de protección proporcionan una protección escasa. Las ramas de algunos árboles cultivados se dañan por la carga del hielo cuando se usan los aspersores sobre las plantas, por ello generalmente se usan los aspersores bajo planta para los cítricos y árboles de hoja caduca con ramas débiles. Una tendencia habitual en California es cambiar de los riegos localizados de goteo a los microaspersores. Este cambio es parcialmente para aumentar el volumen de suelo humedecido por el sistema de riego, que normalmente mejora la gestión y la producción, pero también proporciona un método de protección contra heladas que no existe con el riego por goteo. Por ello, cuando se instala un sistema de riego para un cultivo nuevo o que ya existe, es más deseable utilizar microaspersores que riego localizado por goteo. El riego de superficie (i.e. surco o inundación) se utiliza normalmente para la protección contra las heladas en localidades con suministros adecuados y que no tengan el agua cara. La principal preocupación es aplicar la cantidad de agua suficiente para proporcionar el calor requerido, para asegurar que el agua llega al final de la parcela antes de que la temperatura caiga a niveles de producir daño, y mantener el agua tan caliente como sea posible (e.g. calentando o no recirculando el agua).

MÉTODOS DE PROTECCIÓN HABITUALES

Los métodos de protección contra las heladas utilizados alrededor del mundo fueron discutidos por Bagdonas, Georg y Gerber (1978); sin embargo, cambios económicos, leyes contra la contaminación, etc., han influido en los métodos actualmente utilizados. Una encuesta reciente, realizada por los autores del libro, proporciona cierta información sobre los métodos actuales de protección y explica porqué la tecnología está cambiando. Los resultados de la encuesta se muestran en la Tabla 8.1 y las conclusiones generales se discuten en este capítulo.

La información y las prácticas utilizadas sobre los métodos de protección de Europa y de Norte América se han descrito en los capítulos iniciales y además son bien conocidas debido a la gran cantidad de publicaciones. Sin embargo, hay menos

información disponible sobre las prácticas de los agricultores de otras partes del mundo. En marzo de 2003, se distribuyó una encuesta con un cuestionario a los servicios meteorológicos, centros de educación y agencias del gobierno alrededor del mundo, con énfasis en países no mencionados en los capítulos precedentes, para evaluar las prácticas actuales de protección contra las heladas. Hubo numerosas respuestas a la encuesta por parte de una serie de países. Mientras parte de la información recogida era la esperada, también hubo algunas sorpresas.

MÉTODOS PASIVOS

Es bien conocido que los agricultores, independiente de la localidad, intentarán minimizar el daño practicando métodos pasivos de bajo coste. Aunque el cuestionario de la encuesta no preguntaba de forma específica por información sobre métodos pasivos de protección contra las heladas, se recibió sin embargo alguna información sobre ello. Por ejemplo, los siguientes métodos pasivos de protección fueron mencionados en las respuestas:

1. Seleccionar lugares libres de heladas (e.g. las zonas superiores de las pendientes de una colina son mejores).
2. Plantar tarde para evitar estadios sensibles durante los períodos de heladas
3. Seleccionar variedades tolerantes
4. Plantar en ambientes protegidos (e.g. invernaderos) y transplantar más tarde una vez el tiempo es más cálido.
5. Crear barreras físicas (e.g. paredes y arbustos) para controlar el drenaje de aire frío.
6. Cubrir los cultivos en hilera con túneles de plástico.
7. Pulverizar compuestos de cobre para controlar las concentraciones de bacterias INA
8. Pulverizar bacterias NINA sobre los cultivos para competir con las bacterias INA

La selección del emplazamiento es claramente una práctica importante en todas las partes del mundo, independientemente del nivel de ingresos de los agricultores locales. Muchas directrices sobre métodos pasivos se dan en el Capítulo 6. Los agricultores con recursos limitados pueden manejar el contenido de agua en el suelo, cubrir los cultivos, amontonar el suelo alrededor de los troncos de los árboles jóvenes, etc., a un coste relativamente bajo. Quizás uno de las tecnologías más efectivas desde el punto de vista del coste es el uso de vallas, balas de heno, etc., para controlar el drenaje de aire alrededor de los cultivos sensibles. Eliminar los obstáculos que causan el embolsamiento de aire frío

también es normalmente efectivo desde el punto de vista del coste. También, seleccionar variedades que son más tolerantes a las heladas, y plantar una vez que la probabilidad de daño ha disminuido en la primavera, es una práctica sencilla pero efectiva. Eliminar las malas hierbas de las plantaciones frutales y de los viñedos y evitar plantar cereales de invierno junto a los cultivos sensibles a las heladas es también una buena práctica.

MÉTODOS ACTIVOS

El riego por inundación como protección fue destacado por México y Argentina, pero no por otros países. Los aspersores sobre planta se han utilizado para la protección de bananas en Chipre y para los arándanos, cítricos y plantaciones frutales de hueso en Argentina. Los aspersores sobre planta también se han utilizado sobre estacas (esquejes leñosos), cucurbitáceas, flores y patatas en Zimbabwe. En Grecia, los micro-aspersores sobre planta se han utilizado sobre los kiwis, pero fue la única localización donde se citó el método. Las técnicas por debajo de las plantas – convencionales y micro-aspersores – se usan para la protección contra las heladas de los cítricos en Grecia. Ninguna otra localización se ha mencionado en los informes sobre el uso de los aspersores bajo plantas. Los que respondieron de Turquía identificaron sobre el uso de nebulizadores artificiales para la protección contra las heladas en cerezos, olivos y melocotoneros, y también se utilizaron los nebulizadores en bananos en Chipre. Los aspersores se utilizan a veces para la protección contra las heladas de cultivos anuales en el Valle del Rift en Jordania y en regiones montañosas.

Los ventiladores convencionales (i.e. producción de viento horizontal) se han utilizado para la protección de manzanos en México y de cítricos (principalmente en naranjas dulces y mandarinos) en la llanura Argolic de Grecia. A pesar de que los ensayos de campo sobre los ventiladores que producen viento hacia abajo demostraron un pobre comportamiento y la literatura sobre los ventiladores verticales que producen viento hacia arriba es escasa, los ventiladores que producen viento vertical fueron identificados como los que se han utilizado para los cítricos tanto en Grecia como en Uruguay. Los helicópteros se han utilizado para la protección contra las heladas de las plantaciones de frutales de hueso en Argentina, y hay planes de usar helicópteros para viñedos en Uruguay.

La mayoría de los métodos activos de protección son algo más intensivos en energía, y en consecuencia las tecnologías pueden ser o no adecuadas, dependiendo de la disponibilidad local y de los costes. Por ejemplo, el uso de las estufas es efectivo desde el punto de vista del coste si existe una fuente de combustible segura y de bajo coste. Sin embargo, las estufas son, en general, contaminantes, por ello únicamente deberían utilizarse las estufas eficientes con

poca producción de humo. Investigaciones recientes han mostrado que calentando el agua de riego para la aplicación con aspersores bajo planta es menos contaminante que utilizar directamente estufas, y proporciona un método de distribuir el calor más uniformemente a través de una plantación frutal o de un viñedo. Los ventiladores se utilizan normalmente para la protección de cultivos de alto valor en países más ricos, pero a menudo los costes son demasiado altos para las agriculturas de subsistencia. El uso de riego de inundación o por surcos es una opción en la mayoría de partes del mundo si se dispone de una manera oportuna del agua. Uno de los problemas con el riego por superficie es que se debe disponer de una previsión de las temperaturas de congelación con una antelación de unos pocos días antes de la noche de helada para poder ser capaz de ordenar una petición de agua a la comunidad de regantes.

El control de bacterias INA se ha identificado como un método de protección en algunos países. Para pequeñas plantaciones y con una frecuencia de heladas baja, este podría ser un método de protección efectivo desde el punto de vista del coste en muchas localidades y la investigación sobre el control de las bacterias INA continua.

RESUMEN DE LAS TECNOLOGÍAS ADECUADAS

Parece que, al nivel de todo el mundo, se utiliza un amplio intervalo de tecnologías de protección contra las heladas desde las simples a las más sofisticadas. Los factores más determinantes dependen de la disponibilidad local y de los costes. Por ejemplo, las estufas de combustible líquido se utilizan mucho en México porque hay disponibilidad de combustible a bajo coste. No es muy utilizado donde los costes son más altos. Naturalmente, incluso dentro de un mismo país, los métodos de protección varían según el tamaño y riqueza de la explotación así como del apoyo del gobierno. Cada método de protección debe considerarse por sus propios méritos y debería realizarse una evaluación económica para determinar si un método es o no efectivo desde el punto de vista de los costes. Naturalmente esto también requiere la disponibilidad de datos climáticos y disponer de ordenador que facilite el análisis de los datos. Para localidades sin la financiación adecuada, la falta de suministros críticos y equipamiento podría dificultar el uso de algunos métodos. Por ejemplo, tanto un servicio meteorológico que proporcione una buena previsión como disponer de un termómetro es el requerimiento mínimo para un uso eficiente de los aspersores o de los ventiladores. Para los aspersores, un termómetro de bulbo húmedo o una medida de la temperatura del punto de rocío mejorará el manejo del sistema. De forma similar, es difícil practicar la protección contra las heladas con estufas o ventiladores sin disponer como mínimo de termómetros protegidos.

