

5 · Os danos de geada: conceitos, mecanismos e modelos de simulação

José Paulo de Melo-Abreu¹, António Castro Ribeiro²

¹ Centro de Estudos de Engenharia dos Biosistemas, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa

² Centro de Investigação de Montanha, Escola Superior Agrária, Instituto Politécnico de Bragança

jpabreu@isa.utl.pt; antrib@ipb.pt

Resumo

A ocorrência de geada, quando a generalidade das culturas se encontram num estado de desenvolvimento de elevada sensibilidade às baixas temperaturas, provoca frequentemente prejuízos avultados com consequências graves para a produção agrícola. O rendimento dos agricultores é severamente afectado e a não estabilização das produções tem igualmente consequências ao nível das empresas e cooperativas do sector. A minimização dos danos pode ser feita se se tomarem medidas preventivas (protecção passiva) ou actuando activamente durante a ocorrência da geada. O conhecimento dos processos físicos relacionados com a ocorrência de geada e com os danos nas plantas é fundamental para um adequado e eficaz combate na luta contra a geada.

Neste capítulo resumem-se os aspectos mais importantes das condições que levam à ocorrência de geada e definem-se os conceitos relacionados com os vários tipos de geada. Descrevem-se resumidamente os sintomas e os aspectos citológicos e histológicos da geladura e discutem-se os seus mecanismos. Abordam-se os métodos de sobrevivência (ou resistência) às geadas numa perspectiva estática e de oscilação da geado-resistência, atendendo ao seu estado de desenvolvimento e ambiente recente, e estimam-se os seus limites de sobrevivência.

É apresentado um modelo que permite calcular os danos por geada, por confrontação das temperaturas do ar com as temperaturas críticas de forma dinâmica e atendendo aos estados fenológicos. O modelo calcula os valores médios dos prejuízos e a sua distribuição estatística, e quebras de produção relacionadas, em relação a onze métodos de luta contra as geadas.

Palavras-chave: geada; geladura; temperaturas críticas, resistência às geadas, modelos de simulação

Abstract

The occurrence of frost, when the crops are very sensitive to low air temperature, causes serious damage with significant effects on production. The profit of the farmers involved is severely reduced and the impacts on the affected enterprises are often devastating, due to non stabilization of the production. Frost damage can be avoid or reduced by passive protection methods that are implemented before a frost night or active methods during a frost night. The knowledge of the physical processes of frost occurrence and frost damage is very important for implement and manage adequately the frost protection methods.

This chapter resumes the most important aspects of frost occurrence conditions and defines frost and the different types of frost. It also describes the symptoms and cytological and histological aspects of the freezing process and discusses the mechanisms that originate frost damage. A short discussion of the survival (or resistance) to freezing in a static and dynamical perspective, considering the plant development stage and recent environmental conditions, is presented.

A model that calculates the risk of frost damage, using air and plant critical temperatures, in a dynamical way, thus taking into account phenological stages, is present. The model calculates the average damage and its statistical distribution and the related yield losses in relation to eleven frost protection methods.

Keywords: frost; freeze, critical temperatures, frost resistance, simulation models

5.1. Introdução

A geada consiste na ocorrência de uma temperatura do ar inferior a 0°C , medida em abrigo meteorológico apropriado a uma altura entre 1,25 e 2m (1,5m em Portugal). As geadas ocorrem quando uma massa de ar é substituída por outra mais fria (geadas de advecção), ou quando há acentuado arrefecimento nocturno, resultante principalmente da falta de nuvens e concomitante baixo valor da radiação da atmosfera (geadas de radiação). Neste caso, em que o balanço nocturno da radiação é muito negativo e há pouco vento, o ar vai arrefecer por baixo, em contacto com a superfície fria, e como a agitação do ar é baixa, esta perda de calor vai fazer-se sentir até a uma altura que não cessa de aumentar durante a noite de geada. Dentro da camada de ar que é arrefecida pela superfície, a temperatura sobe em altura (i.e., dá-se uma inversão térmica), o que contrasta com o que acontece durante o dia na troposfera, em que a temperatura desce com a altura acima da superfície. A figura 5.1 apresenta a formação duma inversão térmica acima dum pomar de macieiras em Carrazeda de Ansiães.

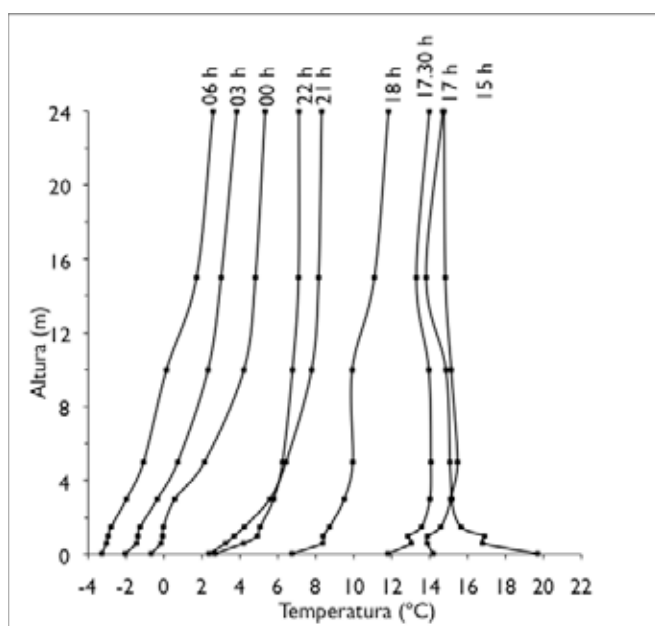


Figura 5.1. Curso do perfil da temperatura numa noite de geadas sobre um pomar de macieiras em Carrazeda de Ansiães (Ribeiro, 2003).

O termo *geada branca* refere-se à geada que é acompanhada pela formação de cristais de gelo produzidos pela congelação do orvalho, ou pela sublimação do vapor de água, sobre as superfícies dos corpos arrefecidos. A *geada negra* ocorre quando a ponto de orvalho é mais baixo do que a temperatura negativa nefasta atingida pelos órgãos vegetais. Deve-se esta designação ao aspecto necrótico

apresentado pelos órgãos vegetais: parecem “queimados”. Note-se que a necrose, sintoma de morte dos tecidos vegetais, pode ocorrer também após a ocorrência duma *geada branca* que causou danos. Na verdade diz-se que houve *geada negra* quando vemos os tecidos danificados apresentando-se enegrecidos; a *geada branca* não é ainda um sintoma de geladura, pois pode-se não ter atingido o limite de resistência das plantas, não havendo, então, morte dos tecidos. Uma é um facto consumado; outra é apenas sinal de que podem aparecer danos.

Nas condições micrometeorológicas presentes numa noite de geada, os órgãos vegetais perdem muito calor, ficando as suas temperaturas próximas das do ar, embora mais baixas um ou dois graus Celsius, na generalidade dos casos. A previsão da temperatura dum órgão vegetal é feita através do balanço energético desse órgão, o que não é uma tarefa simples visto que esses órgãos estão sujeitos a microambientes variáveis resultantes da sua posição no coberto vegetal (Snyder e De Melo-Abreu, 2005).

As soluções aquosas presentes nos tecidos vegetais, em regra, não congelam imediatamente quando as temperaturas destes tecidos são mais baixas do que as temperaturas a que pode ocorrer essa congelação, olhando apenas para o seu potencial osmótico: verifica-se, então, o fenómeno da sobrefusão. Se as temperaturas continuarem a descer, a congelação é inevitável. Congelam, então, as soluções extracelulares, que têm um potencial osmótico mais alto (pressão osmótica mais baixa). Uma vez iniciada a congelação extracelular, a água começa a sair das células em resposta a um gradiente de potencial químico. Os protoplastos sofrem, assim, uma desidratação que pode levar a danos irreversíveis. Pode ocorrer desnaturação de proteínas nucleares, transição de fase das membranas celulares, e até a perfuração destas membranas pelos cristais de gelo, nos tecidos das plantas mais sensíveis. A congelação intracelular, se existir na natureza, deve restringir-se aos tecidos mais sensíveis e às taxas de descida da temperatura mais elevadas.

Algumas plantas desenvolveram mecanismos de evitação e/ou tolerância à congelação. Por isto, existe muita variabilidade entre espécies/variedades vegetais no tocante à resistência às geadas. A mesma planta/tecido tem resistência diferenciada de acordo com o seu estado de desenvolvimento, grau de aclimação, e concentração de nucleadores do gelo nas suas superfícies. Este último factor pode ter uma grande importância. Existem bactérias que são activas na nucleação do gelo e que podem ocorrer em concentração variável de acordo com o microclima, tipo de cobertura do solo, operações culturais realizadas. Altas concentrações dessas bactérias podem elevar a temperatura de congelação em alguns graus Celsius.

Em termos operacionais, interessa saber calcular a temperatura dos órgãos vegetais e conhecer a temperatura crítica para a fase fenológica em que se encontram as plantas. As folhas, flores e frutos, em noites de geada de radiação, podem estar a uma temperatura até 2°C mais baixa do que a temperatura do ar.

