

# LA PROBABILIDAD DE HELADA Y EL RIESGO DE DAÑO

## IMPORTANCIA DE LA PROBABILIDAD Y DEL RIESGO

Los métodos más eficaces de protección contra las heladas son la plantación de cultivos que no sean sensibles a la congelación, la plantación en localidades sin temperaturas de congelación, o plantar un cultivo que emerja o florezca una vez que el peligro de helada haya pasado. Los dos primeros métodos se consiguen pocas veces si lo que queremos es obtener un producto específico en un lugar que presenta temperaturas de congelación. En la mayoría de áreas del mundo, a excepción de las regiones con clima únicamente tropical, son posible las temperaturas bajo cero. Las heladas pueden producirse incluso en países con climas tropicales en altitudes elevadas. La probabilidad y el riesgo de temperaturas que causan daño varían con la época del año y, para algunos cultivos, la sensibilidad al daño a las temperaturas bajo cero también cambia. Es importante conocer la probabilidad y el riesgo ya que ayuda a los agricultores a decidir si se planta, qué y cuándo en una localidad en particular. La probabilidad nos indica qué posibilidades hay de experimentar temperaturas que causen daño en un año dado y el riesgo nos dice la probabilidad de que ocurra una helada a lo largo de un periodo dado (e.g. la esperanza de vida en años de una plantación frutal o de un método de protección contra heladas). Por ello, el análisis de probabilidad y riesgo de heladas es una herramienta útil en la toma de decisiones.

La toma de decisiones sobre protección contra las heladas depende del tipo de cultivo. Por ejemplo, la helada puede dañar cultivos ‘extensivos’ anuales y la probabilidad de daño por helada está afectada principalmente por la selección de plantas en los cultivos de invierno y cuándo deben sembrarse los cultivos plantados en primavera. Para los cultivos de invierno, el daño ocurre, a menudo, en la época más fría del invierno. Si utilizamos cálculos de probabilidad y de riesgo, se pueden determinar las posibilidades de que el cultivo sea dañado por la helada. Si el riesgo es alto, el cereal de invierno podría sustituirse por un cereal de primavera para reducir las pérdidas. Haan (1979) presentó la metodología para determinar la probabilidad y el riesgo para los cultivos que son dañados normalmente por congelaciones graves a mediados de invierno. Mostró cómo calcular la probabilidad de que la temperatura caiga por debajo de la temperatura crítica de daño en un año cualquiera y mostró cómo determinar el riesgo de ocurrencia una

o más veces en un número dado de años. El enfoque es similar al utilizado por los hidrólogos cuando determinan el período de retorno de las inundaciones o los geólogos cuando estiman la probabilidad y el riesgo de terremotos. La estadística de la probabilidad y del riesgo de inundaciones y terremotos se utiliza para tomar decisiones sobre cuánto dinero hay que invertir en edificios e infraestructuras para evitar el daño y la pérdida de vidas humanas. De forma similar la información sobre la probabilidad y el riesgo de temperaturas mínimas se utiliza para tomar decisiones acerca de la posibilidad de que se pierda un cultivo por daño por heladas, en un año cualquiera o a lo largo de varios años. Estas posibilidades calculadas se utilizan para decidir si debería plantarse el cultivo, si vale la pena invertir en seguros, si debe plantarse un cultivo distinto, o si la protección contra las heladas es eficaz en costes.

Conocer la probabilidad exacta de alcanzar una temperatura crítica específica de daño en una fecha determinada, en primavera y en otoño, es útil para determinar fechas de siembra y de cosecha en cultivos anuales y la duración deseable de la estación de crecimiento para evitar el daño por helada. Con este libro se proporciona el procedimiento para estimar estas probabilidades y un programa Excel 'FriskS.xls' para realizar los cálculos.

En frutales y en viña, las temperaturas críticas de daño cambian con el estado de desarrollo del cultivo y las fechas de los estados de crecimiento varían de un año a otro. En consecuencia, determinar la probabilidad y el riesgo para plantaciones frutales y de viña es más complicado que para cultivos anuales. Por ejemplo, una temperatura crítica de daño ( $T_c$ ) puede ser  $-7$  °C o inferior en el estadio de rotura de yemas pero puede aumentar hasta  $-2$  °C o superior durante el estado de fruto pequeño, un mes más o menos más tarde. Con este libro se proporciona un programa (TempRisk.xls) para calcular la probabilidad y el riesgo asociado con una temperatura crítica de daño durante un período de tiempo específico correspondiente a un estado de crecimiento. Por ejemplo, en la aplicación, la  $T_c$  y las fechas de inicio y finalización para el período de interés son datos a introducir. Luego, utilizando 20 o más años de datos climáticos de temperatura mínima, se calcula la probabilidad de que la temperatura caiga por debajo de  $T_c$  durante este período en un año dado y el riesgo de que ocurra una o más veces dentro de 5, 10, ..., 30 años y se representa gráficamente. En este capítulo se discuten los métodos y las instrucciones de uso de TempRisk.xls.

## CÁLCULOS DE RIESGO Y CERTIDUMBRE

El análisis de riesgo se utiliza para estimar las probabilidades de que un evento dañino ocurra o no a largo plazo (i.e. en varios años). Por ejemplo, un agricultor quiere saber el riesgo de que un cultivo en particular se pierda por helada durante

la vida esperada de la plantación o la vida prevista del método de protección contra helada. En este libro, el riesgo se determina con el método de Haan (1979) que utiliza una distribución binomial (i.e. un proceso de Bernoulli). En una distribución binomial, el riesgo ( $R$ ) de tener una o más ocurrencias de temperatura por debajo de la temperatura mínima seleccionada en un período de  $n$  años se calcula como:

$$R = 1 - \binom{n}{0} P^0 (1-P)^n \quad \text{Ec. 1.1}$$

donde  $\binom{n}{0} = 1,0$  es la combinación de  $n$  elementos tomando 0 cada vez y  $P^0 = 1,0$ .