TABLA 8.1

Prácticas de protección contra las heladas presentadas por tipo de cultivo para varios países y porcentaje estimado de cultivo que está protegido

CULTIVO	PAÍS	MÉTODO DE PROTECCIÓN CONTRA LAS HELADAS	% CULTIVO PROTEGIDO
Almendro	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación Las estufas de combustible líquido (petróleo)	
Arándanos	Argentina (NE de Buenos Aires)	Aspersores sobre planta	100%
Banana	Chipre	Aspersores convencionales por encima de la planta	
Banana	Chipre	Nebulizadores artificiales	
Café	Zimbabwe	Aspersión convencional sobre planta Acolchado con hierbas Estufa de combustible sólido (madera) Cubrir los tallos con tierra Barreras de gramíneas o maleza para el drenaje de aire frío Cobertura con hierbas sobre las plantas Abrir cuencas de drenaje para mejorar el drenaje de aire Avisos contra heladas Plantar sobre un montículo Cubrir los troncos con papel Recomendar no labrar el suelo unas semanas antes de las heladas Selección de emplazamiento	
Cerezos	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación Las estufas de combustible líquido (petróleo)	
Cerezos	Turquía	Estufas de combustible sólido Niebla artificial	
Ciruelos	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación Las estufas de combustible líquido (petróleo, etc.)	
Cítricos	Argentina (NE de Buenos Aires)	Aspersores por encima de las plantas	
Cítricos	Grecia	1. Micro-aspersores bajo planta 2. Ventiladores	<20% <10%
Cítricos	Grecia	Ventiladores (que producen el aire de forma vertical) Aspersores convencionales bajo planta Aspersores y estufas Aplicar compuestos que contengan cobre	2% 3% 1% 1-2%

CULTIVO	PAÍS	MÉTODO DE PROTECCIÓN CONTRA LAS HELADAS	% CULTIVO PROTEGIDO
Cucurbitáceas – calabazas, calabazas híbridas butternut, sandías, etc.	Zimbabwe	Selección de emplazamiento– lugares libres de heladas en pendientes Selección de cultivares tolerantes Evitar estadios sensibles durante los periodos de heladas Compactar el suelo en invierno Producción en ambientes protegidos– invernaderos Barreras físicas Cubrir los cultivos con hierbas, sacos o papel al atardecer Riego por aspersión Riego por inundación Quemar neumáticos y estiércoles de vaca contra el viento temprano por la mañana Ventiladores Cultivar plántones en cubiertas de plástico al aire libre o bajo protección para transplantar cuando esté más cálido.	
Cultivos anuales y en hilera	Jordania	Estufas Aspersores Túneles de plástico Plantación tardía	
Estacas	Zimbabwe	Selección del emplazamiento– lugares libres de heladas en pendientes Evitar los estadios sensibles durante el período de heladas Producción en ambientes protegidos– invernaderos Barreras físicas– vallas y arbustos Cubrir el cultivo con hierbas, sacos o papel durante la noche Riego por aspersión Fuegos quemando neumáticos viejos y excrementos de vaca en la dirección del viento pronto por la mañana Ventiladores	
Flores	Zimbabwe	Selección de emplazamiento– lugares libres de heladas en pendientes Selección de cultivares tolerantes Evitar estadios sensibles durante los periodos de heladas Compactar el suelo en invierno Producción en ambientes protegidos– invernaderos Barreras físicas	

CULTIVO	PAÍS	MÉTODO DE PROTECCIÓN CONTRA LAS HELADAS	% CULTIVO PROTEGIDO
		Cubrir los cultivos con hierbas, sacos o papel al atardecer Riego por aspersión Riego por inundación Quemar neumáticos y estiércoles de vaca contra el viento temprano por la mañana Ventiladores Calentar los substratos	
Frutales de hueso	Argentina (NE de Buenos Aires)	Las estufas de combustible líquido Estufas de combustible sólido (madera) Riego de superficie con estufas de combustible líquido Aspersores convencionales por encima de la planta Helicópteros (programado)	
Hortícolas de invernadero y flores	Chipre	Sopladores de aire que usan estufas de petróleo	
Kiwi	Grecia	Micro-aspersores sobre planta	< 20%
Manzano	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación Las estufas de combustible líquido (petróleo)	
Manzano (principalmente Golden y Red Delicious)	México (Estado de Chihuahua)	Las estufas de combustible líquido (petróleo) Ventiladores (de producción de viento horizontal) Ventiladores y aspersores	50% 25% 25%
Melocotoneros	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación Las estufas de combustible líquido (petróleo)	
Melocotoneros	Grecia	Micro-aspersores bajo planta	< 10%
Melocotoneros	Grecia	Aspersores convencionales bajo planta Aspersores y estufas Aplicar compuestos que contengan cobre	25% 25% 10–15%
Melocotoneros	México (Estado de Chihuahua)	Las estufas de combustible líquido (petróleo)	100%
Melocotoneros	Turquía	Estufas de combustible sólido Niebla artificial	
Olivo	Turquía	Estufas de combustible sólido Artificial niebla	
Patatas	Chipre	Aspersores convencionales por encima de las plantas	
Patatas	Zimbabwe	Selección de emplazamiento– lugares libres de heladas en pendientes	60%

CULTIVO	PAÍS	MÉTODO DE PROTECCIÓN CONTRA LAS HELADAS	% CULTIVO PROTEGIDO
		Evitar los estadios sensibles durante períodos de heladas Compactar el suelo en invierno Barreras físicas Cubrir los cultivos con hierbas, sacos o papel al atardecer Riego por aspersión Riego por inundación Quemar neumáticos y estiércoles de vaca contra el viento temprano por la mañana Ventiladores y otras máquinas que produzcan viento	
Perales	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación Las estufas de combustible líquido (petróleo)	
Pimiento Chili (en el momento del trasplante)	México (Estado de Chihuahua)	Aplicación de bacterias INA Plantar en invernaderos y transplantar	30% 70%
Tomates	Zimbabwe	Selección de emplazamiento– lugares libres de heladas en pendientes Selección de cultivares tolerantes Evitar los estadios sensibles durante los períodos de heladas Compactar el suelo en invierno Producción en ambientes protegidos– invernaderos Barreras físicas Cubrir los cultivos con hierbas, sacos o papel al atardecer Riego por aspersión Riego por inundación Quemar neumáticos y estiércoles de vaca contra el viento temprano por la mañana Ventiladores y otras máquinas que hagan viento Forzar la cosecha Botellas rellenas de agua y situadas cerca de una planta	
Trigo	Zimbabwe	Evitar la floración durante los períodos de heladas Riego por encima	
Viña	Uruguay	Nebulizadores artificiales Estufas de combustible sólido (coque, carbón vegetal, madera, etc.) Helicópteros Ventiladores que producen el aire hacia arriba	
Viñedos	Argentina (Mendoza)	Riego por inundación Las estufas de combustible líquido (petróleo)	

RESPUESTAS A LA ENCUESTA SOBRE PROTECCIÓN CONTRA LAS HELADAS

Argentina (NE de Buenos Aires)

Hasta el año 2001, el principal método utilizado para proteger las plantaciones de frutales de hueso fueron las estufas de combustible líquido. Después de 2001, debido al aumento de los precios de petróleo, el método principal de protección contra las heladas fueron las estufas de combustible sólido, especialmente la leña. Un 80% del área es protegida con estufas. En la región de Buenos Aires, las plantaciones de cítricos son insignificantes.

Grecia

En Grecia, la protección activa contra las heladas para frutales es menor, aunque, con los años, los daños en primavera por helada son a menudo elevados. Debido al exceso de producción y a los bajos precios, pocos agricultores desean invertir en protección contra las heladas. Normalmente, los agricultores utilizan micro-aspersores con aplicaciones de 80 a 120 litros h⁻¹ para el riego de los árboles.

No existe un área significativa con plantas hortícolas o otras plantas cultivadas que estén protegidas por métodos activos contra las heladas. Para la protección de muchas plantas que se han plantado pronto se utilizan túneles de plástico bajos o altos y en una pequeña área (< 5% del total) las calabazas tempranas de verano se protegen con riego localizado en túneles bajos.

La protección contra las heladas en los cítricos se practica mayoritariamente en la llanura de Arta, que es la parte más al Norte de Grecia con producción de cítricos (un 15% del área total ocupada por cítricos en Grecia). El melocotonero se cultiva, casi exclusivamente, en las zonas más al norte de Grecia (Macedonia), donde son comunes las heladas tardías de primavera y, en consecuencia, la protección contra las heladas está justificada.

