

**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**  
**DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Temperatura do solo (e análise de Fourier),  
humidade do solo e desenvolvimento inicial de  
várias culturas em solos Pmg e Cb**

**José Alexandre Varanda Andrade**

**ÉVORA, 2001**

**UNIVERSIDADE DE ÉVORA**  
**DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Temperatura do solo (e análise de Fourier), humidade  
do solo e desenvolvimento inicial de várias culturas em  
solos Pmg e Cb**

120802

**José Alexandre Varanda Andrade**

**Dissertação apresentada à Universidade de Évora  
para a obtenção do grau de Doutor em Ciências  
Agrárias, na especialidade de Agrometeorologia**

120802

ÉVORA, 2001

(..)

**Por isso estoicamente, mansamente,  
resististe a todas as torturas,  
a todas as angústias, a todos os contratempos,  
enquanto eles, do alto inacessível das suas alturas,  
foram caindo,  
caindo,  
caindo,  
caindo sempre,  
e sempre,  
ininterruptamente,  
na razão directa dos quadrados dos tempos**

**“Poema para Galileo” de António Gedeão**

**À memória do Mestre**

**Prof. Doutor José Pinto Peixoto**



**Aos meus pais,  
à Guida,  
ao Alexandre  
e ao meu irmão**

## AGRADECIMENTOS

Qualquer trabalho científico assenta em múltiplas contribuições, sejam científicas, logísticas ou monetárias. Contudo, as contribuições dos que acompanharam sempre o percurso das emoções, sempre geometricamente variáveis, não foram menos importantes. Vamos por partes:

- ao Prof. Francisco Gonçalves Abreu, orientador desta tese, pelo acompanhamento real em todas as etapas do trabalho, pelas sugestões e pelas críticas, pelo apoio e pelo incentivo sempre constantes;

- ao Prof. Mário de Carvalho, pelo apoio efectivo que permitiu rapidamente vencer diversas etapas, nomeadamente ao longo de todo o trabalho experimental ;

- aos Professores António St-Aubyn e Jorge Cadima pela ajuda prestada ao longo da matemática usada na tese:

- aos Professores Carlos Alexandre e Nuno Cortez pelas sugestões e críticas durante a fase de escrita desta tese;

- ao Eng. André Ferrão, à aluna Sara Mateus, ao Eng. Diodoro, ao Sr. Agostinho, ao Eng. Brás e à Eng. Margarida Simões, à Eng. Téc. Helena Mafalda, à Arq. Paisagista Isabel Ramos, ao Prof. José Graça e às funcionárias Sandra e Celeste pelas colaborações prestadas, nomeadamente durante à execução experimental;

- à Guida pelo incentivo e pela paciência que ao longo destes anos terá descoberto ser portadora e que lhe permitiu aturar-me; ao meu filho pela força tremenda que, sem saber, me deu. Depois ao Carlos, ao José Graça, ao Nuno e ao Tó porque estiveram sempre lá, ao longo do caminho.

- à Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica (JNICT) e ao Programa Praxis XXI, projecto CICLUS, o suporte financeiro do projectos onde este trabalho se inclui.



## RESUMO

O sucesso do estabelecimento das culturas é em grande medida controlado pela temperatura e humidade do solo. A variação diária e anual da temperatura do solo é periódica, associada principalmente às variações da irradiância solar.

Pretende-se estudar (a) o efeito combinado da água e da temperatura no estabelecimento de culturas representativas das condições agrometeorológicas dominantes em Portugal (ervilha, fava, tremocilha, grão, girassol, milho e sorgo) e (b) o comportamento térmico de dois solos (um solo Mediterrâneo Pardo Normal – Pmg, e um solo Barro Castanho-Avermelhado Não Calcário – Cb). O comportamento germinativo foi estudado a temperaturas constantes, numa placa de gradiente térmico; a emergência e a produção de folhas foram estudadas nos solos Pmg e Cb. A temperatura do solo foi medida a sete profundidades (entre a superfície e 32 cm) por termopares tipo-T; enquanto a humidade do solo foi avaliada pelo método gravimétrico. Na análise das diferentes fases que constituem o estabelecimento das culturas foi utilizado o conceito de tempo térmico (Monteith, 1977). As variações térmicas diária e anual a várias profundidades, foram simuladas através do desenvolvimento de séries de Fourier (Análise Harmónica).