Simplificando esta ecuación obtenemos:

$$R = 1 - (1 - P)^n \quad \text{Ec. 1.2}$$

donde  $P = P ( T < T_c )$ . Como este es el riesgo de tener uno o más eventos de heladas dañinas en  $n$  años, la certidumbre ( $C$ ) de no tener heladas viene dada por:

$$C = 1 - R = (1 - P)^n \quad \text{Ec. 1.3}$$

Entonces, la probabilidad ( $P$ ) de tener una helada en un año dado puede calcularse a partir de la certidumbre ( $C$ ) como:

$$P = 1 - C^{\frac{1}{n}} \quad \text{Ec. 1.4}$$

donde  $C$  es la probabilidad, en tanto por uno, de que el evento no ocurrirá en un número especificado de años ( $n$ ). En la Tabla 1.1 se muestra una tabla de probabilidades del suceso de heladas en un año correspondiente a un rango de valores de certidumbre y períodos de diseño (años). Por ejemplo, para tener una certidumbre del 90% (i.e.  $C = 0,90$ ) de que la temperatura mínima no caerá por debajo de una temperatura de daño en particular ( $T_c$ ) en los próximos 15 años, la probabilidad de que este evento ocurra en cualquier año debe ser menor de 0,007 o 0,7% (i.e. en 1 000 años, no debería ocurrir más de siete veces).

## CÁLCULOS DE LA PROBABILIDAD DE LOS EVENTOS

En la sección previa se ha establecido que una probabilidad  $P = 0,007$  corresponde a una certidumbre del 90% de que un evento extremo no ocurrirá más de 7 veces cada 1 000 años. La probabilidad de que un evento extremo ocurra en un año dado debería determinarse a ser posible calculando el cociente de sucesos extremos observados a lo largo del número de años registrados. Sin embargo, normalmente se tiene suerte si se dispone de 20 o 30 años de datos, antes que los 1 000 años o

TABLA 1.1

**Probabilidad (P) de que ocurra un evento en un año dado correspondiente a la certidumbre (%) de que el evento no ocurra durante el periodo propuesto**

CERTIDUMBRE	PERIODO DE DISEÑO (AÑOS)					
	%	5	10	15	20	25
30	0,2140	0,1134	0,0771	0,0584	0,0470	0,0393
35	0,1894	0,0997	0,0676	0,0511	0,0411	0,0344
40	0,1674	0,0876	0,0593	0,0448	0,0360	0,0301
45	0,1476	0,0767	0,0518	0,0391	0,0314	0,0263
50	0,1294	0,0670	0,0452	0,0341	0,0273	0,0228
55	0,1127	0,0580	0,0391	0,0294	0,0236	0,0197
60	0,0971	0,0498	0,0335	0,0252	0,0202	0,0169
65	0,0825	0,0422	0,0283	0,0213	0,0171	0,0143
70	0,0689	0,0350	0,0235	0,0177	0,0142	0,0118
75	0,0559	0,0284	0,0190	0,0143	0,0114	0,0095
80	0,0436	0,0221	0,0148	0,0111	0,0089	0,0074
85	0,0320	0,0161	0,0108	0,0081	0,0065	0,0054
90	0,0209	0,0105	0,0070	0,0053	0,0042	0,0035
95	0,0102	0,0051	0,0034	0,0026	0,0020	0,0017

más necesarios. Dado que los datos son limitados, la mejor aproximación es determinar una función de densidad de probabilidad a partir del conjunto de datos existentes. La función de densidad de probabilidad es una aproximación de lo que cabría esperar si dispusiéramos de 1 000 o más años de datos. Hay muchos tipos de funciones de densidad de probabilidad, pero Haan (1979) obtuvo buenos resultados para datos de temperaturas mínimas utilizando una función de densidad de probabilidad de valor extremo tipo I. La curva acumulada para una función de densidad de probabilidad de valor extremo tipo I es:

$$P(T < T_c) = 1 - \exp \left[ - \exp \left( \frac{T_c - \beta}{\alpha} \right) \right] \quad \text{Ec. 1.5}$$

donde  $\alpha = \sigma/1,283$ ,  $\beta = \mu + 0,45\alpha$ ; y  $\mu$  es la temperatura mínima media y  $\sigma$  es la desviación típica de las temperaturas mínimas en los años registrados. Por tanto, calculando la media y la desviación típica de las temperaturas mínimas de los años, calculando  $\alpha$  y  $\beta$  e insertándolos en la Ecuación 1.5, se puede encontrar la probabilidad de que la temperatura mínima en un año cualquiera caiga por debajo de  $T_c$ . La probabilidad resultante (P) de que ocurra el evento en un año

dado puede ser un dato de entrada en la Ecuación 1.3 con un periodo de diseño ( $n$ ) para estimar la certidumbre de que una temperatura extrema por debajo de  $T_c$  no ocurrirá dentro de los  $n$  años. Por ejemplo, si  $P = 0,0111$  y el periodo de diseño es de 20 años, se corresponde con una certidumbre  $C = 80\%$  de que el evento no ocurrirá en un período de 20 años (Tabla 1.1).

**CULTIVOS CON UNA SENSIBILIDAD ESTABLECIDA**

Haan (1979) presentó un método para estimar la probabilidad y el riesgo de que la temperatura caiga por debajo de un valor crítico cuando se ha establecido la sensibilidad del cultivo al daño. Se modificó el modelo y se escribió un programa MS Excel ‘TempRisk.xls’ para hacer cálculos para un período de tiempo seleccionado por el usuario. Las probabilidades se calculan utilizando una función de valor extremo tipo I y el riesgo se calcula utilizando un proceso de Bernoulli. Con este libro se incluye el programa TempRisk.xls.