Um modelo que permite calcular os danos por geada, por confrontação das temperaturas do ar com as temperaturas críticas de forma dinâmica e atendendo

aos estados fenológicos, foi desenvolvido por nós e será apresentado. O modelo calcula os valores médios dos prejuízos e a sua distribuição estatística, e quebras de produção relacionadas.

5.2.A geladura

A geladura – dano causado nas plantas pela geada – é causa importante de perdas de produção agrícola. A dessincronização entre o ciclo vegetativo das plantas e as variações sazonais da temperatura é responsável pela maior parte das geladuras. Com efeito, têm-se conseguido maiores ganhos de produtividade por selecção em relação à adaptação ao ambiente do que em relação à produção potencial.

Mesmo nas espécies adaptadas, a geladura costuma ser importante nos extremos do semestre mais frio - geadas tardias de primavera e precoces de outono. Durante invernos particularmente rigorosos os danos são frequentes no limiar de distribuição das espécies. Por outro lado, variações rápidas de temperatura podem também levar ao aparecimento de prejuízos.

A geladura pode ter efeitos drásticos sobre a vegetação ou, pelo contrário, levar somente a um enfraquecimento da planta só se evidenciando os danos mais tarde.

Pode afectar a produção e/ou a qualidade; conforme a época da ocorrência de geada, espécie, geado-resistência evidenciada por esta, poder de recuperação dos tecidos afectados, por um lado, e, por outro, a intensidade e duração da geada.

A geladura está directa ou indirectamente ligada à formação de gelo nos tecidos e pode afectar plantas herbáceas anuais, bienais e perenes; e árvores e arbustos lenhosos durante a época de crescimento, ou fora dela.

5.2.1. Sintomas de geladura

As **culturas hortícolas** quando sofrem geladura apresentam sintomas muito variados, por exemplo, apresentam o aspecto ensopado, após descongelação, mudanças de cor e textura, e manchas (Caplan, 1988).

Em zonas com invernos muito rigorosos, as **gramíneas** podem ser danificadas no inverno, principalmente quando não há acumulação de neve que as isolaria. As folhas e caules podem ser danificados e recuperar, mas quando o nó de afilhamento é danificado a planta não recupera. Por altura da floração/vingamento, os danos nos cereais dão-se, fundamentalmente, devido ao abortamento das flores/grãos. Neste caso, as espigas ainda verdes ficam logo a seguir com a parte afectada descorada e, mais tarde, nota-se que as secções afectadas ficam mais finas e as espigas não tombam, como acontece normalmente devido ao peso dos grãos (figura 5.2).



Figura 5.2. Geladura do trigo. O terço superior da espiga está mais fino e as aristas estão encurvadas (esquerda); mais tarde as espigas mantêm-se direitas devido ao baixo peso do grão.

Nos invernos mais rigorosos, as culturas **perenes** podem sofrer fendilhamentos no xilema, ou morte das células parenquimatosas dos raios do xilema. Neste caso, as células ficam necróticas, devido à oxidação. As árvores afectadas, embora percam potencial produtivo e longevidade, em geral, não morrem, mas os seus troncos são progressivamente invadidos por organismos da podridão da madeira. Nos invernos mais rigorosos, a folhagem das árvores de folha persistente e os ramos não atempados, são frequentemente danificados. Os gomos dormentes das caducifólias, são muito geadoresistentes, mas quando desaclimatam parcialmente, durante um período relativamente quente, podem também sofrer danos.

As fruteiras caducifólias, aquando da floração ou vingamento, são muito susceptíveis à geada. Os tecidos das plantas variam na sua susceptibilidade às baixas temperaturas, sendo os dos órgãos reprodutores os menos resistentes. Quando o número de células afectadas deixa de ser desprezável, os danos reflectem-se no aspecto e qualidade ou, em casos mais graves, provocam a queda das flores ou frutos. O estilete é particularmente sensível – mais do que o ovário – e a sua destruição antes da fertilização é irremediável. Após a fertilização, as sementes são os órgãos mais sensíveis às baixas temperaturas. As sementes são essenciais ao normal desenvolvimento da polpa carnuda dos frutos, por via das hormonas que libertam, e sementes danificadas não exercem esta função. Algumas variedades de pereira e macieira podem, contudo, dar origem a frutos partenocárpicos, não se perdendo totalmente a produção. No caso das prunóideas, esta perda de sementes é mais

grave porque têm quanto muito duas; os frutos de pevide têm um maior número de sementes. Quando a inviabilização das sementes é apenas parcial, os frutos podem não cair, mas resultam deformados. Deformações podem, também, ter a sua origem na geladura da pele dos frutos e subsequente suberificação, o que impede o crescimento normal da parte afectada do fruto (Modlibowska, 1975; Snyder e De MeloAbreu, 2005). A figura 3 mostra alguns danos que se verificam em flores e frutos de macieira.

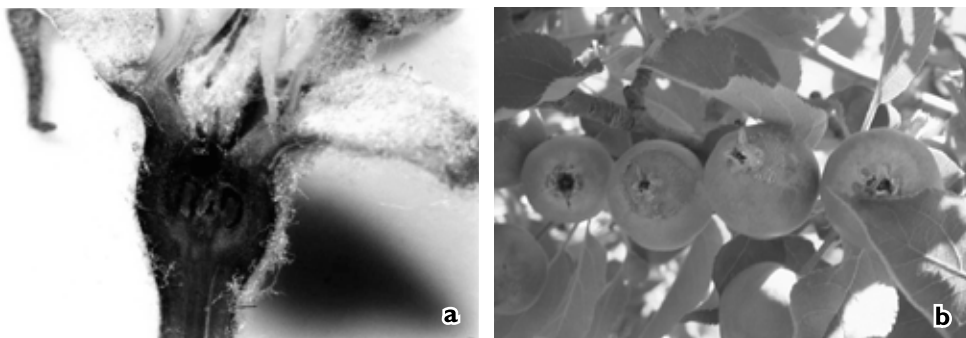


Figura 5.3. Geladura numa flor de macieira (a) e de frutos (b).

5.2.2. Aspectos citológicos e histológicos da geladura

A água pura gela a 0°C , mas a sobrefusão dá-se frequentemente até aos -5°C . A sobrefusão cessa prontamente quando o líquido sobrefundido é inoculado por um núcleo de congelação – p. ex., um cristal de gelo, um núcleo de congelação atmosférico ou bactérias. Tanto as soluções celulares como as intercelulares – mais aquelas do que estas – têm uma determinada concentração de substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas, pelo que o seus pontos de fusão são inferiores a 0°C (geralmente, é inferior a -1°C). Por outro lado, devido à sobrefusão o congelamento dos tecidos vegetais não tem início acima de uns $-1,5^{\circ}\text{C}$. Esta temperatura é o limite superior da resistência natural das plantas à geada. Note-se, contudo, que a maioria, senão todos, os frutos, vegetais e ornamentais de origem tropical estão sujeitos a dano fisiológico quando sujeitas a temperaturas abaixo de cerca de $12,5^{\circ}\text{C}$, mas acima da sua temperatura de congelação (Morris, 1982). No entanto, esta condição não é geladura: trata-se de *dano por resfriamento*.

5.2.2.1. Congelação extracelular

Um tecido parenquimatoso (figura 5.4.A) apresenta as células arredondadas separadas entre si pelas soluções intercelulares. Admitamos que este tecido está a ser arrefecido a uma taxa moderada, digamos $0,6-0,7^{\circ}\text{C}/\text{h}$, valor normal em condições naturais no fim da noite. Então, existe uma temperatura ($<-1,5^{\circ}\text{C}$) em que cessa a sobrefusão: inicia-se a congelação. Admitamos, também, que a sobrefusão foi ligeira. Então, devido à menor tensão osmótica das soluções intercelulares é

no seu seio que aquela se inicia e prossegue. Os cristais de gelo formados desenvolvem-se a uma taxa proporcional à taxa de arrefecimento, primeiramente à custa da água intercelular. Posteriormente, devido ao gradiente de tensão de vapor criado pelo facto da tensão de vapor ser inferior sobre o gelo do que sobre a água líquida, à mesma temperatura, - dá-se uma saída de água do protoplasto. Ora, esta saída não permite que o suco celular congele, devido ao aumento da concentração e concomitante abaixamento progressivo do ponto de congelação. Enquanto baixa a temperatura, este processo prossegue apresentando-se o protoplasto em plasmólise cada vez mais encolhido entre os cristais de gelo que se avolumam: a desidratação prossegue.

Quando o abaixamento da temperatura cessa, o tecido congelado apresenta as células embutidas na massa de cristais de gelo, os seus volumes reduziram-se e algumas (pocas) podem evidenciar rotura – para dentro – das membranas (figura 5.4.B).