Cada fase de desenvolvimento incluída no estabelecimento das culturas (germinação, emergência e produção de folhas) pode ser analisada com base no conceito de um tempo térmico constante, se as condições hídricas do solo forem favoráveis. A emergência e a produção de folhas são afectadas por teores extremos de humidade, sobretudo se forem inferiores a cerca de 50% da Capacidade Utilizável do solo. O tipo de solo influencia mais a emergência das culturas que as fases subsequentes do estabelecimento (início da produção e expansão foliares e filocrão) e afecta a forma como o tempo térmico de emergência varia em função do teor de água no solo.

Numa camada superficial mais ou menos extensa do solo, a variação térmica diária a uma dada profundidade é simulada satisfatoriamente pela sobreposição de duas harmónicas, enquanto a solução sinusoidal simples é suficiente para simular a variação térmica anual em regiões de clima com características mediterrâneas. O amortecimento da onda térmica nos solos Pmg e Cb, diária ou anual, pode ser quantificada através da profundidade de amortecimento pois as amplitude térmicas anuais e diárias decresceram exponencialmente em profundidade. A profundidade de amortecimento varia com o teor

médio de água no solo e com a distribuição de humidade ao longo do perfil.

Discute-se o sucesso do estabelecimento das culturas em função da variação dos parâmetros que definem a germinação e a emergência (dimensão, velocidade e dispersão), a influência da heterogeneidade do perfil do solo no amortecimento da onda térmica e a aplicabilidade da teoria de condução de calor em meios semi-infinitos homogêneos a solos reais. Discute-se ainda a possibilidade de estimar a duração cronológica da germinação ou da emergência a partir da simulação da temperatura do solo e do conhecimento do comportamento térmico das culturas

**Palavras-chave:** tempo térmico, germinação, emergência, produção de folhas, área foliar, estabelecimento, séries de Fourier, temperatura do solo, profundidade de amortecimento, simulação

## ABSTRACT

The success of the crop establishment is strongly influenced by soil temperature and soil moisture. The daily and annual periodic variations of soil temperature follow closely the time-course of solar irradiance.

The main purposes of this work is to study (a) the influence of soil temperature and soil moisture on the establishment of seven representatives species (pea, broad bean, corn, sorghum, sunflower, chickpea and lupine) of Mediterranean agriculture and (b) the thermal behaviour of two soils (a Luvisol and a Vertisol). Germination was studied at constant temperatures on a thermogradient plate while emergence and leaf appearance were studied on those two soils. Soil temperature was measured with copper-constantan (Type – T) thermocouples at seven depths (until 32 cm depth) and soil moisture was measured by the gravimetric method. It was used the thermal time concept on the study of germination, emergence and leaf appearance and the analysis of daily and annual temperature cycles was performed by means of Fourier series.

The concept of a constant thermal time can be used to analyse each development stage of the establishment, if soil moisture conditions are favourable. Seedling establishment is markedly affected by extremes soil water contents, mainly at lower soil water contents. The influence of the type of soil seems to be more evident on the emergence than on leaf production and leaf growth. Furthermore, the variation of thermal times of emergence with soil water content in the Luvisol was also different from that in the Vertisol.

The daily temperature variation at any depth was accurately represented by the amplitude equation for the first two harmonics, while the annual variation of soil temperature in Mediterranean climate was well represented by the first harmonic alone. The “damping depth” can quantify daily or annual thermal wave damping because thermal amplitudes decrease exponentially with depth. Damping depth depends on soil water content and soil moisture profile.