**Datos de entrada**

Hasta 50 años de datos de temperatura mínima pueden introducirse en la hoja ‘Datos’ de TempRisk.xls (Figura 1.1) y ser analizados para calcular la probabilidad y el riesgo. Una precisión mayor se asocia con más años de datos, pero para un análisis fiable se requieren un mínimo de 20 años de datos. Las fechas de inicio y de finalización para el período a evaluar y la temperatura crítica son datos de entrada en las celdas de la parte superior izquierda de la hoja ‘Datos’ y la probabilidad de sobrepasar el evento se muestra debajo de la celda de la temperatura crítica.

FIGURA 1.1

Ejemplo de la hoja ‘Datos’ del programa TempRisk.xls

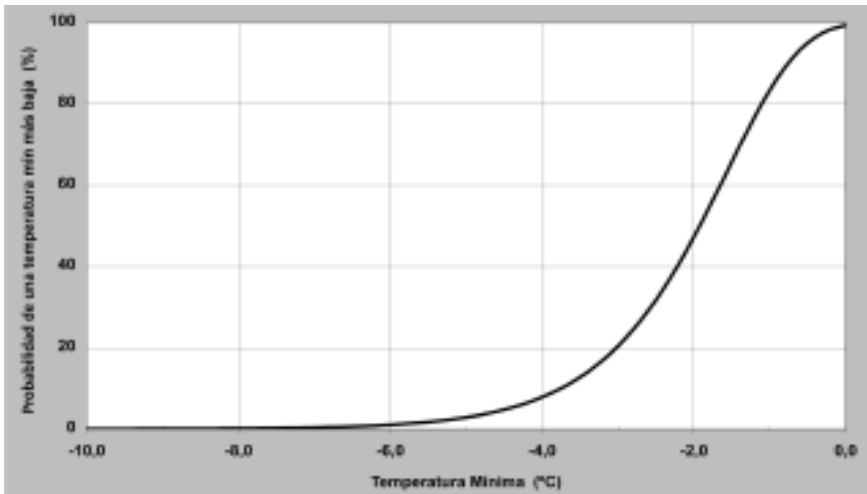
Comienzo de datos: 1 ene Fecha final: 30 dic Temp Crítica (°C): -6,0 Probabilidad (%): 8		Introducir el número del año en la fila coloreada en gris. Introducir la temperatura mínima registrada en la columna del año apropiado y la fecha correspondiente a la indicada en columna A. Dejar en blanco e introducir un * cuando no haya datos.											
FECHA	Día del año	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
1-ene	1	7	5,9	-0,8	-1,3	2,8		3,5	2,4	5,4	3,8	10,2	15,2
2-ene	2	8,3	7,4	0,8	-0,6	2,8	-0,8	0,9	8,8	3,8	2,7	8,2	12,8
3-ene	3	8,8	8,9	2,8		-1,3	-0,4	2,7	-8,9	8,1	8,7	8,8	6,4
4-ene	4	8,9	3,8	2,7		-0,8	-0,4	8,1	-2,7	8,7	7,8	8,1	2,1
5-ene	5	8,7	1,3	0,1	-0,7	-2,3		8,3	-2,3	2,4	8,8	7,8	1,8
6-ene	6	8,7	2,4	-0,8	-2,7	1,3	3,8	1,2	4,1	1,2	1,8	4,8	-4,2
7-ene	7	3,8	8,7	1,8	-1,8	7	4,8	8,1	8,2	-1,1	8,7	4,8	1,7
8-ene	8	4,4	-2	8,8	-2,1	8,2	8,8	-0,3	3,8	2,4	10,8	7,7	-1,4
9-ene	9	2,1	-8,2	7,7	4,6	7,7	4	0,1	2,8	8,8	12,4	7,2	-9,8
10-ene	10	1,8	-8,8	8,2	8,8	8,1	2,3	3,7	-8,1	0,1	10,8	8,1	1,8
11-ene	11	2,4	1,8	1,7	4	3,1	1,2	2,1	-1,8	1	8,5	3,2	4,4
12-ene	12	2,4	-2,2	-1,8	1,3	8,8	1,2	2,3	1,1		11,3	4,1	1,8
13-ene	13	2	-2,8	1,7		7,3		-1	2,8	0,8		8,8	-2,7
14-ene	14	1,1	-8,2	2,8	-0,1	7,2	10,1	-0,2	4,2	8	0,1	8,5	-3,8
15-ene	15	8,5	8,7	-0,4	-1,9	3,2	7,1	2,4	2,8	2,5	6,2	8,6	2,7
16-ene	16	8,9	-0,2	6,7	-2	2,4	4,5	3,1	5	-0,1	2,9	8,6	8

## Resultados de la Probabilidad

La probabilidad de que la temperatura mínima caiga por debajo de la temperatura crítica se representa en la hoja 'Datos'. Sin embargo, la probabilidad de tener una temperatura inferior dentro de un intervalo de temperaturas bajo cero se traza en el gráfico 'ProbHelada' (Figura 1.2). Por ejemplo, en la Figura 1.2, hay sobre un 8% de probabilidad de que la temperatura mínima caiga por debajo de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante el período del 1 de mayo hasta el 20 de diciembre para los datos que se han introducido en TempRisk.xls.