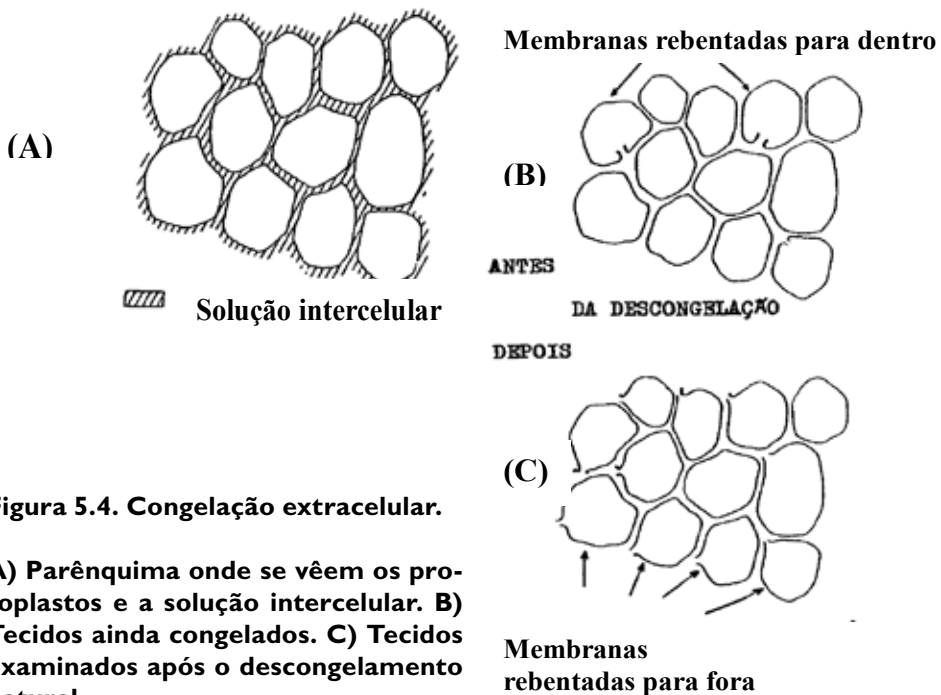


Figura 5.4. Congelação extracelular.

A) Parênquima onde se vêem os protoplastos e a solução intercelular. B) Tecidos ainda congelados. C) Tecidos examinados após o descongelamento natural.

Um aumento gradual da temperatura conduz a uma desplasmólise, na sequência da fusão do gelo formado e em resposta ao gradiente de tensão osmótica. Após a descongelação, algumas células têm as membranas rebentadas – para fora – apresentando-se as outras aparentemente intactas (figura 5.4.C).

Quando a desidratação não atingiu valor letal para as células estas recuperam, excepto as que apresentaram rotura; caso contrário as células sofrem transformações que conduzem à morte. Quando o grau de desidratação sofrido pelas células é superior ao limiar de resistência dois casos se podem observar (Asahina, 1978):

As células readquirem a sua turgidez inicial não mostrando qualquer alteração. Posteriormente, contudo, exibem modificações patológicas, tais como, enegrecimento lento, granulação fina ou grosseira, aparência espumosa (parcial ou total) do protoplasma, e acentuação do contorno do núcleo, acabando por morrer.

A morte ocorreu durante a desidratação e contracção das células. Nestas células o núcleo desnaturado aparece claramente, logo após a descongelação da célula. Por vezes, o protoplasto desnaturado apresenta-se contraído após a descongelação.

5.2.2.2. Congelação intracelular

Suponhamos, agora, que o arrefecimento dos tecidos é muito rápido (p. ex., 10°C/min), a sobrefusão é elevada, e/ou as células são de plantas sensíveis (ou que ainda não aclimataram); então é provável que o gelo também se forme no protoplasma – congelação intracelular (Burke *et al.*, 1976; Weiser, 1979).

Uma taxa rápida de arrefecimento origina uma descida grande da curva da temperatura visto que o défice, energético criado pelo arrefecimento não é atenuado convenientemente pelo calor latente libertado por congelação da água protoplásmica que aflui aos meatos. Então, as curvas da temperatura e do ponto de congelação do suco celular interceptam-se, havendo congelação intracelular quando o desvio entre estas duas curvas se torna suficientemente grande.

As plantas/tecidos sensíveis à geada (ou que ainda não aclimataram) têm as membranas celulares menos permeáveis, caindo-se numa situação semelhante à anterior, mesmo com taxas de arrefecimento mais moderadas.

Por último, a sobrefusão elevada leva a que, após a sua cessação, o congelamento extracelular se faça a uma taxa muito elevada. Pode acontecer que a permeabilidade das membranas celulares não seja de molde a permitir uma saída de água plasmática a uma taxa suficiente que evite a congelação intracelular.

Note-se que em condições artificiais a congelação intracelular tem sido observada repetidas vezes, contudo, resta, ainda hoje, contudo, a dúvida se a sua ocorrência natural é possível ou não. Deve, contudo, realçar-se que a ocorrência de congelação intracelular conduz invariavelmente à morte das células, em condições próximas das naturais. Só taxas de arrefecimento espantosas – da ordem dos 1000°C/min – permitem a sobrevivência dos tecidos após descongelação. O dano causado pela congelação intracelular parece ser mecânico – destruição, por perfuração, dos sistemas de membranas que fazem a compartimentação da célula – só não existindo quando os cristais são minúsculos como acontece no caso de congelações extremamente rápidas (Levitt, 1978).

5.2.2.3. Discussão dos mecanismos de geladura

Existem três grandes grupos de mecanismos que têm sido apontados como susceptíveis de explicar a geladura:

- **Mecanismos em que o gelo é a causa directa da morte dos tecidos/plantas**

O padrão de formação dos cristais de gelo, sua localização e tamanho são importantes para a compreensão dos “stresses” mecânicos sobre o protoplasma e membrana plasmática. Os cristais de gelo, quando se inicia a congelação (extracelular) são pequenos e imperfeitos, sendo relativamente inócuos para as células/tecidos. À medida que a temperatura baixa vão tornando-se maiores, à custa da água dos protoplastos.

Tecidos que têm grande resistência à formação de gelo extracelular apresentam, a taxas moderadas de arrefecimento e congelação, locais preferenciais para a formação de gelo, de molde que as massas cristalinas em desenvolvimento afectem o menos possível o protoplasto. O gelo inicia o seu desenvolvimento junto às paredes celulares, tendo, provavelmente, os polímeros destas influência no desenvolvimento da estrutura dos cristais que se formam. Tecidos mais sensíveis ao gelo extracelular apresentam uma distribuição mais desordenada das massas de gelo formadas (Weiser, 1982).

Por outro lado, em tecidos de plantas com maior resistência ao gelo extracelular, o protoplasto tem um volume relativamente menor em relação ao volume total da célula e, por vezes, há a presença de gases extracelularmente. Quando a taxa de arrefecimento é grande os cristais são mais pequenos e com maior desenvolvimento ao longo do eixo *c* da sua estrutura hexagonal e a água não tem tempo de migrar para os locais mais favoráveis ao desenvolvimento do gelo, podendo resultar daí danos para as células. O padrão de distribuição do gelo, nos tecidos é, também, importante; por exemplo, grandes massas de gelo formadas em determinados tecidos podem diminuir a congelação – aumentando a resistência – nos tecidos vizinhos (Olien, 1967).

É sabido, também, que um grau de hidratação elevado conduz, em determinados tecidos, a uma diminuição da tolerância ao gelo extracelular – supostamente devido à dificuldade de acomodar tão elevadas quantidades de gelo extracelularmente (Burke *et al.*, 1976; Weiser, 1982).

- **Mecanismos fisiológicos em que a dessecação, provocada pela a presença de gelo extracelular, é a causa próxima da inviabilização das células/tecidos**

As células que não sofrem pressão do gelo extracelular não têm meio de saber da sua existência. Contudo, a desidratação resultante cria diversos “stresses” que têm que ser levados em linha de conta sob os aspectos, físico e químico.

As hipóteses mais correntemente aceites envolvem a desnaturação de

proteínas, como causa profunda de morte das células por dessecação, e são:

Hipótese sulfidrilo-dissulfureto:

A saída de água do protoplasto deixa as cadeias proteicas mais próximas umas das outras, permitindo a formação de ligações dissulfureto cruzadas (Abreu, 1985). Resulta, então, a desnaturação e agregação das proteínas de acordo com o esquema da figura 5.5:

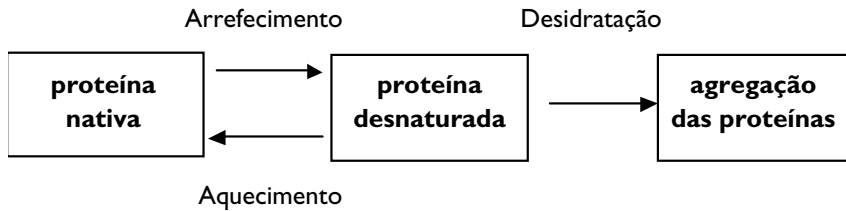


Figura 5.5. Processo de desnaturação e agregação das proteínas.

Seriam aquelas ligações as responsáveis pelos “stresses” resultantes da fusão e hidratação das células atingidas. Um potencial oxidação-redução elevado, é condição necessária para que os grupos sulfidrilo formem ligações dissulfureto.