La protección básica de los naranjos y mandarinos en la llanura de Argolic se consigue con molinos (mezcladores del aire) instalados en las plantaciones frutales. Los cultivos hortícolas en campo abierto sufren a menudo de daño por heladas.

Jordania

En el valle del Rift en Jordania, las heladas ocurren con escasa frecuencia. Sin embargo, cuando éstas se producen, los agricultores normalmente protegen sus plantas anuales utilizando estufas o poniendo en marcha sus aspersores. Los túneles de plástico se utilizan para proteger los cultivos de verano que se han plantado temprano. En las áreas montañosas, los agricultores protegen los

cultivos hortícolas evitando plantar en los períodos más dados a heladas o utilizan túneles de plástico. También utilizan aspersores o estufas. Para los árboles frutales utilizan estufas.

México (Chihuahua)

El estado de Chihuahua es quizás el estado más frío de México. Los frutales de más valor normalmente se protegen contra los daños por heladas tardías de primavera. La mayor parte de cultivos no se protegen. Por ejemplo los cultivadores de aguacate en el estado de Michoacan han aplicado bacterias NINA para reducir las bacterias INA con unos buenos resultados de protección. Algunos productores de peras y pequeños frutos en los estados de Michoacan y Chihuahua también han conseguido buenos resultados aplicando bacterias NINA. México es un país rico en petróleo, y los gobiernos central y federal subvencionan el precio del gasoil. Por ello el principal método de protección contra heladas en el estado de Chihuahua y probablemente en México son las estufas que utilizan como combustibles gasoil o petróleo. No obstante este método de protección es una fuente importante de contaminación de la atmósfera, del suelo, del agua y para la gente.

Zimbabwe

En general la mayoría de sistemas de protección son para cultivos hortícolas sensibles que se cultivan en Zimbabwe durante el invierno. Para los agricultores de las áreas con riesgo de heladas en Zimbabwe es muy importante escuchar los pronósticos meteorológicos y tomar precauciones. La mayoría de agricultores conocen las fechas más frecuentes de heladas en sus respectivas áreas. Sin embargo el servicio meteorológico ofrece la ayuda para la predicción de heladas y da un pronóstico. Estos métodos implican mucha inversión y requieren electricidad y se practica principalmente en las explotaciones comerciales más grandes. Los pequeños agricultores practican métodos de protección menos caros. Las flores y brotes se protegen en los diferentes estadios realizando cortes/plantones recién injertados o con frutales injertados en los viveros y también en el campo. El trigo de invierno es sensible al daño por helada durante la floración.

REFERENCIAS

- Abreu, J.P. de M.** 1985. *As Geadas. Conceitos, Génese, Danos e Métodos de Protecção*. Lisboa: UTL, ISA. 219p.
- Alden, J. & Hermann, R.K.** 1971. Aspects of the cold hardiness mechanisms in plants. *Botanical Review*, **37**: 37–142.
- Allen, C.C.** 1957. A simplified equation for minimum temperature prediction. *Monthly Weather Review*, **85**: 119–120.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M.** 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, No. 56. 300p.
- Anconelli, S., Facini, O., Marletto, V., Pitacco, A., Rossi, F. & Zinoni, F.** 2002. Micrometeorological test of microsprinklers for frost protection of fruit orchards in Northern Italy. *Chemistry and Physics of the Earth*, **27**: 1103–1107.
- Anderson, J.L., Richardson, E.A., Ashcroft, G.L., Keller, J., Alfaro, J., Hanson, G. & Griffin, R.E.** 1973. Reducing freeze damage to fruit by overhead sprinkling. *Utah Science*, **34**: 108–110.
- Angus, D.E.** 1962. Frost protection experiments using wind machines. *CSIRO Divison of Meteorological Physics Technical Paper*, No. 12. Melbourne, Australia. 48p.
- Attaway, J.A.** 1997. *A history of Florida citrus freezes*. Lake Alfred, Florida: Florida Science Source, Inc.
- Bagdonas, A., Georg, J.C. & Gerber, J.F.** 1978. Techniques of frost prediction and methods of frost and cold protection. *World Meteorological Organization Technical Note*, No. 157. Geneva, Switzerland. 160p.
- Baggio, A.j., Caromori, P.H., Andorcioli Filho & Montoya, L.** 1997. Productivity of southern Brazilian coffee plantations shaded by different stockings of *Grevillea robusta*. *Agroforestry Systems*, **37**: 111–120.
- Ballard, J.K. & Proebsting, E.L.** 1978. Frost and frost control in Washington orchards. *Washington State University Extension Bulletin*, No. 634. Pullman, Washington. 27p.
- Banquet, A.E., Halter, A.N. & Conklin, F.S.** 1976. The value of frost forecasting: a Bayesian appraisal. *American Journal of Agricultural Economics*, **58**: 511–520.

- Barfield, B.J. & Gerber, J.F.** 1979. *Modification of the aerial environment of crops. American Society of Agricultural Engineering (ASAE) Monograph*, No. 2. St Joseph, Michigan: ASAE. 538p.
- Bartholic, J.F.** 1979. Site selection. pp. 281–290, *in*: Barfield and Gerber, 1979, q.v.
- Bettencourt, M.L.** 1980. Contribuição para o estudo das geadas em Portugal Continental. *In: O Clima de Portugal*, Fasc. XX. Lisboa: I.N.M.G.
- Blanc, M.L., Geslin, H., Holzberg, I.A. & Mason, B.** 1963. Protection against frost damage. *WMO, Technical Note*, No. 51. Geneva, Switzerland. 62p.
- Bouchet, R.J.** 1965. Problèmes des gelées de printemps. *Agricultural Meteorology*, 2: 167–195.
- Braud, H.J., Chesness, J.L. & Hawthorne, P.L.** 1968. Using foam to protect plants against cold. *Louisiana Agriculture*, 12 (2): 4–7.
- Brewer, R.F., Burns, R.M. & Opitz, K.W.** 1974. Man-made fog for citrus frost protection. *California Agriculture*, 28: 13–14.
- Brindley, S.F., Taylor, R.J. & Webber, R.T.J.** 1965. The effects of irrigation and rolling on nocturnal air temperature in vineyards. *Agricultural Meteorology*, 2: 373–383.
- Brooks, F.A.** 1960. *An introduction to physical microclimatology*. Davis, California: University Press. pp. 158–161.
- Brunt, D.** 1932. Notes on radiation in the atmosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 58: 389–418.
- Burke, M.J., Gusta, L.V., Quamme, H.A., Weiser, C.J. & Li, P.H.** 1976. Freezing and injury in plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 27: 507–528.
- Burke, M. J., George, M.F., Gerber, J.F., Janick, J. & Martsof, J.D.** 1977. Does washing frost from plants reduce cold damage? *Hortscience*, 12: 101–103.
- Burman, R.D., Jensen, M.E., & Allen, R.G.** 1987. Thermodynamic factors in evapotranspiration. pp. 28–30, *in*: L.G. James and M.J. English (eds). *Proceedings of the Irrigation and Drainage Special Conference*. Portland, Oregon. 28–30 July 1987. ASCE, New York.
- Businger, J.A.** 1965. Frost protection with irrigation. pp. 74–80, *in*: *Agricultural Meteorology*. Boston, Mass.: American Meteorological Society.
- Campbell, G.S. & Norman, J.M.** 1998. *An Introduction to Environmental Biophysics*. New York, NY: Springer-Verlag. 286p.

- Caplan, L.A.** 1988. Effects of cold weather on horticultural plants in Indiana. *Purdue University Cooperative Extension Publication*, No. HO-203.
- Caprio, J.M. & Snyder, R.D.** 1984a. Study to improve winterkill parameters for a winter wheat model. Task 1, a study of the relation between soil temperature at three centimeter depth and air temperature. Final project report. NASA Contr NAS 9-16007. 76p.
- Caprio, J.M. & Snyder, R.D.** 1984b. Study to improve winterkill parameters for a winter wheat model. Task 2, a statistical analysis of weather and winter wheat reseeding relations for application in wheat modelling. Final project report. NASA Contr NAS 9-16007. 120p.
- Caramori, P.H., Androcioli Filho, A. & Leal, A.C.** 1996. Coffee shade with *Mimosa scabrella* Benth. for frost protection in southern Brazil. *Agroforestry Systems*, **33**: 205–214.
- Cellier, P.** 1982. Contribution à prévision des températures minimales nocturnes en conditions de gelées de printemps. Etude de l'évolution des températures de l'air et du sol au cours de la nuit. PhD Thesis, INA Paris-Grignon.
- Cellier, P.** 1993. An operational model for predicting minimum temperatures near the soil surface under clear sky conditions. *Journal of Applied Meteorology*, **32**(5): 871–883.
- Collomb, C.** 1966. A propos des récentes gelées de printemps. *Phytoma*, **18** (No. 178): 23–25.
- Connell, J.H. & Snyder, R.L.** 1988. Sprinkler spacing affects almond frost protection. *California Agriculture*, **43**: 30–32.
- Cooper, W.C., Young, R.H. & Turrell, F.M.** 1964. Microclimate and physiology of citrus their relation to cold protection. *Agricultural Science Review*, (Winter 1964): 38–50.
- Cox, D.L., Larsen, J.K., & Brun, L.L.** 1986. Winter survival response of winter wheat: tillage and cultivar selection. *Agronomy Journal*, **78**: 795–801.
- Cunha, J.M.** 1952. Contribuição para o estudo do problema das geadas em Portugal. Relatório final do Curso de Engenheiro Agrônomo. I.S.A., Lisboa.
- Cunha, F.R.** 1982. O problema da geada negra no Algarve [in Portuguese]. *INIA Divulgação* No. 12. 125p.
- Davies, D.L., Evans, R.G., Campbell, G.S. & Kroegen, M.W.** 1988. Under-tree sprinkling for low temperature modification in apple orchards. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineering*, **31**: 789–796.