FIGURA 1.2

**La probabilidad de tener una temperatura mínima más baja durante un período de tiempo definido (del gráfico 'ProbHelada' del programa TempRisk.xls) trazada frente a la correspondiente temperatura mínima**

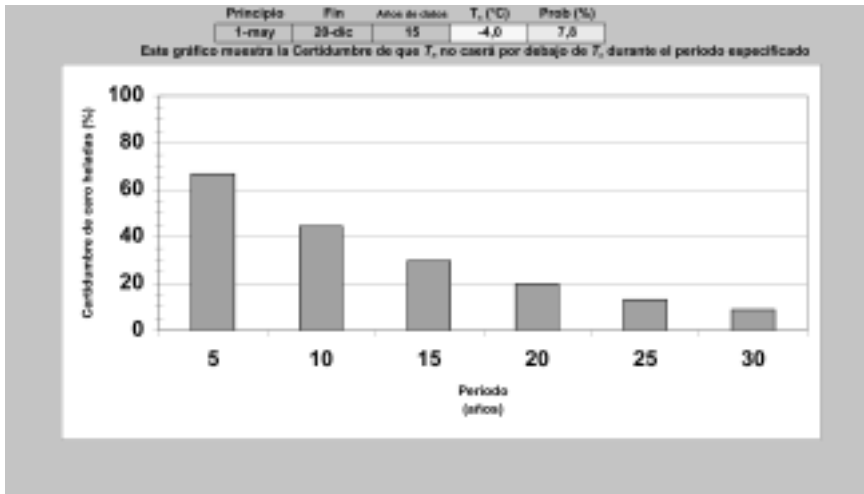


## Hoja de cálculo y gráfico del riesgo

La certidumbre de no tener temperaturas mínimas por debajo de la temperatura crítica de daño para períodos de diseño de 5, 10, ... , 30 años se ha trazado en el gráfico 'Riesgo' de TempRisk.xls (Figura 1.3). Por ejemplo, existe una certidumbre de un 65% de que la temperatura mínima no caiga por debajo de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  en un período de 5 años. Al mismo tiempo, hay una certidumbre de tan sólo un 10% de que esto no ocurra durante un período de 30 años. Claramente, un período de diseño más largo tiene más oportunidades de ocurrencia del daño.

FIGURA 1.3

**Certidumbre (%) de no tener eventos con la temperatura mínima cayendo por debajo de la temperatura crítica fijada (i.e.  $-4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) entre el 1 de mayo y el 20 de diciembre dentro de un periodo de diseño de 5, 10, ..., 30 años (de la hoja 'Riesgos' y gráfico del programa TempRisk.xls)**



## FECHAS DE LA ÚLTIMA HELADA EN PRIMAVERA Y DE LA PRIMERA HELADA EN OTOÑO

Es importante conocer la probabilidad asociada con la fecha de la última helada perjudicial en primavera y la primera helada perjudicial en otoño para planificar cuándo plantar un cultivo. Por ejemplo, una fecha de plantación tardía es apropiada si la probabilidad de temperatura dañina es demasiado alta en primavera. En el caso de que la probabilidad de una temperatura dañina sea alta, antes de la cosecha, en otoño, lo más inteligente es plantar una variedad de ciclo corto. También es ventajoso conocer la probabilidad y el riesgo cuando se desarrollan estrategias a largo plazo sobre las fechas de siembra y de cosecha, y para la selección de variedades. Además de identificar posibles problemas de heladas, analizar la probabilidad y el riesgo proporciona información sobre las posibilidades de que ocurran estos problemas. Por consiguiente, es útil decidir un nivel aceptable de riesgo para cultivar un cultivo así como para decidir si es justificable la protección contra las heladas. Con este libro se suministra el programa FriskS.xls para hacer los cálculos de probabilidad y de riesgo asociados con las fechas de la última helada de primavera y de la primera helada de otoño.

## Introducción de datos

La precisión de los cálculos de probabilidad de los datos de temperatura viene limitada por los años disponibles, por ello, un número mayor de años proporciona una estimación más precisa. Para utilizar la aplicación FriskS.xls, se introducen un mínimo de 20 años de datos de temperatura mínima diaria en la hoja "Data". No obstante, se utilizan más años de datos si están disponibles. Es importante poner el año correspondiente a los datos de temperatura en la parte superior de la columna. Una temperatura crítica introducida en una celda cerca de la parte superior izquierda de la hoja 'Datos' (Figura 1.4).

## Resultados de la Probabilidad

Una vez entrados los datos, FriskS.xls calcula las probabilidades de que ocurra una temperatura mínima por debajo de la temperatura crítica en una fecha más tardía en primavera. De forma similar, se calculan las probabilidades de que ocurra una temperatura mínima por debajo de la temperatura crítica en una fecha más temprana en otoño. Después se representan las probabilidades de tener una temperatura mínima más baja que la temperatura crítica en una fecha más tardía en primavera o más temprana en otoño con respecto a la fecha en el gráfico 'ProbHeladas' (Figura 1.5).

## Gráfico de la estación de crecimiento

La aplicación FriskS.xls también calcula las probabilidades de duración de la estación de crecimiento. Aquí, la duración de la estación de crecimiento se define como el número de días entre la media de las fechas del último día de primavera con una temperatura mínima por debajo de la temperatura crítica y la media de

FIGURA 1.4

**Ejemplo de datos de entrada en la hoja 'Datos' del programa FriskS.xls, con una temperatura crítica  $T_c = -2,0\text{ }^\circ\text{C}$**

Temperatura Crítica (°C)		Introduzca el número del año en la fila gris-clara, introduzca la temperatura mínima registrada en el año de la columna y en la fecha indicada en la columna A. Dejar en blanco o escribir un * cuando no tenga datos.												
-2.0		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13
FECHA	Día del año	1988	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998
1.ene	1	7	8.8	-0.8	-1.3	2.6	*	2.8	2.4	8.4	3.8	10.2	19.2	21
2.ene	2	8.3	7.4	0.8	8.4	2.6	-0.8	0.8	0.8	3.6	2.7	9.2	19.8	8.7
3.ene	3	6.5	6.5	2.8	*	-1.5	-0.4	2.7	-0.8	8.1	8.7	5.9	4.4	7.7
4.ene	4	6.9	5.5	2.7	*	-0.6	-0.4	0.1	-2.7	8.1	7.5	6.1	3.1	1.8
5.ene	5	8.7	1.3	0.1	-8.7	-0.9	*	6.3	-2.3	3.4	8.6	7.5	1.3	-0.3
6.ene	6	8.7	3.8	-0.8	-0.7	1.3	3.8	7.3	8.1	1.3	7.4	4.8	4.3	0.1
7.ene	7	3.8	0.7	1.8	-1.6	7	4.9	6.1	8.3	-1.1	8.7	4.8	1.7	4.3
8.ene	8	4.4	-2	5.8	-2.1	8.2	6.5	-0.3	3.8	2.4	16.9	7.7	-1.4	5.8
9.ene	9	3.1	-0.2	7.7	4.6	7.7	*	0.1	2.8	5.6	12.4	7.2	0.8	-0.8
10.ene	10	1.9	-0.8	8.8	8.8	8.1	2.3	3.7	-0.1	8.1	16.6	8.1	1.8	8
11.ene	11	2.8	1.8	5.7	4	3.1	1.2	2.1	-1.8	1	8.8	3.2	4.8	8.7
12.ene	12	2.4	-0.2	-0.8	1.3	8.6	*	2.3	1.1	*	11.3	4.1	1.8	8.8