Outras hipóteses:

A letalidade resultaria da remoção de pequenas quantidades de água necessária à estabilidade das proteínas ou à sua passagem ao estado sólido. A desnaturação das proteínas pode, também, ser resultante do aumento da concentração de sais, e variação pH, Eh, concentração de proteína (Abreu, 1985).

- **Mecanismos em que, a temperatura que induz modificações de consequências letais, nas moléculas orgânicas celulares**

A temperatura pode levar à transição de fase não só a água, mas também outros componentes celulares. Por outro lado, outras transformações estruturais, fortemente dependentes da temperatura, podem ocorrer em polímeros cujas unidades são muito semelhantes: proteínas, ácidos nucleicos, etc.

Sabe-se que as células de determinado tecido, a baixas temperaturas, morrem quase simultaneamente, à temperatura letal. Portanto, qualquer processo candidato a mecanismo de geladura tem que ter necessariamente esta forte dependência da temperatura. As membranas, proteínas e ácidos nucleicos evidenciam modificações estruturais que são fortemente dependentes da temperatura. Os lípidos das membranas (celular, mitocondrial, cloroplástica, glioxisomal, etc.) apresentam transição de fase líquida - cristalina ↔ sólida-gel, com a variação da temperatura alta↔baixa. Também o enfraquecimento das ligações hidrofóbicas, na dupla camada de lípidos das membranas, pode levar à sua desnaturação; já que as ligações hidrofóbicas enfraquecem a temperaturas baixas (Abreu, 1985).

5.3. Resistência das plantas e tecidos à geada

A resistência das plantas à geada (i.e., *geado-resistência*) está longe de ser um conceito de fácil definição. As plantas têm muitos órgãos e tecidos, que apresentam susceptibilidades diferentes a esta componente do ambiente físico. Pode a destruição deste ou daquele órgão/tecido não comprometer o desenvolvimento vegetativo, mas somente uma função determinada, que pode, ou não, ser importante, segundo o ponto de vista que adoptarmos. Infelizmente, são precisamente os órgãos sexuais os que normalmente são mais sensíveis. Durante o estado de dormência fisiológica as plantas evidenciam uma resistência acrescida às baixas temperaturas, vendo-se esta drasticamente diminuída durante o crescimento activo. O grau de resistência é também variável, variando de acordo com o estado fenológico, durante a época de crescimento visível. Para que a situação se complique ainda mais, mesmo para a mesma espécie/variedade e estado de crescimento, a idade da planta, ambiente recente (especialmente no que se refere à temperatura, humidade e insolação máxima), e a concentração de bactérias nucleadores do gelo, influenciam a geado-resistência.

5.3.1. Métodos de sobrevivência (ou resistência) às geadas

Depois de termos abordado resumidamente os mecanismos de geladura, interessa-nos falar sobre os métodos que permitem a sobrevivência (resistência) às geadas (figura 5.6). Adoptaremos uma perspectiva essencialmente estática. Na secção seguinte daremos uma ideia da oscilação da geado-resistência, atendendo ao seu estado de desenvolvimento e ambiente recente, e estimaremos os seus limites de sobrevivência.

5.3.1.1. Evitação da temperatura baixa

A sobrevivência das plantas, órgãos e/ou tecidos às geadas, pode resultar, quer de factores inerentes àqueles, quer de factores micrometeorológicos.

O microambiente favorável pode ser natural ou resultante da intervenção humana. Alguns exemplos (Abreu, 1985):

- a) A existência de neve, devido às suas propriedades isolantes, permite a sobrevivência através do inverno de muitas espécies de pequeno porte (morangueiros, cereais de inverno, leguminosas e gramíneas pratenses, diversas ornamentais, etc.); confere, também, protecção às raízes de numerosas árvores e arbustos; - resultando a sua ausência letal para muitas plantas, em regiões de invernos muito rigorosos.
- b) As folhas (citrinos) têm uma baixa condutividade térmica, podendo actuar como escudos de radiação conservando o calor apesar da sua pequena massa. Este efeito protector pode ser de grande interesse em casos de geada de radiação, verificando-se que os frutos, flores e outros órgãos podem, quando mergulhados na folhagem, sofrer menos danos.
- c) Alguns tecidos estão, também, protegidos por evitação das temperaturas

negativas danosas – principalmente quando a geada é de pequena duração – por um desfasamento entre a temperatura do ar e a dos tecidos. Uma árvore pequena ou um pequeno ramo não podem opor-se às temperaturas negativas por mais de alguns minutos, enquanto que as árvores grandes e ramos grandes podem, frequentemente, evitar estas temperaturas, durante toda uma noite de geada. Este desfasamento depende, além da condutividade térmica e massa da parte da planta, do gradiente de temperatura entre a superfície e o tecido.

Alguns métodos de luta contra as geadas apostam precisamente na modificação do microambiente (cf., Snyder e De Melo-Abreu, 2005).

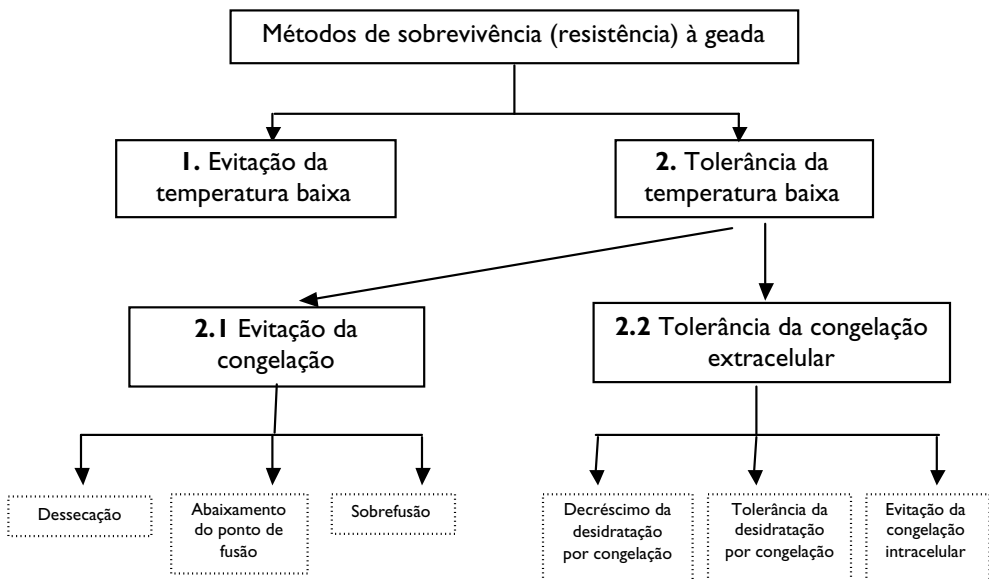


Figura 5.6. Representação esquemática dos métodos de sobrevivência das plantas à geada.

5.3.1.2. Tolerância da temperatura baixa

Em condições naturais a sobrevivência às geadas é, contudo, determinada fundamentalmente pela resistência das plantas à geada. Esta resistência pode resultar de evitação ou tolerância da congelação extracelular (figura 5.5).

- **Evitação da congelação**

Estes métodos impedem a formação de cristais de gelo extracelularmente. São para muitas plantas os únicos que lhes permitem a sobrevivência. Estas plantas estão particularmente adaptadas a “habitats” onde há, apenas, geadas de radiação de pequena intensidade.

Entre as plantas que sofrem danos imediatos após congelação há exemplos de gradação com a altitude: diferenciação de ecotipos. Há um reforço dos mecanismos que conduzem a um abaixamento do ponto de fusão e/ou aumentam o grau de sobrefusão (Larcher, 1982).

• **Evitação da congelação por dessecação**

É o método seguido por algumas estruturas dormentes (sementes, botões) nas plantas superiores. Consiste na acumulação de matéria seca e conseqüente diminuição da humidade. É responsável pela sobrevivência de muitas plantas anuais sensíveis.

• **Abaixamento do ponto de fusão em células normalmente hidratadas**

Consiste numa tensão osmótica acrescida devido à presença de solutos em grande (ou superior) concentração. Abaixo de -4°C a evitação completa da congelação, coligativamente, em plantas superiores, e provavelmente rara (Burke *et al.*, 1976; Levitt, 1978).

• **Sobrefusão**

Alguns autores interpretam erradamente o termo *sobrefusão* - como uma depressão do ponto de congelação abaixo de 0°C explicada, ou não, em parte, coligativamente. Sobrefusão deve ser interpretada como a manutenção do estado líquido abaixo do ponto de fusão da solução, que devido à tensão osmótica desta é inferior a 0°C .

A capacidade de sobrefusão das células das plantas depende da presença de núcleos de congelação, conteúdo das soluções celulares, grau de adaptação, e de particularidades histológicas e citológicas (forma e tamanho das células, barreiras hidrófobas) (Larcher, 1982; Rodrigo, 2000).