- de Vries, D.A.** 1963. Thermal properties of soils. pp. 210–235, *in*: W.R. van Wijk (ed). *Physics of Plant Environment*. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland Publishing Co.
- Díaz-Queralto, F.** 1971. *Práctica de la defensa contra heladas*. Lérida, Spain: Ediciones Dilagro. 384p.
- Donaldson, D.R., Snyder, R.L., Elmore, C. & Gallagher, S.** 1993. Weed control influences vineyard minimum temperatures. *American Journal of Enology and Viticulture*, **44**: 431–434.
- Doorenbos, J. & Pruitt, W.O.** 1977. Crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, No. 24.
- Durand, R.** 1965. Le risque de gelée: application au poirier dans la région Parisienne. *Phytoma*, **172**: 35–41.
- Evans, R.G.** 2000. Frost protection in orchards and vineyards. <http://www.bsyse.prosser.wsu.edu/report/frost.html>.
- Faust, M.** 1989. *Physiology of temperate zone fruit trees*. New York NY: John Wiley and Sons. 338p.
- Ferrel, W.** 1886. Report on psychrometric tables for use in the Signal Services. Annual Report of the Chief Signal Officer. 1886. Appendix 24, pp. 233–259. Washington, D.C.
- Fritschen, L.J. & Gay, L.W.** 1979. *Environmental Instrumentation*. New York, NY: Springer-Verlag.
- Fucik, J.E.** 1979. Protecting citrus from freezing with insulating wraps. pp. 364–367, *in*: Barfield and Gerber, 1979, q.v.
- Fucik, J.E. & Hensz, R.** 1966. New insulating materials to protect citrus trees from freezing. *Journal of the Rio Grande Valley Horticultural Society*, **20**: 43–49.
- Georg, J.G.** 1979. Frost protection by flood irrigation. pp. 368–371, *in*: Barfield and Gerber, 1979, q.v.
- Gerber, J.F.** 1969. Petroleum coke heaters vs. conventional heaters. pp. 535–538, *in*: H.D. Chapman (ed). *Proceedings of the First International Citrus Symposium, Vol. II*. University of California, Riverside, 16–26 March 1968. California: Publications Department of the University of California.
- Gerber, J.F. & Martsolf, J.D.** 1979. Sprinkling for frost and cold protection. pp. 327–333, *in*: Barfield and Gerber, 1979, q.v.
- Gusta, L.V., Burke, M.J. & Kapoor, A.C.** 1975. Determination of unfrozen water in winter cereals at subfreezing temperatures. *Plant Physiology*, **56**: 707–709.

- Hamer, P.J.C.** 1980. An automatic sprinkler system giving variable irrigation rates matched to measured frost protection needs. *Agricultural Meteorology*, **21**: 281–293.
- Harrison, L.P.** 1963. Some fundamental considerations regarding psychrometry. pp. 71–104, *in: Humidity and Moisture*, Vol. 3. New York NY: Reinhold.
- Hensz, R.A.** 1969a. Petroleum coke fuel blocks: alone and with wind machines. pp. 529–533, *in: H.D. Chapman (ed). Proceedings of the First International Citrus Symposium, Vol. II.* University of California, Riverside, 16–26 March 1968. California: Publications Department of the University of California.
- Hensz, R.A.** 1969b. The use of insulating wraps for protection of citrus trees from freeze damage. pp. 575–576, *in: H.D. Chapman (ed). Proceedings of the First International Citrus Symposium, Vol. II.* University of California, Riverside, 16–26 March 1968. California: Publications Department of the University of California.
- Hewett, E.W.** 1971. Preventing frost damage to fruit trees. New Zealand Department of Scientific and Industrial Research (DSIR) *Information Series*, No. 86. 55p.
- Hewitt, K.** 1983. Interpreting the role of hazards in agriculture. pp. 123–139, *in: K. Hewitt (ed). Interpretations of Calamity.* London: Allen & Unwin.
- Hogg, W.H.** 1950. Frequency of radiation and wind frosts during spring in Kent. *Meteorological Magazine*, **79**: 42–49.
- Hogg, W.H.** 1964. Frost prevention in Dutch light frames. *Agricultural Meteorology*, **1**: 121–129.
- Hogg, W.H.** 1971. Spring frosts. *Agriculture*, **78**(1): 28–31.
- Horstmeyer, S.** 2001. Building blocks – What goes on in a cubic meter of air? *Weatherwise*, **54**: 20–27.
- Ikeda, I.** 1982. Freeze injury and protection of citrus in Japan. pp. 575–589, *in: P.H. Li and A. Sakai (eds). Plant Cold Hardiness and Freezing Stress. Vol.II.* Academic Press Inc.
- Itier, B, Huber, L. & Brun, O.** 1987. The influence of artificial fog on conditions prevailing during nights of radiative frost. Report on experiment over a Champagne vineyard. *Agricultural and Forestal Meteorology*, **40**: 163–176.
- Jensen, M.E., Burman, R.D. & Allen, R.G.** 1990. *Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements.* ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices, No 70. New York, NY: American Society of Civil Engineers. 360p.

- Jensen, R.E., Savage, E.F. & Hayden, R.A. 1970. The effects of certain environmental factors on cambium temperatures of peach trees. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **95**: 286–292.
- Jones, E.H. 1924. Irrigation, a frost protection in the citrus grove. *Californian Citrographer*, **9**: 249.
- Jorgensen, G., Escalera, B.M., Wineman, D.R., Striegler, R.K., Zoldoske, D. & Krauter, C. 1996. Microsprinkler frost protection in vineyards. California State University at Fresno, *CATI Publication #960803*.
- Kalma, J.D., Laughlin, G.P., Caprio, J.M. & Hamer, P.J.C. 1992. *Advances in Bioclimatology, 2. The Bioclimatology of Frost*. Berlin: Springer-Verlag .144p.
- Katz, R.W., Murphy, A.H. & Winkler, R.L. 1982. Assessing the value of frost forecasting to orchardists: a dynamic decision-making approach. *Journal of Applied Meteorology*, **21**: 518–531.
- Kepner, R.A. 1951. Effectiveness of orchard heaters. *California Agricultural Experiment Station Bulletin*, No.723. 30p.
- Koc, A.B., Heinemann, P.H., Crassweller, R.M. & Morrow, C.T. 2000. Automated cycled sprinkler irrigation system for frost protection of apple buds. *Applied Engineering in Agriculture*, **16**(3): 231–240.
- Krasovitski, B., Kimmel, E. & Amir, I. 1996. Forecasting earth surface temperature for the optimal application of frost protection methods. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **63**: 93–102.
- Krasovitski, B., Kimmel, E., Rosenfield, M. & Amir, I. 1999. Aqueous foams for frost protection of plants: stability and protective properties. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **72**(2): 177–185.
- Krewer, G. 1988. Commodity information – Small Fruit pp. 2–13, in: J.D. Gibson (ed). *Cold Weather and Horticultural Crops in Georgia; Effects and Protective Measures*. Extension Horticulture Department, University of Georgia, Publication No. 286.
- Larcher, W. 1982. Typology of freezing phenomena among vascular plants and evolutionary trends in frost acclimation. pp. 3–15, in: P.H. Li and & A. Sakai (eds). *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*, Vol. I. Academic Press.
- Laughlin, G.P. & Kalma, J.D. 1987. Frost hazard assessment from local weather and terrain data. *Agricultural and Forestal Meteorology*, **40**: 1–16.
- Laughlin, G.P. & Kalma, J.D. 1990. Frost risk mapping for landscape planning: a methodology. *Theoretical and Applied Climatology*, **42**: 41–51.