The discussion of the success of the establishment was based on variation of germination and emergence parameters (size, rate and spread). Soil heterogeneity effects on thermal wave damping, the applicability of the theory of heat conduction in a semi-infinite homogeneous medium for non-uniform soils and the possibility of estimating chronological duration of emergence, by taking into account soil temperature

simulation and thermal behaviour of cultures were also discussed.

**Key words:** Thermal time, germination, emergence, leaf appearance, leaf area, establishment, Fourier series, soil temperature, damping depth, simulation

## INDÍCE

<b>Agradecimentos</b>	<b>i</b>
<b>Resumo</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Índice</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Quadros</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de símbolos</b>	<b>xxiii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Clima, desenvolvimento e produção vegetais</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Estabelecimento das culturas</b>	<b>2</b>
1.2.1. Sucesso do estabelecimento	2
1.2.2. Germinação e emergência	3
1.2.2. Factores que afectam o estabelecimento	4
<b>1.3. Tempo térmico e desenvolvimento vegetal</b>	<b>6</b>
<b>1.4. Temperatura e humidade do solo</b>	<b>8</b>
1.4.1. O sistema – solo	8
1.4.2. Balanço energético e temperatura	9
1.4.3. Balanço hídrico e humidade de solo	15
<b>1.5. Objectivos gerais do trabalho</b>	<b>17</b>
<b>2. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Caracterização dos locais experimentais</b>	<b>21</b>
2.1.1. Localização geográfica	21
2.1.2. Caracterização climática	21
2.1.3. Solos	26
<b>2.2. Medições físicas durante o período experimental (experiências de campo)</b>	<b>30</b>



2.2.1. Temperatura do solo	32
2.2.2. Humidade do solo	32
2.2.3. Medições meteorológicas	34
<b>2.3. Medições biológicas</b>	<b>34</b>
2.3.1. Culturas	35
2.3.1.1. As espécies estudadas	35
2.3.1.2. As sementes utilizadas	35
2.3.2. Experiências sobre germinação	36
2.3.2.1. Equipamento utilizado	36
2.3.2.2. Procedimento experimental	40
2.3.3. Experiências sobre emergência	49
2.3.3.1. Introdução	49
2.3.3.2. Sementeiras e contagens	49
2.3.3.3. Dotação de rega	53
2.3.3.4. Medição da temperatura e da humidade do solo.	55
2.3.4. Estabelecimento	57
2.3.4.1. Número de folhas e área foliar	58
2.3.4.2. Medição da temperatura e da humidade do solo	60
<b>2.4. Análise dos resultados</b>	<b>60</b>
2.4.1. Germinação e emergência	62
2.4.2. N° de folhas e área foliar	66
2.4.3. Comportamento térmico dos solos	68
2.4.3.1. Organização dos dados	68
2.4.3.2. Metodologia (Teoria)	73
<b>3. ESTABELECIMENTO: RESULTADOS</b>	<b>79</b>
<b>3.1. Germinação</b>	<b>79</b>
3.1.1. Germinação acumulada	79
3.1.2. Taxas de germinação, temperaturas cardinais e tempos térmicos	82
3.1.2.1. Taxa de germinação vs. temperatura.	82