A sobrefusão pode ter carácter transitório, conferindo protecção de 3 a 8°C contra as geadas (abaixo do limiar superior de temperatura a que pode ter início a congelação em células vivas). A sobrefusão com carácter persistente (até durante todo o inverno) aparece em gomos florais, sementes, e células parenquimatosas do xilema de diversas plantas. A sobrefusão persistente pode verificar-se até temperaturas muito baixas (-47°C) – sobrefusão profunda – afectando, principalmente os órgãos/tecidos citados. Um abaixamento subsequente de temperatura é sempre letal, devido à congelação intracelular que, então, se verifica. Este “ponto de sobrefusão profunda” é, por isso, responsável pelos limites setentrionais de ocorrência e cultura de muitas plantas, incluindo algumas fruteiras caducifólias, e deve ser devidamente considerado na selecção e melhoramento com o objectivo de obter plantas mais geado-resistentes (Abreu, 1985).

O limite inferior do ponto de sobrefusão profunda é dado pelo *ponto de nucleação homogénea* (T_n). Este é calculado, para soluções típicas das plantas, pela expressão (Abreu, 1985):

$$T_b = -2\Delta T_m + 38,1^\circ C \quad (1)$$

sendo ΔT_m o abaixamento do ponto de fusão da solução em graus centígrados. T_b varia entre -41 e $-47^\circ C$, para a maioria das plantas.

A congelação numa planta em sobrefusão transmite-se rapidamente a partir do(s) ponto(s) onde aquela teve início, por inoculação (Asahina, 1978). O gelo sobre a planta ou no solo, bactérias e núcleos de congelação atmosféricos são excelentes nucleadores, dando a sua entrada na planta a partir de feridas, estomas e lenticulas. Contudo quando a temperatura atingida é muito baixa (da ordem dos $-35^\circ C$) o gelo progride lentamente podendo levar de semanas a anos para que a congelação da planta se complete – estamos numa situação em que a energia livre da água é muito baixa (Olien, 1967; Burke et al., 1976; Weiser, 1979). Abaixo do ponto de nucleação homogénea, a congelação é rápida, intracelular e letal – como se disse.

- **Tolerância da congelação extracelular**

Muitas são as plantas/tecidos que sobrevivem após congelação (extracelular). O grau de tolerância à congelação pode ser dado pela diferença entre a temperatura a que a congelação tem início e a temperatura a que os danos se iniciam (LT_i) (Larcher, 1982).

A tolerância à congelação de um tecido é incompatível, em geral, com o crescimento activo. Conhecem-se, contudo, casos excepcionais de plantas de altas montanhas que apresentam esta capacidade durante a estação de crescimento. Também, – ou será o caso anterior – em *Saxifraga oppositifolia* e *Silene acaulis*, colhidas em altas altitudes nos Alpes, observou-se tolerância em pequenas partes, provavelmente inactivas, dos rebentos, estando as partes restantes - activas - sujeitas a dano imediato por congelação. Deve, contudo, notar-se que uma tolerância acentuada só pode existir durante a dormência ou quando o crescimento é reduzido, perdendo-se durante o crescimento intenso. A tolerância tende a aumentar com a aclimação (Abreu, 1985).

- **Decréscimo da desidratação por congelação**

Este método consiste na menor formação de gelo extracelular em plantas resistentes. Resulta dos efeitos coligativos da acumulação de solutos no protoplasma. Esta acumulação é resultado de aclimação, mas as variações entre plantas são também importantes.

- **Tolerância da desidratação por congelação**

Existem plantas que suportam temperaturas até $-196^\circ C$, sem geladura. Nessas plantas a congelação extracelular inicia-se próximo de $-1^\circ C$ – a sobrefusão al-

cançada é ligeira – e prossegue até só restar a água fortemente ligada às moléculas que existem no protoplasma. Atendendo a que o ponto de sobrefusão profunda mais baixo constatado nos tecidos das plantas é de -47°C e a congelação nestas condições é sempre letal, - só existem plantas perenes, além da isotérmica de temperatura mínima média de -47°C , sobrevivendo deste modo.

Quando a aclimação aumenta, muitos tecidos/plantas aumentam a sua tolerância à desidratação causada pela congelação extracelular. Para que os danos provocados pela formação de gelo extracelularmente se iniciem é necessário, nestes tecidos, que o protoplasto perca mais água, formando-se mais gelo, do que em tecido homólogos de plantas sensíveis. Por exemplo, Li e Palta (1978) verificaram que embora não tivessem sido encontradas quaisquer relações entre a concentração do suco celular e a resistência à geadas de folhas de batateira, as folhas de espécies mais resistentes à geadas tinham a capacidade de tolerar mais água congelada. *Solanum acaule* pode tolerar a congelação de até 80% da água líquida, enquanto *Solanum tuberosum* tolerou somente até 60%.

Evitação da congelação intracelular

Uma acrescida permeabilidade das membranas plásmicas é, talvez, o mecanismo mais eficiente para evitar a congelação intracelular. Células mais permeáveis permitem a existência de congelação em equilíbrio extracelularmente evitando que o ponto de congelação do protoplasma se atinja. A aclimação, por sua vez, provoca modificações na estrutura e composição das membranas (Li e Palta, 1978; Weiser, 1979). É evidente que um aumento da tensão osmótica, também, contribui para que a congelação não se propague ao protoplasma.

5.3.2. Bactérias activas na nucleação do gelo

As plantas não sofrem geladura se não houver congelação dentro da planta, e a congelação necessita de ter núcleos de congelação para que se inicie. Ora, existem bactérias que funcionam como núcleos de congelação; são chamadas bactérias activas na nucleação do gelo (INA). O componente activo deste efeito nucleador é uma proteína presente na bactéria (Lindow, 1983). Outras bactérias não exercem esta função nucleadora e chamam-se bactérias não-activas na nucleação do gelo (NINA). Uma menor concentração de bactérias INA foi relacionada com menores danos nos órgãos reprodutivos de amendoeira e pereira (Lindow e Connell, 1984; Lindow et al., 1996). Noutras culturas, a concentração de bactérias INA parece não influenciar a geadoresistência, devido à presença de nucleadores sintetizados, provavelmente, pelas próprias plantas (Proebsting e Gross, 1988). Nalguns casos verificou-se que os sítios onde há nucleação podem variar (Wisniewski et al., 1997).

5.4. Variações da resistência das plantas à geada. Temperaturas críticas.

A geado-resistência aumenta com grau de dormência e diminui com a taxa de crescimento. O *endurecimento* ou *aclimação* ao frio consiste num aumento da evitação da congelação ou no desenvolvimento temporário de tolerância à congelação que é induzida por factores ambientais. Chama-se *desaclimação* à perda dessa geado-resistência.

Podem-se distinguir três categorias de tecidos, quanto ao modo como aclimatam (Abreu, 1985):

Tecidos sem capacidade de aclimação. São exemplos, as folhas de algumas espécies de batateira, várias herbáceas em C_4 , folhas da palmeira *Trachycarpus fortunei*, e tomateiros.

Tecidos em que a tolerância à congelação não é induzida, mas a evitação aumenta. A evitação aumenta coligativamente e/ou através de um aumento da sobrefusão. A aclimação conduz frequentemente à acumulação de açúcares, por hidrólise do amido, baixando o ponto de fusão da solução celular. Este tipo de evitação foi detectado em folhas de *Olea europaea*, couve e em citrinos. A sobrefusão, também, aumenta e mantém-se mais tempo, após aclimação, a baixas temperaturas, por exemplo, em citrinos (Yelenosky, 1978) e outras fruteiras (Olien, 1967; Weiser, 1979).

Tecidos em que a aclimação induz tolerância à congelação. A aclimação provoca uma diminuição da quantidade de gelo formada, baixando coligativamente o ponto de congelação dos tecidos, ou aumenta a tolerância à dessecação. Como a tolerância à congelação, de carácter temporário e está associada ao crescimento reduzido em plantas herbáceas perenes e à dormência em plantas lenhosas, a sobrevivência, por tolerância, pressupõe aclimação.

À temperatura, lida num termómetro convenientemente exposto, que os gomos, flores ou frutos aguentam por 30 minutos (ou menos) sem dano, chama-se temperatura crítica. Hoje, a designação abrange também a temperatura a que morrem uma percentagem determinada de gomos, flores ou frutos. Por exemplo, T_{10} é a temperatura que causa 10% de morte de gomos, flores ou frutos (Snyder e De Melo-Abreu, 2005).

5.4.1. Plantas anuais e bienais

As temperaturas críticas para hortícolas anuais e bienais, cereais, culturas forrageiras e para silagem estão tabeladas em Snyder e De Melo-Abreu (2005).

As temperaturas críticas tendem a ser muito mais baixas na fase de semente ou em que o crescimento está suspenso. Durante o crescimento activo, as temperaturas críticas tendem a aumentar desde a germinação até à floração/frutificação.