las fechas del primer día de otoño con una temperatura mínima por debajo de la temperatura crítica. Las probabilidades son trazadas respecto a la fecha en el gráfico 'EstaciónCrecimiento'. En la Figura 1.6 se muestra un ejemplo.

FIGURA 1.5

**Un gráfico con la probabilidad de tener una fecha con la temperatura mínima más baja más tarde en primavera o más temprana en otoño versus fecha (del gráfico 'ProbHeladas' del programa FriskS.xls)**

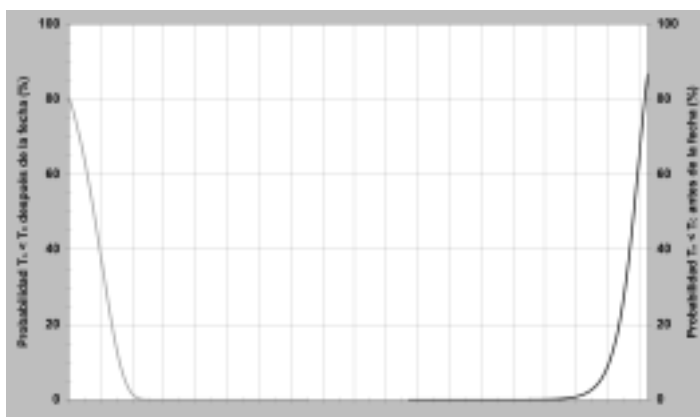
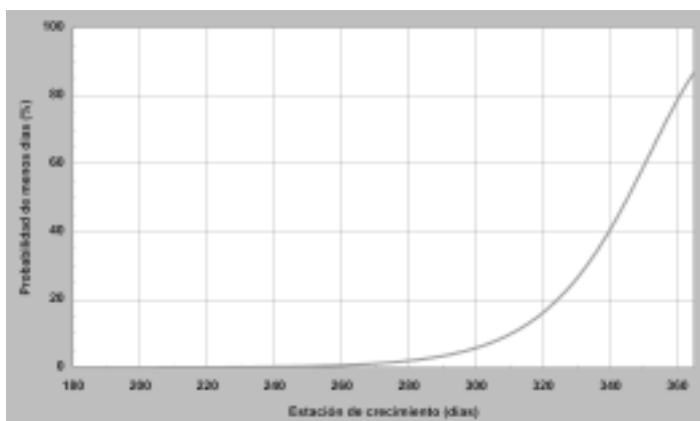


FIGURA 1.6

**Probabilidad de menos días entre la última fecha en primavera y la primera fecha en otoño con una temperatura mínima por debajo de la temperatura crítica (del gráfico 'EstaciónCrecimiento' del programa FriskS.xls)**



## Hoja de cálculo y gráfico del riesgo

La certidumbre de no tener temperaturas mínimas por debajo de la temperatura crítica (e.g.  $T_c = 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) después de una fecha seleccionada en la primavera se calcula y se muestra en la hoja y en el gráfico ‘RiesgosPrimavera’ (Figura 1.7). La fecha seleccionada (i.e. para determinar la probabilidad de que  $T < T_c$  en una fecha posterior) es un dato de entrada en la parte superior de la hoja ‘RiesgosPrimavera’ (e.g. 20 de marzo en la Figura 1.7). Se calcula y se muestra la probabilidad (%) de que ocurra un día con  $T < T_c$  después de esta fecha en un año cualquiera. Entonces, las certidumbres (%) de que no se observarán temperaturas por debajo de  $T_c$  durante los periodos de diseño de 5, 10, ..., 30 años se muestran en un gráfico de columnas. Por ejemplo, hay una certidumbre de un 45% de que no se observará una temperatura por debajo de  $T_c = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  después del 20 de marzo, pero hay menos del 1% de certidumbre de que no ocurrirá una temperatura por debajo de  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  después del 20 de marzo durante un periodo de 30 años (Figura 1.7).

Se utiliza un procedimiento similar para calcular y mostrar certidumbres de que una temperatura mínima caerá por debajo de  $T_c$  antes de la fecha seleccionada en otoño. La Figura 1.8 muestra un ejemplo de la hoja ‘RiesgosOtoño’ con la fecha seleccionada de 1 de noviembre y una  $T_c = 0,0 \text{ }^\circ\text{C}$ . De nuevo las certidumbres se muestran en un gráfico de columnas. Por ejemplo, hay una certidumbre cercana al 85% de que no habrá temperaturas mínimas por debajo de  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  antes del 1 de noviembre durante un período de 5 años. Para un período de 30 años, la certidumbre es únicamente del 35%.

## Métodos de cálculo

El programa FriskS.xls primero determina, para cada año, la fecha del último día de primavera en que la temperatura mínima cae por debajo de la temperatura crítica introducida. Después calcula la media ( $\mu_d$ ) y la desviación típica ( $\sigma_d$ ) de la última fecha en primavera durante los años registrados. Las probabilidades para la última fecha de helada en primavera se calculan utilizando:

$$P(T_n < T) = 100 \left\{ 1 - \exp \left[ - \exp \left( \frac{d - \beta_d}{\alpha_d} \right) \right] \right\} \quad \text{Ec. 1.6}$$

donde ‘ $d$ ’ es el día del año,  $\alpha_d = \sigma_d / 1,283$  y  $\beta_d = \mu_d + 0,45 \alpha_d$ .