3.1.2.2. Temperaturas cardinais	85
3.1.2.3. Tempos térmicos	89
3.1.3. Dispersão da germinação	90
3.1.4. Germinação final e temperatura	94
<b>3.2. Parâmetros ambientais durante o estabelecimento no campo</b>	<b>96</b>
3.2.1. Temperatura do ar	96
3.2.2. Precipitação e Evapotranspiração	98
3.2.3. Água no solo	100
<b>3.3. Emergência</b>	<b>106</b>
3.3.1. Emergência acumulada	107
3.3.2. Taxas de emergência, temperaturas cardinais e tempos térmicos	107
3.3.2.1. Variação da taxa de emergência em função da temperatura e da humidade do solo	107
3.3.2.2. Taxa de emergência vs. temperatura para condições térmicas e hídricas “não limitantes”	116
3.3.2.3. Temperaturas cardinais	120
3.3.2.4. Influência das temperaturas elevadas nas taxas de emergência	122
3.3.2.5. Tempos térmicos	123
3.3.3. Dispersão da emergência	131
3.3.4. Emergência final	137
<b>3.4. Folhas e área foliar durante o estabelecimento</b>	<b>142</b>
3.4.1. Evolução temporal do número de folhas	143
3.4.2. Número de folhas e temperatura	146
3.4.3. Crescimento foliar	159
<b>4. TEMPERATURA DO SOLO: RESULTADOS</b>	<b>169</b>
<b>4.1. Temperaturas médias diária e anual</b>	<b>169</b>

<b>4.2. Variação da temperatura nos ciclos diários e harmônicas de Fourier</b>	<b>173</b>
4.2.1. Oscilação térmica diária a cada profundidade	173
4.2.2. Períodos de aquecimento	185
4.2.3. Amortecimento da onda térmica em profundidade	191
4.2.3.1. Atraso ou desfasamento de onda na ocorrência dos extremos térmicos ao longo do perfil	191
4.2.3.2. Amplitudes térmicas	192
4.2.4. Profundidade de amortecimento no ciclo diário	196
4.2.4.1. Profundidade de amortecimento a partir das amplitudes térmicas medidas	196
4.2.4.2. Influência da insolação astronómica e da nebulosidade na profundidade de amortecimento	200
4.2.4.3. Influência do teor de humidade nos solos Pmg e Cb na profundidade de amortecimento	200
4.2.4.4. Profundidade de amortecimento e análise harmónica	213
4.2.4.4.1. Profundidades de amortecimento simuladas	213
4.2.4.4.2 Uniformidade dos perfis	215
4.2.4.4.3 Comparação das profundidades de amortecimento simuladas e medidas	220
<b>4.3. Variação da temperatura nos ciclos anuais</b>	<b>225</b>
4.3.1. Oscilação térmica anual	225
4.3.2. Períodos de aquecimento	230
4.3.3. Amortecimento da onda térmica em profundidade	232
4.3.3.1. Atraso ou desfasamento de onda na ocorrência dos extremos térmicos ao longo do perfil	232
4.3.3.2. Amplitudes térmicas	232
4.3.4. Profundidade de amortecimento no ciclo anual	234
4.3.4.1. Profundidade de amortecimento a partir das amplitudes térmicas medidas	234
4.3.4.2. Profundidade de amortecimento a partir da análise harmónica	236

<b>5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES</b>	<b>239</b>
<b>5.1 . Estabelecimento das culturas</b>	<b>239</b>
5.1.1. Influência da temperatura no estabelecimento das culturas	239
5.1.1.1. Dimensão da germinação e da emergência	239
5.1.1.2. Temperaturas cardinais	240
5.1.1.3. Tempo térmico	243
5.1.2. Influência da humidade do solo no estabelecimento	247
5.1.3. Influência do tipo de solo no estabelecimento	250
5.1.4. Culturas	252
5.1.5. O sucesso do estabelecimento	255
<b>5.2. Comportamento térmico dos solos</b>	<b>259</b>
5.2.1. Simulação harmónica da temperatura com séries de Fourier	259
5.2.1.1. Ciclo diário	259
5.2.1.2. Ciclo anual	261
5.2.2. Influência do tipo de solo e do teor de humidade	263
5.2.2.1. Profundidade de amortecimento e difusividade térmica	263
5.2.2.2. Heterogeneidade térmica dos solos Pmg e Cb	268
<b>5.3. Aplicações da simulação de perfis de temperatura do solo à emergência das culturas</b>	<b>270</b>
<b>5.4. Conclusões</b>	<b>275</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>279</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>301</b>
<b>ANEXO A</b>	<b>301</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>305</b>
<b>ANEXO C</b>	<b>306</b>
<b>ANEXO D</b>	<b>308</b>
<b>ANEXO E</b>	<b>309</b>
<b>ANEXO F</b>	<b>311</b>
<b>ANEXO G</b>	<b>312</b>
<b>ANEXO H</b>	<b>317</b>