A geado-resistência diminui ao longo da série: centeio > trigo mole > triticalear > cevada > aveia ou trigo duro. Quando a aclimação é completa não ocorre destruição de plantas de centeio até aos -40 ou -45 °C, enquanto que as plantas

de trigo duro só não são danificadas acima de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Lecomte, 1989). Aquando da floração a maioria das plantas sofre danos abaixo de -1 a $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.4.2. Fruteiras de folha caduca e vinha

5.4.2.1. Aclimação e desaclimação

Nas fruteiras caducifólias, no outono, em resposta a estímulos ambientais (mormente foto e termoperiódicos), a taxa de crescimento reduz-se até anular-se, as folhas começam a cair, a actividade cambial reduz-se gradualmente, até que entram no estado de repouso. A cessação de actividade nas diferentes partes das plantas não é, porém, sincronizada: o crescimento terminal cessa em primeiro lugar em alguns ramos, e só depois nos mais vigorosos. A actividade cambial parece cessar primeiro na periferia da árvore e, por último, no tronco e ramos grossos.

Uma quantidade determinada de frio é necessária para que as árvores possam florir e crescer vigorosamente na primavera. As exigências em frio estão compreendidas entre as 650 e 1400 horas abaixo de 7°C , segundo as espécies e variedades. Se estas exigências não forem satisfeitas a floração é errática e prolongada, os gomos podem cair, e o crescimento é reduzido. Após o fim do repouso – quebrado pelo frio –, se o calor acumulado for insuficiente a dormência continua; caso contrário esta cessa e o crescimento activo inicia-se.

Durante o período de dormência a resistência das plantas mantém-se alta embora sofra bastantes flutuações. A temperatura que conduz à morte de 50% dos gomos (T_{50}) na cerejeira e pessegueiro situa-se normalmente entre -20° e -23°C , pouco depois da desfoliação outonal, não indo acima dos -15°C durante a dormência. Períodos prolongados de temperaturas baixas podem levar o T_{50} a valores bastante mais baixos (e.g., $T_{50}=-34^{\circ}\text{C}$ para cerejeiras e $T_{50}=-27^{\circ}\text{C}$ para pessegueiros já têm sido observados), contudo, um descongelamento dos gomos leva-os rapidamente a atingirem o mínimo de resistência, que, é característico do estado de dormência (Proebsting, 1978). Algo de semelhante se passa para a vinha, ameixeira, damasqueiro, pereira e macieira (Snyder e De Melo-Abreu, 2005). Atendendo a estes dados, facilmente chegamos à conclusão, que no Território Nacional as temperaturas, durante a dormência, não atingem valores tão baixos que causem danos nas principais fruteiras de folha caduca e na vinha.

Após o início do crescimento visível, a susceptibilidade à geada não cessa de aumentar (figura 5.7). O estado fenológico passa a ser o factor mais importante na determinação da temperatura a partir da qual o dano aparece.

Para o mesmo estado fenológico, a temperatura mínima e sua duração, o estado do tempo precedendo uma geada, a taxa de abaixamento da temperatura, e o vigor das árvores, são, também factores que influenciam a natureza e extensão dos danos; além de variações resultantes da variedade/clone.

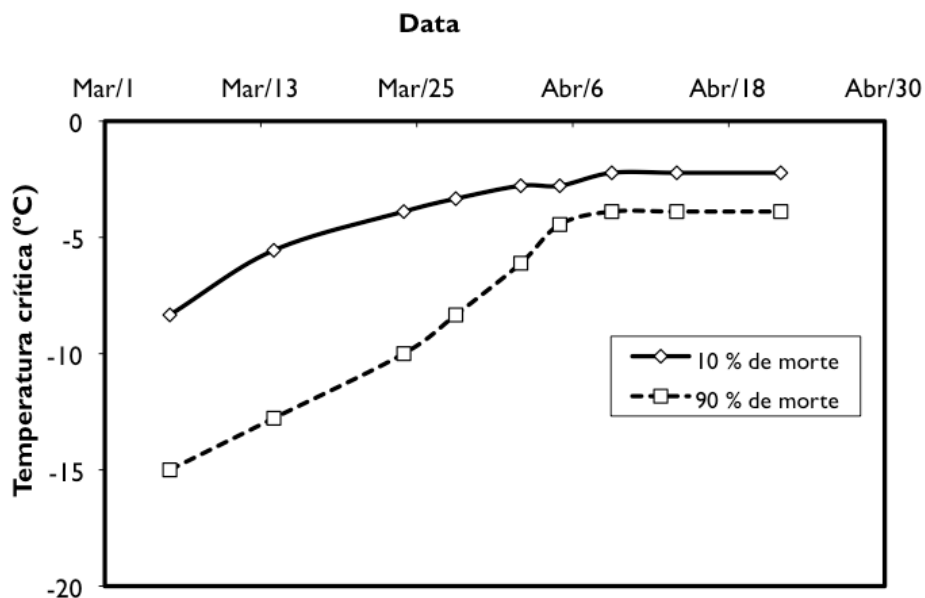


Figura 5.7. Valores típicos das temperaturas críticas que matam 10% e 90% dos gomos de cerejeira em relação às datas médias observadas na Universidade do Estado de Washington, Centro de Investigação e Extensão de Prosser (dados de Proebsting e Mills, 1978).

5.4.2.2. Temperaturas críticas

No início do intumescimento dos gomos alguns perdem resistência, enquanto outros continuam aclimatados, acontecendo que a diferença entre as temperaturas que causam a morte de 10% (T_{10}) e 90% (T_{90}) dos gomos pode chegar a 11°C. Modificações reversíveis da geado-resistência, causadas fundamentalmente pela temperatura do ar, são frequentes, ocasionando oscilações das temperaturas críticas. A separação das escamas dos gomos desprotege as flores, aumentando a susceptibilidade destas. O número de gomos resistentes diminui e $T_{10}-T_{50}$ passa para uns 5°C descendo para 1-2°C no fim desta fase de desenvolvimento. A aclimação ainda é possível, mas as temperaturas a que se faz também originam perda de gomos. A plena floração é um estado particularmente sensível: as flores encontram-se todas muito susceptíveis. Em alguns casos a aclimação ainda é possível, mas é ligeira. A variabilidade é pequena e resultante fundamentalmente da exposição.

No estado de fruto verde pequeno, os frutos estão igualmente sensíveis, exceptuando a variabilidade resultante da posição na árvore e exposição. A partir deste estado (inclusive) a aclimação é, praticamente, inexistente; e o desfaseamento entre a temperatura do ar e a dos frutos vai aumentando com o crescimento destes.

Informação pormenorizada sobre as temperaturas críticas da maioria das

fruteiras de folha caduca e da vinha encontra-se em Snyder e De Melo-Abreu (2005). Estas temperaturas permitem tomar decisões de gestão que passem pela protecção ou sacrifício de alguns gomos, flores ou frutos. Vale, por vezes, a pena tomar riscos no início do crescimento, quando a variabilidade é grande em relação à resistência. Por outro lado, há variedades que por terem uma floração excedente, podem perder, sem diminuição da colheita, algumas flores. Esta informação é também crucial para prever os prejuízos em determinada região, utilizando o programa DEST (ver secção 5.5.1.). Um programa de apoio à tomada de decisão sobre a viabilidade da protecção activa de qualquer cultura e de selecção do método mais adequado, chamado FrostEcon, encontra-se em Snyder *et al.* (2005).

5.4.3. Citrinos

As plantas do género citrus são de folha persistente, exceptuando-se as da espécie *Poncirus trifoliata* L. Raf. e seus híbridos que são caducifólias ou semi-caducifólias (Ketchie, 1969). A maioria dos citrinos não têm um período de dormência invernal estável e pronunciada, sendo, contudo, o crescimento reduzido. Este é, porém, o período em que as plantas evidenciam uma maior resistência às geadas. Os tecidos em crescimento activo não têm qualquer tolerância à congelação, sendo esta reduzida mesmo nos ramos e folhas sujeitas a um período de aclimação (Yelenosky, 1978).

A aclimação dos citrinos é importante para que a sua geado-resistência aumente. A luz e, fundamentalmente, o frio, são os estímulos responsáveis pelas transformações sofridas pelas plantas e que aumentam aquela resistência. A aclimação inicia-se para temperaturas de cerca de 13,0°C, continuando até temperaturas da ordem dos -3,3°C, segundo parece. É acompanhada por transformações fisiológicas ainda mal conhecidas. O resultado destas transformações consiste num abaixamento do ponto de fusão e num aumento da capacidade de se manterem em sobrefusão (Yelenosky, 1978).

A geado-resistência é, de um modo geral, maior nas mandarineiras (*Citrus reticulata* Blanco) e tangerineiras e menor nos limoeiros, tendo valores intermédios nas laranjeiras e toranjeiras (Yelenosky, 1978). Uma seriação de 200 variedades de citrus quanto à sua resistência às geadas inverniais foi feita por Ikeda (1982). Os frutos são os órgãos mais sensíveis às baixas temperaturas – mais os verdes do que os maduros – ocorrendo granulação nos frutos quando a temperatura do ar desce a valores mais baixos do que -3,5 a -4,5°C, provocando congelação dos frutos. As folhas sofrem danos quando a temperatura do ar desce abaixo de -6,0°C por várias horas, mesmo durante o inverno, sendo a morte generalizada abaixo dos -10,0°C. A morte das árvores pode ter lugar a partir dos -6,7°C, embora, caso o grau de aclimação seja bom, possamos esperar que sobrevivam a temperaturas inferiores (-10,0°C).