FIGURA 1.7

Certidumbre (%) de que no haya eventos de temperatura mínima cayendo por debajo de  $T_c$  después de '20 Marzo' en 5, 10, ... , 30 años (de la hoja y gráfico 'RiesgosPrimavera' del programa FriskS.xls)

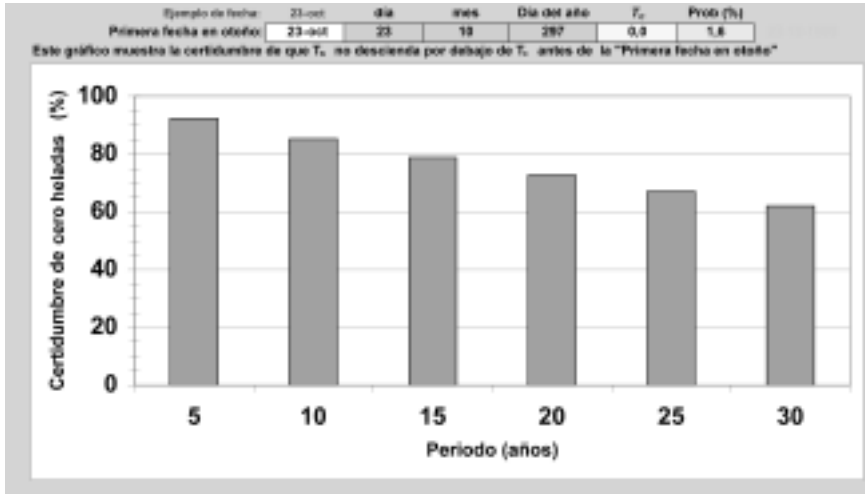
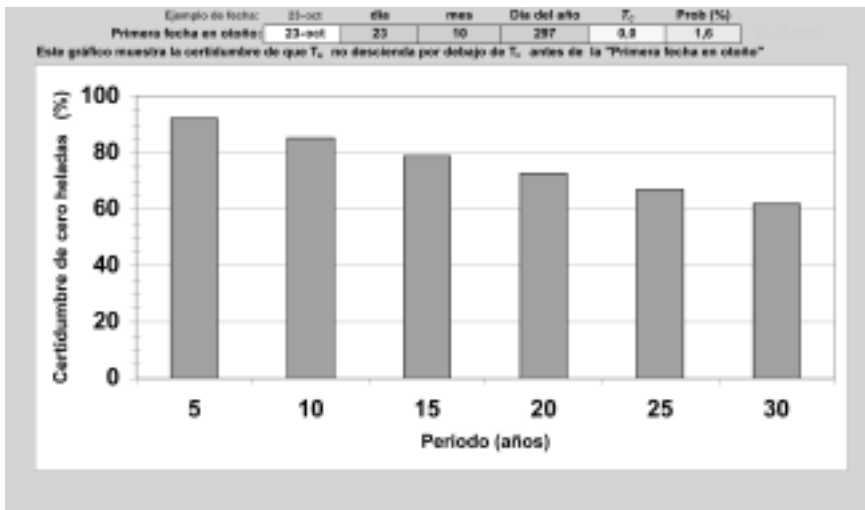


FIGURA 1.8

Certidumbre (%) de que no haya eventos con temperatura mínima cayendo por debajo de  $T_c$  antes del 1 de noviembre en 5, 10, ... , 30 años (de la hoja y gráfico 'RiesgosOtoño' del programa FriskS.xls)



Para la primera fecha con temperatura dañina en otoño se calcula la media y la desviación típica sobre los años de registro y las probabilidades se calculan utilizando las mismas ecuaciones para  $\alpha_d$ ,  $\beta_d$  y  $P(T_n < T)$ . Los cálculos de la certidumbre para los gráficos ‘RiesgosPrimavera’ y ‘RiesgosOtoño’ se hacen utilizando la Ecuación 1.3. Para los cálculos de la estación de crecimiento, las diferencias anuales entre la última fecha en primavera y la primera en otoño se utilizan para calcular la media y la desviación típica del período. Después, se utilizan las mismas ecuaciones usadas para la última fecha en primavera y la primera en otoño para calcular las probabilidades de tener menos días durante la estación de crecimiento.

### APLICACION DEL ESTIMADOR DE DAÑO (DEST.XLS)

El programa estimador de daño MS Excel ‘DEST.xls’ se usa para calcular el daño esperado por helada y el rendimiento esperado del cultivo, utilizando datos climáticos específicos del lugar, de temperatura máxima y mínima para cultivos que no tienen protección contra las heladas, y utilizando hasta 11 métodos distintos de protección contra las heladas. En el análisis pueden utilizarse hasta 50 años de datos de temperatura máxima y mínima. Las temperaturas críticas asociadas con un daño del 90% ( $T_{90}$ ) y del 10% ( $T_{10}$ ) son los datos de entrada correspondientes a los momentos fenológicos específicos. Se asume que el daño por helada es multiplicativo. Por ejemplo, una helada que causa un daño del 50% seguida de una segunda helada con un daño del 50% resultará en un pérdida de cosecha del 75% (i.e. 50% en la primera helada y 50% de 50% = 25% en la segunda helada). Se asume que el daño está directamente relacionado con la temperatura mínima y que no está relacionado con su duración.