- Lawrence, E.N. 1952. Frost investigation. *Meteorological Magazine*, **81**: 65–74.
- Lecomte, C. 1989. Seuils de sensibilité au gel hivernal en grandes cultures. pp. 83–99, in: C. Riou (ed). *Le gel en Agriculture*. Paris: Commission d'Agrométéorologie de l' INRA.
- Leddet, C. & Dereuddre, J. 1989. La résistance au gel des bourgeons. pp. 113–128, in: C. Riou (ed). *Le gel en Agriculture*. Paris: Paris: Commission d'Agrométéorologie de l' INRA.
- Leonard, A.S. 1951. The return-stack orchard heater. *Agricultural Engineering*, **32**: 655–656.
- Levitt, J. 1980. *Responses of Plants to Environmental Stresses*, Vol. 1 (2nd ed). New York NY: Academic Press. 497p.
- Leyden, R. & Rohrbaugh, P.W. 1963. Protection of citrus trees from freeze damage. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, **83**: 344–351.
- Li, P.H. & Palta, J.P. 1978. Frost hardening and freezing stress in tuber-bearing solanum species. pp. 49–71, in: P.H. Li and A. Sakai (eds). *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. Vol. I, New York, NY: Academic Press.
- Li, P.H. 1989. *Low Temperature Stress Physiology in Crops*. Boca Raton, Florida: CRC Press. 203p.
- Lindow, S.E. 1983. Methods of preventing frost injury caused by epiphytic ice nucleation-active bacteria. *Plant Disease*, **67**: 327–333.
- Lindow, S.E. & Connell, J.H. 1984. Reduction of frost injury to almond by control of ice nucleation active bacteria. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, **109**: 48–53.
- Lindow, S.E., Arny, D.C., Barchet, W.R. & Upper, C.D. 1978. Bacterial ice nucleation inhibitors and reduction of frost damage to plants (Abstract). *Phytopathology News*, **12**: 138.
- Lomas, J. Gat, Z., Borsuk, Z. & Raz, A. 1989. *Frost Atlas of Israel*. Division of Agricultural Meteorology, Israel Meteorology Service, Bet Dagan. 10 map sheets.
- Martsof, J.D. 1979a. Combination wind machines and heaters for frost protection. pp. 325–326, in: Barfield and Gerber, 1979, q.v.
- Martsof, J.D. 1979b. Heating for frost protection. pp. 391–314, in: Barfield and Gerber, 1979, q.v.
- Martsof, J.D. 1989. Heated irrigation cold protection. *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, **102**: 64–69.

- Martsof, J.D., Gerber, J.F., Chen, E.Y., Jackson, H.L., & Rose, A.J.** 1984. What do satellite and other data suggest about past and future Florida freezes? *Proceedings of the Florida State Horticultural Society*, **97**: 17–21.
- Mee, T.R. & Bartholic, J.F.** 1979. Man-made fog. pp. 334–352, *in*: Barfield and Gerber, 1979, q.v.
- Miller, M.P., Turrell, F.M. & Austin, S.W.** 1966. Solid fuel candle type orchard heaters. *California Agriculture*, **20**: 2–4.
- Monteith, J.L. & Unsworth, M.H.** 1990. *Principles of Environmental Physics*. 2nd ed. London: Edward Arnold. 291p.
- Mota, F.S.** 1981. *Meteorologia Agrícola*. 5th ed. São Paulo, Brazil: Liv. Nobel.
- Myers, S.C.** 1988. Commodity information – Small Fruit. pp. 15–20, *in*: J.D. Gibson (ed). *Cold Weather and Horticultural Crops in Georgia: Effects and Protective Measures*. Extension Horticulture Department, University of Georgia, Public. No. 286.
- Nigond, J.** 1960. Le retard au débourrement de la vigne par un traitement à l'acide a-naphtalène acétique et la lutte contre les gelées. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie d'Agriculture de France*, **46**: 452–457.
- NZAEI [New Zealand Agricultural Engineering Institute] (ed)** 1987. *Pulsed water application for frost protection*. Lincoln College. NZAEI Report No. 342.
- O'Connell, N.V. & Snyder, R.L.** 1999. Cover crops, mulch lower night temperatures in citrus. *California Agriculture*, **53**: 37–40.
- Olien, C.R.** 1967. Freezing stresses and survival. *Annual Review of Plant Physiology*, **18**: 387–408.
- Parsons, R.A., Schultz, H.B. & Lider, L.A.** 1967. Petroleum coke-based bricks for frost protection. *California Agriculture*, **21**: 12–13.
- Pergola, G., Ranieri, M. de & Grassotti, A.** 1983. Utilizzazione della pioggia antigelo su una serra investita a garafano. *Culture Protette*, **12(11)**: 37–42.
- Perraudin, G.** 1965. Résistance au gel printanier de quelques espèces et variétés fruitières. *Phytoma*, **172**: 13–19.
- Perry, K.B.** 1994. *Freeze/frost protection for horticultural crops*. North Carolina State University Cooperative Extension, Horticulture Information Leaflet No.705. 9p.
- Peyer, E.** 1965. La protection des vignes contre le gel par des couvertures. *Phytoma*, **172**: 61–62.

- Powell, A.A. & Himelrick, D.G. 2000. Principles of freeze protection for fruit crops. Alabama Cooperative Extension System, ANR 1057B. <http://www.aces.edu>).
- Proebsting, E.L. 1975. Reducing energy consumption in cold protection. *Horticultural Science*, 10: 463–465.
- Proebsting, E.L. 1978. Adapting cold hardiness concepts to deciduous fruit culture. pp. 267–279, in: P.H. Li and A. Sakai (eds). *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. Vol. I. New York NY: Academic Press Inc.
- Proebsting, E.L. Jr. & Mills, H.H. 1978. Low temperature resistance of developing flower buds of six deciduous fruit species. *Journal American Society Horticultural Science*, 103: 192–198.
- Puffer, R.E. & Turrell, F.M. 1967. *Frost protection in citrus*. University of California DANR Leaflet AXT-108 (rev).
- Raposo, J.R. 1967. A defesa das plantas contra as geadas. Junta de Colonização Interna, Est. Téc. No.7. 111p.
- Raposo, J.R. 1979. A rega por aspersão. Lisbon: Clássica Editora. 339p.
- Ribeiro, A.C. 2003. Estudo do microclima de um pomar de macieiras em Trás-os-Montes, em condições de geada. Avaliação da ventilação forçada como método de luta contra as geadas. PhD thesis, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia. 160p.
- Ribeiro, A.C., de Melo-Abreu, J.P., Gonçalves, D.A. & Snyder, R.L. 2002. Temperature response to the onset of wind machine operation. pp. 317–318, in: Proceedings of the VII Congress of the European Society for Agronomy. Córdoba, Spain, 15–18 July 2002. European Society for Agronomy, Universidad de Córdoba, Córdoba, Spain.
- Rieger, M., Davies, F.S. & Jackson, L.K. 1986. Microsprinkler irrigation and microclimate of young orange trees during frost conditions. *HortScience*, 21: 1372–1374.
- Rodrigo, J. 2000. Spring frost in deciduous fruit trees-morphological damage and flower hardiness. *Scientia Horticulturae*, 85(3): 155–173.
- Rogers, W.S. & Modlibowska, I. 1961. Practical frost protection of fruit by water sprinkling. *Grower*, 55: 658–661.
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L. & Verma, S.B. 1983. *Microclimate in the Biological Environment*. 2nd ed. New York NY: John Wiley & Sons. 495p.

- Rossi, F., Facini, O., Loreti, S., Nardino, M., Georgiadis, T. & Zinoni, F.** 2002. Meteorological and micrometeorological applications to frost monitoring in northern Italy orchards. *Chemistry & Physics of the Earth*, **27**: 1077–1089.
- Rotondi, A. & Magli, M.** 1998. Valutazione comparativa della sensibilità a minime termiche critiche di cultivar di olivo della Romagna. *Olivo e olio*, **1**: 48–54.
- Sakai, A. & Larcher, W.** 1987. *Frost survival of plants*. New York NY: Springer-Verlag, 321p.
- Savage, E.F., Jensen, R.E. & Hayden, R.A.** 1976. *Peach tree micro-climate and methods of modification*. Georgia Agriculture Experiment Station Research Bulletin, No.192. 44p.
- SCAQMD.** 2002. *Heaters First Regulated in 1950 Orchard smudge pots cooked up pall of smog*. South Coast Air Quality Management District. <http://www.aqmd.gov/>
- Schereiber, K.F.** 1965. Étude du risque de gel à l'ouest du lac de Neuchâtel. *Phytoma*, **172**: 31–34.
- Schultz, H.B.** 1961. Microclimates on spring frost nights in Napa Valley vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture*, **12**: 81–87.
- Schultz, H.B. & Lider, J.V.** 1968. *Frost protection with overhead sprinklers*. University of California Agricultural Experiment Station Leaflet, No. 201.
- Schultz, H.B., Lider, L.A. & Parsons, R.A.** 1968. Orchard heating with solid fuel heating bricks under minimum favourable conditions. *California Agriculture*, **22**: 4–5.
- Schultz, H.B. & Weaver, R.J.** 1977. Preventing frost damage in vineyards. University of California DANR, Leaflet No.2139.
- Siminovitch, D., Singh, J. & de la Roche, I.A.** 1978. Freezing behaviour of free protoplasts of winter rye. *Cryobiology*, **15**: 205–213.
- Smith, L.P.** 1975. The modes of agricultural meteorology – Hazards. *Developments in Atmospheric Science*, **3**: 167–171.
- Snyder, R.L. & Connell, J.H.** 1993. Ground cover height affects pre-dawn orchard floor temperature. *California Agriculture*, **47**: 9–12.
- Snyder, R.L., Paw U, K.T. & Thompson, J.F.** 1987. *Passive frost protection of trees and vines*. University of California DANR Leaflet No.21429.
- Snyder, R.L., Pherson, J.E. & Hatfield, J.L.** 1981. Removing leaf litter doesn't protect oranges from frost. *California Agriculture*, **35**: 12–13.