Em Portugal Continental os prejuízos são elevados. As geadas inverniais (fundamentalmente as temporãs) provocam geladura das folhas, e ramos não atempa-

dos, reflectindo-se os prejuízos, por vezes, nos anos seguintes. As árvores com frutos sofrem prejuízos acrescidos - devido à maior utilização dos produtos carbonados da fotossíntese -, e os frutos tornam-se amargos e impróprios para consumo. As geadas primaveris, talvez as mais danosas, apanham as árvores em crescimento (portanto mais sensíveis) e levam à destruição, principalmente, dos botões e frutos novos (Abreu, 1985). A nossa experiência leva a admitir que os prejuízos causados pelas geadas inverniais resultam, fundamentalmente, de uma selecção deficiente do local de implantação dos pomares e que a simples implementação de medidas preventivas – métodos passivos – poderá levar à eliminação desses prejuízos nas principais regiões citrícolas do País.

Convém considerar que a tolerância à congelação dos tecidos dos citrinos nunca deixa de ser nula, sendo o ponto de congelação dos diferentes órgãos, a temperatura letal. Por outro lado, é de admitir que, nas nossas condições, a sobre-fusão seja, geralmente, baixa, visto que as geadas que assolam o nosso território são de radiação e, normalmente, são geadas brancas. A presença de gelo à superfície dos órgãos faz com que a sobre-fusão seja ligeira.

Também, a curta duração das temperaturas negativas em Portugal – relacionada com o tipo de geada – é um factor que deve ser levado em linha de conta, visto que há defasamentos importantes entre as temperaturas dos tecidos e a do ar. Este facto permite esperar, que a sobrevivência aumente, especialmente para os órgãos de grande capacidade calorífica.

Temperaturas críticas para os citrinos estão tabeladas em Snyder e De Melo-Abreu (2005).

5.5. Modelos de simulação aplicados às geadas

Os processos biofísicos associados à problemática das geadas são por vezes muito complexos. Por isso, recorre-se frequentemente ao uso de modelos de complexidade variável. Alguns desses modelos funcionam como subrotinas de modelos de crescimento de plantas anuais que simulam as temperaturas críticas, temperaturas dos órgãos vegetais e eventuais prejuízos (Fowler *et al.*, 1999; Lecomte *et al.*, 2003).

5.5.1. O modelo DEST (Damage ESTimator)

Neste trabalho apresenta-se um modelo de previsão de prejuízos, que pode ser utilizado para qualquer cultura, mas resulta especialmente útil no caso de plantas perenes (DEST) (Snyder *et al.*, 2005).

Este modelo utiliza-se para calcular os danos por geladura, a produção e as estatísticas associadas dum cultura com ou sem protecção contra as geadas. Entra-se com até 50 anos de temperaturas máximas e mínimas, podendo definir-se até 11 métodos de protecção. As temperaturas críticas associadas a 90% (T_{90}) e 10% (T_{10}) de danos são entradas num quadro, atendendo ao estado fenológico.

Os danos são considerados multiplicativos. Por exemplo, uma geada que

causa 50% de danos seguida doutra geadada que causa 50% de danos resulta em 75% de danos (i.e. 50% no primeiro evento seguido de 50% de 50% = 25% no segundo evento). Parte-se da hipótese que os danos estão directamente relacionados com a temperatura atingida e não estão relacionados com a duração da temperatura mínima.

O programa está estruturado em 3 passos intermédios que terminam numa folha de resultados:

- a) Entra-se, na folha “Start here”, a informação básica sobre os métodos de protecção, cultura e práticas culturais, e opções do programa. Ao premir o botão “Complete Step 1 of 3” passa-se, automaticamente, para o passo seguinte (figura 5.8).
- b) Então, entra-se com as temperaturas máximas e mínimas na folha “Weather” e prime-se o botão “Complete Step 2 of 3” (figura 5.9).
- c) Finalmente, o 3º passo consiste na entrada das temperaturas críticas em correspondência com as datas dos estados fenológicos, que é feita na folha “Crop”. Ao premir o botão “Complete Step 3 of 3” passa-se para a folha de resultados (figura 5.10).
- d) A folha de resultados “Results” mostra as médias e os desvios-padrão dos prejuízos e das produções esperadas para a cultura desprotegida e protegida por até 11 métodos de luta contra a geada (figura 5.11).

DEEST is a VBA program that computes the freeze damage statistics expected for your location and crop.

After answering the following questions click the button "Complete Step 1 of 3" below:

a. Information about the weather data that you have.

a.1 Location: Field's Name: Latitude: degrees

a.2 Height of measurement: metres Temperature correction: degrees

a.3 How many years of weather data do you have? years

b. Information about freeze protection.

The following freeze protection methods will be evaluated:
 Passive: soil treatments (1), covers & wraps (2), barriers (3), mulch/management (4) other (5).
 Active: heaters (6), wind machines & helicopters (7), overhead sprinklers (8), under glass/sprinklers (9), windbreaks (10), other (11)

The table below gives the default protection levels in °C for each of the alternative methods used individually.
 The user may change the default protection levels based on unique local conditions and the particular application.
 Methods 8, 10 and 11 must be user defined if changed from zero.

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

c.

Crop name/cultivar?

Crop height? metres

Number of plants/m? trees

Type of plant?

Annual (1), Perennial (age less than 4 years (2); age between 4 and 10 years (3); more than 10 years (4))

Expected yield/ha without frost? t/ha **Short name expected yield**

Typical % of small fruit thinned (without frost)? %

d. Erase all previous inputs? Y/N

Figura 5.8. Exemplo de entradas para a folha “Start here”.

Conferências de homenagem ao Professor Doutor Dionísio Gonçalves

After entering your weather data, click the button "Complete Step 2 of 3"

Complete Step 2 of 3

Specify the **maximum temperature** in the first column and the **minimum temperature** in the second column corresponding to each year of weather data and input the year at the top of those columns. Be sure to enter data during the "relevant" period of the year for fruit events. For missing data, leave the cells blank. You may enter up to 50 years of data.

LY Date	NLY Date	DOY	Year											
			1	2	3	4	5	6						
			1960	1961	1962	1963	1964	1965						
01-Jan	01-Jan	1	8.0	-2.3	12.0	2.0	17.6	7.6	18.0	8.0	11.0	1.0	19.5	0.5
02-Jan	02-Jan	2	9.0	-1.1	8.0	-2.0	17.5	7.5	13.0	3.0	9.0	-1.0	13.9	3.9
03-Jan	03-Jan	3	9.0	-1.0	9.0	-1.0	17.2	7.2	10.0	0.0	9.0	-1.0	12.5	2.5
04-Jan	04-Jan	4	10.0	0.2	9.0	-1.0	17.5	7.5	5.2	-4.8	11.0	1.0	19.9	6.9
05-Jan	05-Jan	5	10.2	0.3	11.0	1.0	12.0	2.0	6.0	-4.0	11.0	1.0	9.3	-0.7
06-Jan	06-Jan	6	9.0	-1.0	8.0	-2.0	13.0	3.0	7.0	-2.5	10.0	0.0	9.0	-1.0
07-Jan	07-Jan	7	9.1	-1.7	7.0	-2.5	17.0	7.0	11.0	1.0	9.0	-1.0	11.5	1.5
08-Jan	08-Jan	8	10.4	0.4	19.0	9.0	19.0	6.0	9.0	-1.0	9.5	-0.5	15.9	5.9
09-Jan	09-Jan	9	13.0	3.0	10.0	9.0	13.5	3.5	8.3	-1.7	11.5	1.5	12.4	2.4
10-Jan	10-Jan	10	13.0	3.0	14.5	4.5	12.0	2.0	6.0	-4.0	13.8	3.8	19.5	9.5

Figura 5.9. Exemplo de entradas para a folha "Weather".

The program interpolates between T_{10} and T_{20} and between development dates
Input the development dates and corresponding T_{10} and T_{20} in the table below
To see the results, after filling the table, click "Complete Step 3 of 3"

Complete Step 3 of 3

Location: **Black's Farm**
Crop: **Golden Delicious' apple**

Development Stage Day of the year	stage 1	stage 2	stage 3	stage 4	stage 5	stage 6	stage 7	stage 8	stage 9	stage 10	stage 11	stage 12
	date (1)	date (2)	T_{10} (C)	T_{20} (C)	date (1)	date (2)	T_{10} (C)	T_{20} (C)	date (1)	date (2)	T_{10} (C)	T_{20} (C)
T_{10} (°C)	12.2	16.2	12.2	8.5	8.5	-1.1	-5.2	-2.0	3.2			
T_{20} (°C)	12.5	8.1	8.2	-4.5	-3.8	2.3	-3.5	-1.8				
Enter Date (e.g. 7-Apr)	15-Feb	20-Feb	24-Feb	05-Mar	14-Mar	17-Mar	24-Mar	30-Mar	30-Apr			

Figura 5.10. Exemplo de entradas para a folha "Crop".