El programa está estructurado en tres pasos. En el primero, las estimaciones de °C de protección esperadas para los 11 métodos de protección son datos de entrada en la hoja ‘EmpezarAquí’ (Figura 1.9). A continuación, hay que introducir el nombre del cultivo, la altura del cultivo, las plantas por hectárea, el tipo de planta y el rendimiento esperable sin daños por helada. Si se aplica aclareo al cultivo, hay que entrar el porcentaje de frutos eliminados en la celda apropiada. Si en el cultivo no se aplica aclareo, hay que dejar un 0% en la celda de aclareo. Cuando la aplicación se hace correr de nuevo, escriba ‘Y’ en la celda “Borrar todas las entradas previas” para eliminar las entradas previas. Hay que dejar la ‘N’ o teclear ‘N’ para dejar las entradas mostradas en la hoja, Una vez finalizadas las entradas, hay que presionar ‘Completar paso 1 de 3’ para continuar con el paso 2.

FIGURA 1.9

## Ejemplo de entradas para la hoja 'EmpezarAquí'

HESTab es un programa VBA que calcula la probabilidad de los daños esperados causados por las heladas para un cultivo y localización determinada. Después de responder a las preguntas siguientes pulse el botón "Completar Paso 1 de 3".

a. Información sobre los datos meteorológicos de los que dispone.

a.1 Localización  estado  estado  Localidad  grados

a.2 Altura de medida  metros

a.3 ¿De cuántas años de medidas dispone?  años

b. Información sobre protección contra las heladas.

Serán evaluados los métodos siguientes de protección contra las heladas:  
 Pautas tratamientos de suelo (1); cubiertas de acolchados (2); Invernaderos (3); gradío de la superficie (4); arena (5);  
 Activos calefactores (6); ventiladores y calentadores (7); Aspersores por encima de la cubierta (8); Aspersores por debajo de la cubierta (9); combinaciones (10); arena (11).

La tabla siguiente muestra la protección máxima por día en °C por cada uno de los métodos alternativos analizados individualmente. El usuario puede cambiar los niveles de protección por día en función de condiciones locales únicas y la aplicación particular. Los métodos 8, 10 y 11 deben ser definidos por el usuario si son distintos de cero.

Método	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Protección (°C)	1	1	2	1	0	3	1	0	1.5	0	0

c.

¿Nombre del cultivo/cuadrante?

¿Número del cultivo?  metros

¿Número de plantones?  árboles

¿Tipo de planta?

Araul (1), Pivoteo (total menor de 4 años) (2), edad entre 4 y 10 años (3), más de 10 años (4)

¿Protección esperada a las heladas?  años

¿% de pérdida de pequeños frutos a las heladas?  %

d. ¿Borrar todos los cuadros guardados?  N/A

En el segundo paso, hay que entrar los datos climáticos de la temperatura máxima y mínima. En la Figura 1.10 se muestra un ejemplo con los datos de temperaturas máximas y mínimas de unos pocos primeros días de algunos años. Únicamente es necesario entrar datos para el período en que sean probables las heladas. Este período debería incluir las fechas en las que hay temperaturas críticas en la tabla incluida en la hoja "Cultivo". Una vez finalizado, hay que presionar en 'Completar paso 2 de 3' para continuar.

Finalmente, el tercer paso es entrar los datos de la temperatura crítica correspondiente a las fechas de los estados fenológicos sensibles. Por ejemplo, la Figura 1.11 muestra la entrada de los datos de  $T_{90}$  y de  $T_{10}$  y las fechas de los estados fenológicos de manzano cv. Golden Delicious. El programa analizará únicamente los datos entre la primera y la última fecha con estados críticos. Por consiguiente, debería entrarse en "último estadio" tal como se muestra en la Figura 1.11 para identificar el último período.

FIGURA 1.10

**Un ejemplo de entrada de temperaturas mínimas y máximas para la hoja 'Meteorología'**

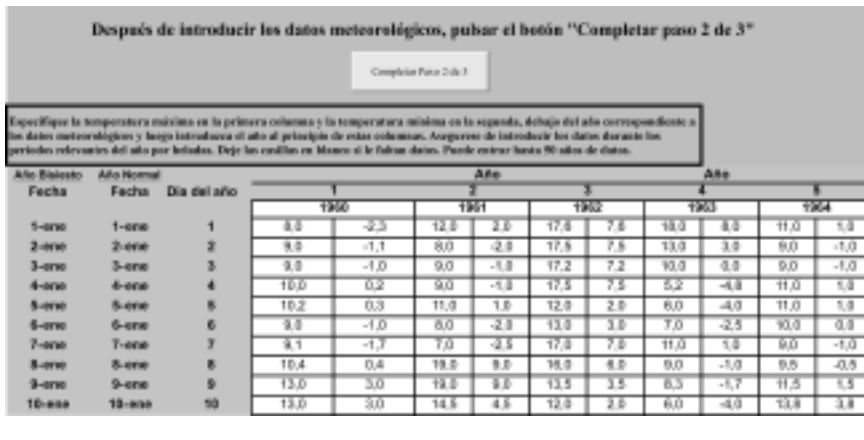
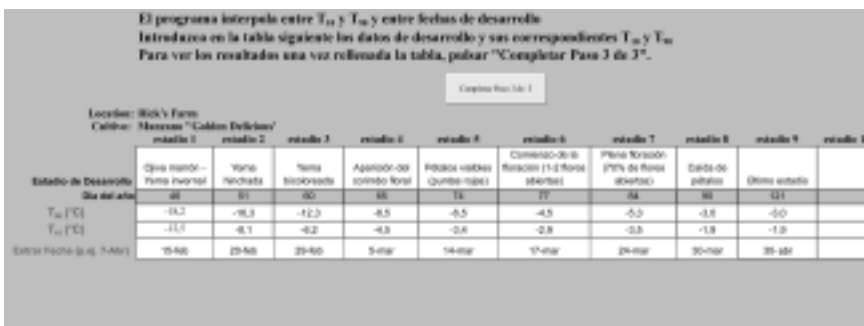


FIGURA 1.11

**Ejemplo de los datos de entrada de  $T_{90}$  y de  $T_{10}$  correspondientes a las fechas de los estadios fenológicos críticos en la hoja 'Cultivo'**



Una vez se ha finalizado con la hoja 'Cultivo', presiona sobre 'Completar paso 3 de 3' y la aplicación muestra los resultados en la hoja 'Resultados' donde se puede encontrar:

1. Una tabla del porcentaje anual de daño por helada en el fruto para un cultivo no protegido y para los 11 métodos de protección (Figura 1.12).