- Stebelsky, I.** 1983. Wheat yields and weather hazards in the Soviet Union. pp. 202–218, *in*: K. Hewitt (ed). *Interpretations of Calamity*. Boston, Mass.: Allen & Unwin.
- Sutherland, R.A.** 1980. A short-range objective nocturnal temperature forecasting model. *Journal of Applied Meteorology*, **19**: 247–255.
- Tetens, O.** 1930. Über einige meteorologische Begriffe. *Zeitschrift für Geophysik*, **6**: 297–309.
- Tiefenbacher, J.P., Hagelman, R.R. & Secora, R.J.** 2000. California citrus freeze of December 1998: Place, Perception and Choice – Developing a Disaster Reconstruction Model. Boulder, Colorado: Natural Hazards Research and Applications Information Center, University of Colorado. Quick Response Research Report #125. 31p.
- Turrell, F.M. & Austin, S.W.** 1969. Thermal conductivity and mass in stems, leaves and fruit in relation to frost resistance. pp. 601–608, *in*: H.D. Chapman (ed). *Proceedings of the First International Citrus Symposium, Vol. II*. University of California, Riverside, 16–26 March 1968. California: Publications Department of the University of California.
- Valmari, A.** 1966. On night frost research in Finland. Suomen maataloustieteellisen seuran julkaisu = *Acta Agralia Fennica*, **107**: 191–214.
- Vaysse, P. & Jourdain, J.** 1992. *Protection des vergers contre les gelées printanières*. Paris: CTIFL. 112p.
- Venner, R. & Blank, S.C.** 1995. Reducing citrus revenue losses from frost damage: wind machines and crop insurance. Division of Agricultural and Natural Resources, University of California, Giannini Foundation Information Series, No. 95-1. 62p.
- Ventskevich, G.Z.** [1958]. *Agrometeorology*. Translated from the Russian by the Israel Programme for Scientific Translation, Jerusalem, 1961.
- Vitkevich, V.I.** [1960]. *Agricultural Meteorologist*. Translated from the Russian by the Israel Programme for Scientific Translation, Jerusalem, 1963.
- Von Legerke, H.J.** 1978. On the short-term predictability of frost and frost protection – a case study on Dunsandle tea estate in Nilgiris (south India). *Agricultural Meteorology*, **19**: 1–10.
- Wang, C.Y. & Wallace, H.A.** 2003. Chilling and freezing injury. *In*: K.C Gross, C.Y. Wang and M. Saltveit (eds). *The Commercial Storage of Fruits, Vegetables, and Florist and Nursery Stocks*. USDA Handbook Number, No.66. <http://www.ba.ars.usda.gov/hb66/index.html> (downloaded 8 November 2002).

- Weiser, C.J., Quamme, H.A., Probesting, E.L., Burke, M.J. & Yelenosky, G. 1979. Plant freeze injury and resistance. pp. 55–84, *in*: Barfield and Gerber, 1979, q.v.
- Westwood, M.N. 1978. Dormancy and plant hardiness. pp. 299–332, *in*: M.N. Westwood (ed). *Temperate-zone Pomology*. San Francisco, California: Freeman.
- Wheaton, R.Z. & Kidder, E.H. 1964. The effect of evaporation on frost protection by sprinkling. *Quarterly Bulletin of the Michigan Agricultural Experiment Station*, **46**: 431–437.
- White, G.F. & Haas, J.E. 1975. *Assessment of Research on Natural Hazards*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press. 487p.
- Whiteman, T.M. 1957. Freezing points of fruits, vegetables, and florist stocks. *USDA Market Research Report*, No.196. 32p.
- Wright, J.L. & Jensen, M.E. 1972. Peak water requirements of crops in Southern Idaho. *Journal of Irrigation and Drainage*, ASCE, **96**(IR1): 193–201.
- Yoshida, S. & Sakai, A. 1968. The effect of thawing rate on freezing injury in plants. II. The change in the amount of ice in leaves as produced by the change in temperature. *Low Temperature Science, Series Biological Sciences, B*, **26**: 23–31.
- Young, F.D. 1920. Forecasting minimum temperatures in Oregon and California. *Monthly Weather Review*, **16**: 53–60.
- Zinoni F, Rossi, F, Pitacco, A. & Brunetti, A. 2002a. *Metodi di previsione e difesa dalle gelate tardive*. Bologna, Italy: Calderoni Edagricole. 171p.
- Zinoni F, Antolini G, Campisi T, Marletto V & Rossi F. 2002b. Characterization of the Emilia-Romagna region in relation to late frost risk. *Physics and Chemistry of the Earth*, **27**: 1091–1101.

PREFIJOS Y FACTORES DE CONVERSIÓN

PREFIJOS

Las unidades pueden utilizarse como tales o como múltiplos o fracciones de diez:

PREFIJO	POTENCIA DE DIEZ	
T	tera	10^{12}
G	giga	10^9
M	mega	10^6
k	kilo	10^3
h	hecto	10^2
da	deca	10^1
d	deci	10^{-1}
c	centi	10^{-2}
m	mili	10^{-3}
μ	micro	10^{-6}
n	nano	10^{-9}
p	pico	10^{-12}
f	femto	10^{-15}
a	ato	10^{-18}

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm} = 1\,000 \text{ mm}$$

$$1 \text{ m}^2 = 10\,000 \text{ cm}^2 = 10^6 \text{ mm}^2$$

$$1 \text{ m}^3 = 10^6 \text{ cm}^3 = 10^9 \text{ mm}^3$$

$$1 \text{ Mg m}^{-3} = 10^3 \text{ kg m}^{-3} = 1 \text{ g cm}^{-3}$$

$$1 \text{ kPa} = 10 \text{ mbar}$$

$$1 \text{ julio} = 0,2388 \text{ cal}$$

$$1 \text{ vatio} = 1 \text{ J s}^{-1} = 0,8598 \text{ kcal h}^{-1}$$

$$1 \text{ Wm}^{-2} = 0,8598 \text{ kcal m}^{-2} \text{ h}^{-1}$$

$$1 \text{ Wm}^{-2} = 1,433 \times 10^{-3} \text{ cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$$

$$1 \text{ Hp} = 745,7 \text{ W}$$

$$1 \text{ W} = 0,001431 \text{ Hp}$$

$$\text{Flujo de agua (m}^3 \text{ s}^{-1}) = 0,55 \times \text{Potencia de bombeo (W)}/\text{Presión (kPa)}$$

$$\text{Flujo de agua (litro s}^{-1}) = 5,43 \times \text{Potencia de bombeo (kilovatios)}/\text{presión (bares)}$$

Caballos de freno fuerza son los caballos de un motor eléctrico. No utilizar para motores de gasoil.

FACTORES DE CONVERSIÓN

Temperatura

Unidad estándar: grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) $^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F}-32) 5/9$

kelvin (K) $\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,15$

Presión (presión del aire, presión de vapor)

Unidad estándar: kilopascal (kPa)

milibar (mbar) $1 \text{ mbar} = 0,1 \text{ kPa}$

bar $1 \text{ bar} = 100 \text{ kPa}$

centímetro de agua (cm) $1 \text{ cm de agua} = 0,09807 \text{ kPa}$

milímetros de mercurio (mm Hg) $1 \text{ mm Hg} = 0,1333 \text{ kPa}$

atmósfera (atm) $1 \text{ atm} = 101,325 \text{ kPa}$

libra por pulgada al cuadrado (psi) $1 \text{ psi} = 6,896 \text{ kPa}$

Velocidad del viento

Unidad estándar: metro por segundo (m s^{-1})

kilometro por día (km día^{-1}) $1 \text{ km día}^{-1} = 0,01157 \text{ m s}^{-1}$

milla náutica /hora (nudo) $1 \text{ nudo} = 0,5144 \text{ m s}^{-1}$

pies por segundo (ft s^{-1}) $1 \text{ ft/s}^{-1} = 0,3048 \text{ m s}^{-1}$

Radiación

Unidad estándar: megajulio por metro cuadrado y por día ($\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)

o como evaporación equivalente en mm por día (mm día^{-1})

evaporación equivalente (mm/día) $1 \text{ mm día}^{-1} = 2,45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$

julio por cm^2 por día ($\text{J cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) $1 \text{ J cm}^{-2} \text{ día}^{-1} = 0,01 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$

calorías por cm^2 por día ($\text{cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1}$) $1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J} = 4,1868 \cdot 10^{-6} \text{ MJ}$