Year	Results											
	Fruitage		Yield		Yield Loss		Yield Benefit		No. Fruits/Year		No. Bites/Year	
	Area	Vol	Area	Vol	Area	Vol	Area	Vol	Area	Vol	Area	Vol
1960	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1961	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1962	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1963	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1964	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1965	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1966	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1967	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1968	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1969	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1970	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1971	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1972	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1973	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1974	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1975	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1976	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1977	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1978	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1979	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12
1980	220	47.4	121	27.2	122	12	12	12	12	12	12	12

Figura 5.11. Exemplo de resultados dados pela folha "Results".

5.5.2. Validação do modelo DEST

A validação do modelo DEST foi efectuada com dados recolhidos durante uma experiência conduzida num pomar de macieiras, localizado em Carrazeda de Ansiães, com o objectivo de avaliar o desempenho da ventilação forçada na luta contra a geada (Ribeiro, 2003). Foram efectuadas simulações para os vários locais do pomar, em dois anos consecutivos, em que se registou a temperatura e simultaneamente se efectuaram amostragens de flores para determinar os danos sofridos em três variedades instaladas no pomar (De Melo-Abreu *et al.*, 2004).

Os resultados mostram um bom desempenho do modelo (figura 5.12). No Quadro 5.1 estão representados, para os dois anos simulados, os parâmetros estatísticos da regressão linear dos valores previstos *versus* observados das fracções de danos nas flores. A raiz do erro quadrático médio (RMSE) é de 0,1 e os valores do coeficiente de determinação (R^2) foram de 0,87 e 0,77 para 1999 e 2000, respectivamente.

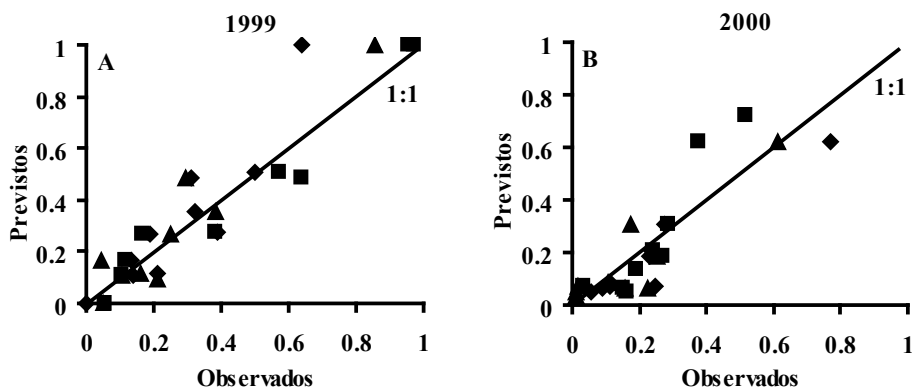


Figura 5.12. Valores previstos versus observados da fracção de danos nas flores de três variedades de macieiras (♦: ‘Hi Early.’; ■: ‘Jonagolden.’; ▲: ‘Erovan’).

Quadro 5.1. Estatísticas da regressão linear das fracções de danos de flores previstas versus observadas. N é o número de observações, \bar{P} e \bar{O} são os valores médios previstos e observados, S_p e S_o são os respectivos erros padrão, a e b são a abcissa na ordenada e o declive da recta, RMSE é a raiz do erro quadrático médio, e R^2 é o coeficiente de determinação.

Ano da simulação	N	\bar{P}	\bar{O}	S_p	S_o	a	b	RMSE	R^2
1999	29	0,35	0,33	0,31	0,28	-0,02	1,01	0,11	0,87
2000	29	0,20	0,22	0,21	0,18	0,00	1,07	0,10	0,77

Referências Bibliográficas

- Abreu, J. P., (1985). *As Geadas. Conceitos, Génese, Danos e Métodos de Protecção*. Instituto Superior de Agronomia. 219 pp.
- Asahina, E., (1978). Freezing processes and injury in plant cells. In: Li, P.H., Sakai (eds.). *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. Vol. I., pp. 17-36. Academic Press, NY.
- 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.
- Caplan, L.A., 1988. Effects of cold weather on horticultural plants in Indiana. Purdue University Cooperative Extension Publication, No. HO-203.
- De Melo-Abreu, J.P.M; Ribeiro, A.C.; Snyder, R. L (2004). Modelling apple flower and fruit damage to frost. In: Jacobsen, S.; Jensen, C. R., Porter, J.R. (eds.) *Proceedings of the VIII Congress of European Society for Agronomy: European Agriculture in a Global Context, July 2004, Copenhagen – Denmark*. pp. 75-76.
- Fowler, D.B.; Limin, A.E.; Ritchie, J.T. (1999). Low-temperature tolerance in cereals: Model and genetic interpretation. *Crop Sci.*, 39: 626-633.
- Ikeda, I., 1982. Freeze injury and protection of citrus in Japan. In: Li, P.H., Sakai, A. (eds). *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. Vol. II, pp. 575-589. Academic Press Inc.
- Ketchie, D.O., (1969). Methods of determining cold hardiness and cold injury in citrus. *Proc. First Int.Citrus Symp.*, Vol. 2, pp. 559-563.
- Larcher, W., (1982). Typology of freezing phenomena among vascular plants and evolutionary trends in frost acclimation. In: Li, P.H. and Sakai, A. (eds). *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. Vol.II. pp. 417-426. Acad. Press.
- 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.
- Lecomte, C.; Giraud, A.; Aubert, V. (2003). Testing a predicting model for frost resistance of winter wheat under natural conditions. *Agronomie*, 23: 51-66.
- Levitt, J. (1978). An overview of freezing injury and survival, and its interrelationships to other stresses. In: Li, P.H., Sakai, A. (ed.) *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. Vol. I. pp. 3-15. Academic Press.
- Li, P.H.; Palta, J.P. (1978). Frost hardening and freezing stress in tuber-bearing solanum species. In: P.H. Li and A. Sakai (eds). *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. Vol. I, pp. 49-71. Academic Press, NY.
- Lindow, S.E. (1983). The role of bacterial ice nucleation in frost injury to plants. *Ann. Rev. Phytopathol.*, 21: pp. 363-384.
- Lindow, S.E.; Connell, J.H. (1984). Reduction of frost injury to almond by control of ice nucleation active bacteria. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 109: pp. 48-53.
- Lindow, S.E.; McGourty, G.; Elkins, R. (1996). Interactions of antibiotics with

- Pseudomonas fluorescens* strain A506 in the control of fire blight and frost injury to pear. *Phytopathology*, 86: 841-848.
- Modlibowska, I., (1975). Effects of frost on crop yield and quality. In: Pereira, H.C. (ed.) *Climate and the Orchard*. Commw. Bur. Hortic. Plant Crops, Res. Rev. 5, pp. 73-81.
- Morris, L.L. (1982). Chilling injury of horticultural crops: an overview. *Hortscience*, 17(2): 161-162.
- Olien, C.R. (1967). Freezing stresses and survival. *Annual Review of Plant Physiology*, 18: 387-408.
- 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.
- Proebsting, E.L. (1978). Adapting cold hardiness concepts to deciduous fruit culture. In: P.H. Li and A. Sakai (eds). *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress..* Vol. I, pp. 267-279. Academic Press Inc, NY.
- Proebsting, E.L.; Gross, D.C. (1988). Field evaluations of frost injury to deciduous fruit trees as influenced by ice nucleating-active *Pseudomonas syringae*. *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 113: 498-506.
- Ribeiro, A.C. (2003). Estudo do microclima de um pomar de macieiras em Trás-os-Montes, em condições de geadas. Avaliação da ventilação forçada como método de luta contra as geadas. Tese de Doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia. 160 pp.
- Rodrigo, J. (2000). Spring frost in deciduous fruit trees-morphological damage and flower hardiness. *Scientia Horticulturae*, 85(3): 155-173.
- Snyder, R. L.; De Melo-Abreu, J. P. (2005). *Frost Protection: Fundamentals, Practice and Economics*. Vol. I. United Nations, Food and Agriculture Organization, Rome, 223 pp.
- Snyder, R. L.; De Melo-Abreu, J. P.; Matulich, S. (2005). *Frost Protection: Fundamentals, Practice and Economics*. Vol. II. United Nations, Food and Agriculture Organization, Rome, 64 pp.
- Weiser, C.J. (1979). Plant freezing injury and resistance. In: Barfield, B.J., Gerber, J.F. (eds.) *Modification of the Aerial Environment of Crops*. St. Joseph.
- Weiser, C.J. (1982). Cold hardiness and stress research: an evolving agricultural science. In: Li, P.H., Sakai, A. (ed.) *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. Vol. II, pp. 313-332. Academic Press.
- Wisniewski, M.; Lindow, S.E.; Ashworth, E.N.; (1997). Observations of ice nucleation and propagation in plants using infrared video thermography. *Plant Physiol.*, 113: 327-334.
- Yelenosky, G. (1978). Freeze survival of citrus trees in Florida. In: Li, P.H., Sakai, A. (eds.) *Plant Cold Hardiness and Freezing Stress*. Vol. I, pp. 297-311. Academic Press. Inc. NY.