FIGURA 1.12

Ejemplo de la hoja 'Resultados' que muestra las medias y las desviaciones típicas del porcentaje de daño y del rendimiento para los 11 métodos de protección y sin protección

Protección	Daño		Rendimiento		Pérdida Producción		Beneficio Producción		Núm. Heladas/Año		Núm. Horas Helada	
	Promedio	Des. Est.	Promedio	Des. Est.	Promedio	Des. Est.	Promedio	Des. Est.	Promedio	Des. Est.	Promedio	Des. Est.
	(%)	(%)	(t/ha)	(t/ha)	(t/ha)	(t/ha)	(t/ha)	(t/ha)	-	-	(h)	(h)
sin helada	45.0	48.0	15.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	1.3	3.1	3.0
Método 1	20.1	30.0	27.0	6.1	2.6	3.1	3.4	3.4				
Método 2	8.5	21.0	20.0	4.6	1.0	1.1	1.1	11.4				
Método 3	8.5	21.0	20.0	4.6	1.0	1.1	1.1	11.4				
Método 4	20.1	30.0	27.0	6.1	2.6	3.1	3.4	3.4				
Método 5	45.0	48.0	15.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
Método 6	5.0	19.0	26.0	4.6	0.0	0.0	3.1	10.0				
Método 7	8.5	21.0	20.0	4.6	1.0	1.1	1.1	11.4				
Método 8	3.0	11.0	20.0	1.0	0.0	0.0	3.0	10.7				
Método 9	14.0	20.0	21.0	4.7	3.7	4.3	4.0	10.0				
Método 10	45.0	48.0	15.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
Método 11	45.0	48.0	15.0	11.0	0.0	0.0	0.0	0.0				
Pérdida	0.0	0.0	25.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0				

Tabla de Producción Comercial Anual  
se encuentra a la derecha de la barra negra.

Fracción de pérdida potencial de la producción por daños causados por las heladas, con y sin protección

Año	sin método	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 5	Método 6	Método 7	Método 8	Método 9	Método 10	Método 11
1960	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1961	0.04	0.11	0.09	0.09	0.11	0.04	0.06	0.08	0.12	0.05	0.04	0.04
1962	0.17	0.11	0.00	0.00	0.11	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.17
1963	1.00	0.03	0.26	0.26	0.03	1.00	0.00	0.26	0.00	0.07	1.00	1.00
1964	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1965	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.61	1.00	1.00	1.00
1966	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.23
1967	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1968	0.13	0.07	0.01	0.01	0.07	0.10	0.00	0.03	0.00	0.01	0.10	0.13
1969	0.00	0.01	0.10	0.10	0.01	0.00	0.00	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00
1970	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.11
1971	1.00	0.09	0.02	0.02	0.09	1.00	0.00	0.02	0.00	0.16	1.00	1.00
1972	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1973	0.11	0.17	0.10	0.10	0.17	0.70	0.00	0.10	0.00	0.23	0.70	0.71
1974	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

\*\*\* Fracción de Producción Comercial Anual  
se encuentra a la izquierda de la barra negra

Producción comercial con y sin protección

Año	sin método	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Método 5	Método 6	Método 7	Método 8	Método 9	Método 10	Método 11
1960	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
1961	2.97	12.44	20.97	20.97	12.44	2.97	21.00	20.97	21.00	21.00	17.70	21.00
1962	20.49	25.00	25.00	25.00	21.49	21.49	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00
1963	0.00	0.32	25.00	25.00	0.32	0.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.63
1964	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
1965	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19.56	0.00
1966	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	21.00	20.00
1967	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
1968	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	21.00	21.00
1969	2.23	17.64	25.00	25.00	17.64	2.23	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00
1970	21.53	25.00	25.00	25.00	21.00	21.53	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00
1971	0.00	20.82	20.00	20.00	20.82	0.00	20.00	20.00	20.00	20.00	21.00	20.00
1972	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
1973	12.44	25.00	25.00	25.00	12.44	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00	21.00
1974	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00

En la hoja de cálculo se muestra también la fracción de pérdida de producción potencial debido al daño por helada y la producción comercial para cada año y método de protección. En la aplicación DEST.xls, se muestra la parte inferior de la tabla a la derecha de la tabla del medio.

- Una tabla del rendimiento anual en toneladas por hectárea para el cultivo no protegido y para los 11 métodos de protección. Si en la hoja 'EmpezarAquí' se ha entrado un porcentaje de frutos aclarados, no hay reducción del rendimiento hasta que ese porcentaje de frutos se ha perdido primero debido a daño por helada. Por ello, si hay una helada, se asume que el daño

por helada aclara el cultivo y únicamente las pérdidas adicionales al aclareo afectarán al rendimiento final.

3. Una tabla resumen con medias y desviaciones típicas anuales del porcentaje de pérdidas de frutos, y medias y desviaciones típicas de los rendimientos del cultivo (Figura 1.12).
4. En la tabla resumen se muestran la media y la desviación típica del número de heladas y de su duración.

En este capítulo se investiga el cálculo del riesgo físico de daño por helada, y se presenta cómo utilizar e interpretar el calculador de riesgo de daño físico de helada (DEST.xls). En el próximo capítulo, se investiga y se evalúa, en términos económicos, la decisión financiera de si hay que implementar o no la protección contra las heladas. El concepto de riesgo es, en consecuencia, extendido desde el riesgo físico al riesgo financiero. Se presenta un programa de ordenador personal para ayudar en la toma de decisiones.