$1 \text{ cal cm}^{-2} \text{ día}^{-1} = 4,1868 \cdot 10^{-2} \text{ MJ}$

$\text{m}^{-2} \text{ día}^{-1}$

vatio por m^2 (W m^{-2}) $1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1}$

$1 \text{ W m}^{-2} = 0,0864 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$

PROPIEDADES FÍSICAS

Propiedades del Agua

T °C	ρ_w Mg m ⁻³	λ kJ mol ⁻¹
0	0,99987	45,0
4	1,00000	44,8
10	0,99973	44,6
20	0,99823	44,1
30	0,99568	43,7
40	0,99225	43,4

T = temperatura, ρ_w = densidad del agua y λ = calor latente de vaporización

Propiedades de los gases a $P_b = 101,3$ kPa de presión barométrica

T °C	ρ mol m ⁻³
0	44,6
5	43,8
10	43,0
15	42,3
20	41,6
25	40,9
30	40,2
35	39,5
40	38,9

T = temperatura y ρ = densidad

Emitancia del cuerpo negro ($W m^{-2}$) como una función de la temperatura por debajo de cero (°C)

°C	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9
-14	256	255	255	255	254	254	253	253	253	252
-13	260	259	259	258	258	258	257	257	257	256
-12	264	263	263	262	262	262	261	261	260	260
-11	268	267	267	267	266	266	265	265	265	264
-10	272	271	271	271	270	270	269	269	269	268
-9	276	276	275	275	274	274	274	273	273	272
-8	280	280	279	279	279	278	278	277	277	276
-7	284	284	284	283	283	282	282	282	281	281
-6	289	288	288	287	287	287	286	286	285	285
-5	293	293	292	292	291	291	291	290	290	289
-4	298	297	297	296	296	295	295	294	294	294
-3	302	302	301	301	300	300	299	299	298	298
-2	306	306	306	305	305	304	304	303	303	302
-1	311	311	310	310	309	309	308	308	307	307
0	316	315	315	314	314	313	313	312	312	311

Calor específico del agua	$75,4 \text{ J mol}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Calor latente de fusión	$6,0 \text{ kJ mol}^{-1}$
Constante psicrométrica empírica*	$0,000660 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$
Calor específico del aire	$C_p = 29,3 \text{ J mol}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Masa molecular del aire	$M_a = 29 \text{ g mol}^{-1}$
Masa molecular del agua	$M_w = 18 \text{ g mol}^{-1}$
Constante de los gases	$R = 8,3143 \text{ J mol}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Constante de Stefan-Boltzmann	$5,6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

*Nota: *Ferrel (1886) según Harrison (1963)*

CÁLCULOS DE LA HUMEDAD

Presión barométrica (P_b) en función de la elevación (E_L):

$$P_b = 101,3 \left[\frac{293 - 0,0065E_L}{293} \right]^{5,26} \quad P_b \text{ en kPa, } E_L \text{ en m} \quad \text{Ec. A3.1}$$

Calor latente de vaporización (λ) en función de la temperatura del aire (T):

$$\lambda = 2501 - 2,361T \quad (\lambda \text{ en kJ kg}^{-1}, T \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad \text{Ec. A3.2}$$

La presión de vapor a saturación sobre el agua es la presión de vapor del aire cuando el número de moléculas de agua que se condensan iguala al número de las que se evaporan desde una superficie plana de agua a la misma temperatura (T) del agua y del aire. Una ecuación para la presión de vapor a saturación (e_s) sobre el agua a la temperatura (T) viene dada por:

$$e_s = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T}{T + 237,3} \right] \quad (e_s \text{ en kPa, } T \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad \text{Ec. A3.3}$$

Cuando el número de moléculas de agua que se subliman iguala al número de las que se depositan sobre una superficie plana de hielo a la misma temperatura (T) del agua y del aire, la presión de vapor a saturación (e_s) sobre el hielo a la temperatura (T) viene dada por:

$$e_s = 0,6108 \exp \left[\frac{21,875T}{T + 265,5} \right] \quad (e_s \text{ en kPa, } T \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad \text{Ec. A3.4}$$

La temperatura del punto de rocío (T_d) a partir de la temperatura del aire (T) y la humedad relativa (%):

$$T_d = \frac{237,3 \left(\frac{\ln(RH/100)}{17,27} + \frac{T}{237,3 + T} \right)}{1 - \left(\frac{\ln(RH/100)}{17,27} + \frac{T}{237,3 + T} \right)} \quad (T_d \text{ en } ^\circ\text{C}, RH \text{ en } \%, T \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad \text{Ec. A3.5}$$

La temperatura del punto de congelación (T_i) a partir de la temperatura del aire (T) y de la humedad relativa (%):

$$T_i = \frac{265,5 \left(\frac{\ln(RH/100)}{21,875} + \frac{T}{265,5 + T} \right)}{1 - \left(\frac{\ln(RH/100)}{21,875} + \frac{T}{265,5 + T} \right)} \quad (T_i \text{ en } ^\circ\text{C}, RH \text{ en } \%, T \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad \text{Ec. A3.6}$$

Observa que la presión de vapor (e) es igual a la presión de vapor a saturación (e_d) a la temperatura del punto de rocío (T_d) y, para temperaturas por debajo de cero, a la presión de vapor a saturación (e_i) a la temperatura del punto de formación del hielo (T_i).

La temperatura del punto de rocío (T_d) a partir de la presión de vapor ($e = e_d$) sobre el agua:

$$b = \frac{\ln(e/0,6108)}{17,27}$$

$$T_d = 237,3 \left(\frac{b}{1-b} \right) \quad (T_d \text{ en } ^\circ\text{C}, e \text{ en kPa}) \quad \text{Ec. A3.7}$$

La temperatura del punto de formación de hielo (T_i) a partir de la presión de vapor ($e = e_i$) sobre el hielo:

$$b_i = \frac{\ln(e/0,6108)}{21,875}$$

$$T_i = 265,5 \left(\frac{b_i}{1-b_i} \right) \quad (T_i \text{ en } ^\circ\text{C}, e \text{ en kPa}) \quad \text{Ec. A3.8}$$

La pendiente de la presión de vapor a saturación sobre agua líquida a la temperatura T :

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (\Delta \text{ en kPa } ^\circ\text{C}^{-1}, e_s \text{ en kPa}, T \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad \text{Ec. A3.9}$$

La constante psicrométrica (γ) como una función de la presión barométrica (P_b) y la temperatura del bulbo húmedo (T_w), según Fritschen y Gay (1979):

$$\gamma = 0,000660(1 + 0,00115T_w)P_b \quad (\gamma \text{ en kPa } ^\circ\text{C}^{-1}, P_b \text{ en kPa}) \quad \text{Ec. A3.10}$$

La presión de vapor a saturación (e_d) a la temperatura del aire (T_d):

$$e_d = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T_d}{T_d + 237,3} \right] \quad (e_d \text{ en kPa}, T_d \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad \text{Ec. A3.11a}$$

La presión de vapor ($e = e_d$) a la temperatura del punto de rocío (T_d):

$$e_d = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T_d}{T_d + 237,3} \right] \quad (e_d \text{ en kPa}, T_d \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad \text{Ec. A3.11b}$$

La presión de vapor ($e = e_i$) a la temperatura de formación del hielo por debajo de cero (T_i):

$$e_i = 0,6108 \exp \left[\frac{21,875T_i}{T_i + 265,5} \right] \quad (e_i \text{ en kPa}, T_i \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad \text{Ec. A3.12}$$

La temperatura equivalente (T_e) a partir de la temperatura T , la presión de vapor e , y la constante psicrométrica γ :

$$T_e = T + \frac{e}{\gamma} \quad (T_e \text{ y } T \text{ en } ^\circ\text{C}, e \text{ en kPa}, \gamma \text{ en kPa } ^\circ\text{C}^{-1}) \quad \text{Ec. A3.13}$$

La humedad absoluta (χ) a partir de la presión de vapor (e) y de la temperatura (T):

$$\chi = \frac{2165 e}{T + 273,16} \quad (\chi \text{ en g m}^{-3}, e \text{ en kPa}, T \text{ en } ^\circ\text{C}) \quad \text{Ec. A3.14}$$

La presión de vapor (e) a partir de la temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del bulbo seco (T) y del bulbo húmedo (T_w) y de la presión barométrica (P_b):

$$e = e_w - 0,000660(1 + 0,00115T_w)(T - T_w)P_b \quad (e \text{ en kPa}, P_b \text{ en kPa}) \quad \text{Ec. A3.15}$$

donde e_w es la presión de vapor a saturación a la temperatura del bulbo húmedo. Se calcula sustituyendo T_w por T en la Ecuación A3.3.

La presión de vapor (e) a partir de la temperatura del bulbo seco (T) y la del bulbo helado (T_f) ($^{\circ}\text{C}$) y de la presión barométrica (P_b):

$$e = e_f - 0,000582(1 + 0,00115T_f)(T - T_f)P_b \quad (e \text{ en kPa}, P_b \text{ en kPa}) \quad \text{Ec. A3.16}$$

donde e_f es la presión de vapor a saturación a la temperatura del bulbo helado. Se calcula sustituyendo T_f por T en la Ecuación A3.4.

TABLA A3.1

Presión de vapor a saturación (kPa) sobre una superficie lisa de agua líquida calculada utilizando la fórmula de Tetens (Ecuación A3.4) para una temperatura del aire entre 0,0 $^{\circ}\text{C}$ y -14,9 $^{\circ}\text{C}$

	TEMPERATURA $^{\circ}\text{C}$									
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
-14	0,207	0,205	0,203	0,202	0,200	0,199	0,197	0,195	0,194	0,192
-13	0,224	0,223	0,221	0,219	0,217	0,216	0,214	0,212	0,210	0,209
-12	0,243	0,241	0,240	0,238	0,236	0,234	0,232	0,230	0,228	0,226
-11	0,264	0,262	0,260	0,258	0,256	0,253	0,251	0,249	0,247	0,245
-10	0,286	0,283	0,281	0,279	0,277	0,275	0,272	0,270	0,268	0,266
-9	0,309	0,307	0,304	0,302	0,300	0,297	0,295	0,293	0,290	0,288
-8	0,334	0,332	0,329	0,327	0,324	0,322	0,319	0,317	0,314	0,312
-7	0,361	0,359	0,356	0,353	0,350	0,348	0,345	0,342	0,340	0,337
-6	0,390	0,387	0,384	0,381	0,378	0,376	0,373	0,370	0,367	0,364
-5	0,421	0,418	0,415	0,412	0,409	0,405	0,402	0,399	0,396	0,393
-4	0,454	0,451	0,447	0,444	0,441	0,437	0,434	0,431	0,428	0,424
-3	0,490	0,486	0,482	0,479	0,475	0,472	0,468	0,465	0,461	0,458
-2	0,527	0,524	0,520	0,516	0,512	0,508	0,504	0,501	0,497	0,493
-1	0,568	0,564	0,559	0,555	0,551	0,547	0,543	0,539	0,535	0,531
0	0,611	0,606	0,602	0,598	0,593	0,589	0,585	0,580	0,576	0,572

TABLA A3.2

Presión de vapor a saturación (kPa) sobre una superficie lisa de agua líquida calculada utilizando la fórmula de Tetens (Ecuación A3.4) para una temperatura del aire entre 0 °C y 14,9 °C

	TEMPERATURA °C									
	-0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9
0	0,611	0,615	0,620	0,624	0,629	0,633	0,638	0,643	0,647	0,652
1	0,657	0,661	0,666	0,671	0,676	0,681	0,686	0,691	0,696	0,701
2	0,706	0,711	0,716	0,721	0,726	0,731	0,737	0,742	0,747	0,752
3	0,758	0,763	0,769	0,774	0,780	0,785	0,791	0,796	0,802	0,808
4	0,813	0,819	0,825	0,831	0,836	0,842	0,848	0,854	0,860	0,866
5	0,872	0,878	0,885	0,891	0,897	0,903	0,910	0,916	0,922	0,929
6	0,935	0,942	0,948	0,955	0,961	0,968	0,975	0,981	0,988	0,995
7	1,002	1,009	1,016	1,023	1,030	1,037	1,044	1,051	1,058	1,065
8	1,073	1,080	1,087	1,095	1,102	1,110	1,117	1,125	1,133	1,140
9	1,148	1,156	1,164	1,172	1,179	1,187	1,195	1,203	1,212	1,220
10	1,228	1,236	1,245	1,253	1,261	1,270	1,278	1,287	1,295	1,304
11	1,313	1,321	1,330	1,339	1,348	1,357	1,366	1,375	1,384	1,393
12	1,403	1,412	1,421	1,431	1,440	1,449	1,459	1,469	1,478	1,488
13	1,498	1,508	1,517	1,527	1,537	1,547	1,558	1,568	1,578	1,588
14	1,599	1,609	1,619	1,630	1,641	1,651	1,662	1,673	1,684	1,694

TABLA A3.3

Presión de vapor a saturación (kPa) sobre una superficie lisa de hielo calculada utilizando la fórmula de Tetens (Ecuación A3.4) para una temperatura del aire entre 0,0 °C y -14,9 °C

	TEMPERATURA °C									
	-0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9
-14	0,181	0,179	0,177	0,176	0,174	0,173	0,171	0,169	0,168	0,166
-13	0,198	0,196	0,194	0,193	0,191	0,189	0,187	0,186	0,184	0,182
-12	0,217	0,215	0,213	0,211	0,209	0,207	0,205	0,204	0,202	0,200
-11	0,237	0,235	0,233	0,231	0,229	0,227	0,225	0,223	0,221	0,219
-10	0,259	0,257	0,255	0,253	0,250	0,248	0,246	0,244	0,242	0,239
-9	0,284	0,281	0,279	0,276	0,274	0,271	0,269	0,266	0,264	0,262
-8	0,310	0,307	0,304	0,302	0,299	0,296	0,294	0,291	0,289	0,286
-7	0,338	0,335	0,332	0,329	0,326	0,323	0,321	0,318	0,315	0,312
-6	0,368	0,365	0,362	0,359	0,356	0,353	0,350	0,347	0,344	0,341
-5	0,401	0,398	0,395	0,391	0,388	0,385	0,381	0,378	0,375	0,372
-4	0,437	0,433	0,430	0,426	0,422	0,419	0,415	0,412	0,408	0,405
-3	0,476	0,472	0,468	0,464	0,460	0,456	0,452	0,448	0,445	0,441
-2	0,517	0,513	0,509	0,505	0,500	0,496	0,492	0,488	0,484	0,480
-1	0,562	0,558	0,553	0,548	0,544	0,539	0,535	0,530	0,526	0,522
0	0,611	0,606	0,601	0,596	0,591	0,586	0,581	0,576	0,572	0,567

SERIE FAO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE Y LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES

1. Africover: Specifications for geometry and cartography, 2000 (E)
2. Terrestrial Carbon Observation: The Ottawa assessment of requirements, status and next steps, 2002 (E)
3. Terrestrial Carbon Observation: The Rio de Janeiro recommendations for terrestrial and atmospheric measurements, 2002 (E)
4. Organic agriculture: Environment and food security, 2003 (E, S)
5. Terrestrial Carbon Observation: The Frascati report on *in situ* carbon data and information, 2002 (E)
6. The Clean Development Mechanism: Implications for energy and sustainable agriculture and rural development projects, 2003 (E)*
7. The application of a spatial regression model to the analysis and mapping of poverty, 2003 (E)
8. Land Cover Classification System (LCCS), version 2, 2005 (E)
9. Coastal GTOS. Strategic design and phase 1 implementation plan, 2005 (E)
10. Frost Protection: fundamentals, practice and economics - Volume I and II + CD, 2005 (E), 2010 (S)
11. Mapping biophysical factors that influence agricultural production and rural vulnerability, Geo-spatial Data and Information, by Harri Van Velthuizen "et al", ~90 pages 2006 (E)
12. Rapid Agriculture Disaster Assessment Routine (RADAR) 2008 (E)
13. Disaster risk management systems analysis: A guide book, 2008 (E)
14. Improved Adaptive Capacity to Climate Change for Sustainable Livelihoods in the Agriculture Sector, 2008 (E)

Disponibilidad: 2010

Ar Árabe

F Francés

Multil Multilingual

C Chino

P Portugués

* Agotado

E Inglés

S Español

** En preparación



Los documentos técnicos de FAO están disponibles a través de los agentes de ventas autorizados por FAO o directamente desde:

FAO - Grupo de Ventas y Comercialización
Viale delle Terme di Caracalla
00153 Roma - Italia





Los cultivos sensibles pueden dañarse cuando el aire cae por debajo de los 0 °C, con un efecto significativo en la producción. Por ejemplo, en los EE.UU. hay más pérdidas económicas por el daño que producen las heladas que relacionadas con cualquier otro fenómeno meteorológico (White y Haas, 1975). Por ello, los impactos en los agricultores afectados y en la economía local son, a menudo, devastadores. Sin embargo, a pesar de su importancia, la información disponible sobre cómo proteger los cultivos de las heladas es relativamente escasa. En consecuencia, existe la necesidad de disponer de información

simplificada y al alcance de todos los agricultores para ayudarlos a hacer frente a este problema tan importante. En este libro se presentan y se discuten los aspectos de distribución de las heladas, los aspectos económicos e históricos, los aspectos físicos y biológicos, y los métodos de protección. El libro contiene un conjunto amplio de información, desde lo más básico a lo más complejo; sin embargo, está escrito pensando en ayudar a los agricultores para que comprendan mejor la protección contra las heladas y para desarrollar estrategias para combatir las pérdidas de los cultivos debidas a las heladas.



Publicaciones de Medio Ambiente, Cambio Climático y Bioenergía

www.fao.org/nr

www.fao.org/climatechange

www.fao.org/bioenergy

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)

www.fao.org