<b>ANEXO I</b>	<b>331</b>
<b>ANEXO J</b>	<b>332</b>
<b>ANEXO K</b>	<b>338</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Número	Pág	
1.1	Variação hipotética da taxa de desenvolvimento de um dado processo vegetativo ( $R_i$ ) em função da temperatura e respectivas temperaturas cardinais.....	8
1.2	Termos do balanço energético da camada superficial de solo ( $\Delta z$ ) durante o dia.....	10
1.3	Balanço hídrico de uma camada superficial de solo ( $\Delta z$ ) durante o dia.....	16
2.1	Localização das experiências: Local A (Monte dos Álamos, Concelho de Évora); Local B (Tapada da Ajuda, Concelho de Lisboa).....	22
2.2	Valores médios mensais das temperaturas máxima, mínima e média do ar no período 1951-1980 em Évora/Mitra e em Lisboa/Tapada da Ajuda.....	23
2.3	Número médio mensal de dias em que foram registadas temperaturas do ar inferiores a $0^{\circ}\text{C}$ ou superiores a $25^{\circ}\text{C}$ em Évora/Mitra ou em Lisboa/Tapada da Ajuda.....	23
2.4	Precipitação média mensal (Normais Climatológicas 1951-1981) e evapotranspiração potencial média mensal (método de Penman) em Évora/Mitra e Lisboa/Tapada da Ajuda.....	25
2.5	Défices de Saturação do ar (em Pa) médios mensais, estimados para o período 1951-1980.....	25
2.6	Medição da temperatura do solo.....	33
2.7	Superfície inferior da placa de gradiente térmico: dimensões, sistemas de aquecimento e arrefecimento.....	38
2.8	Unidade de refrigeração: banho termostático de precisão Barrington W38-ZD e refrigerador helicoidal CK2 ( <i>Grant Instruments</i> ).....	39
2.9	Placa de gradiente térmico, sem cobertura, com as unidades de germinação (discos de Petri).....	41
2.10	Diagrama do sistema de medição e controle da temperatura sobre a placa de gradiente térmico.....	42
2.11	Variação da temperatura ao longo da placa de gradiente térmico para 5 intervalos térmicos ( $0^{\circ}\text{C}$ - $50^{\circ}\text{C}$ ; $15^{\circ}\text{C}$ - $40^{\circ}\text{C}$ ; $0^{\circ}\text{C}$ - $45^{\circ}\text{C}$ ; $5^{\circ}\text{C}$ - $50^{\circ}\text{C}$ ; $15^{\circ}\text{C}$ - $45^{\circ}\text{C}$ ): equações de regressão linear e respectivos coeficientes de determinação.....	48

2.12	Esquema das áreas de sementeira em Évora e em Lisboa.....	52
2.13	Tabuleiros de alumínio construídos para as experiências sobre a emergência em Évora, no período seco.....	54
2.14	Relação entre a área de uma folha e os respectivos comprimento e largura, para as cinco espécies indicadas.....	61
2.15	Sobreposição de 4 harmónicas com diferentes frequências e amplitudes.....	74
3.1	Curvas de germinação acumulada em função do tempo cronológico, a várias temperaturas, para as espécies indicadas.....	80-81
3.2	Taxas de germinação para as fracções 0,2G <sub>f</sub> , 0,5G <sub>f</sub> e 0,8G <sub>f</sub> , em função da temperatura média na placa de gradiente térmico, para as espécies indicadas.....	83-84
3.3	Relação entre a germinação acumulada (expressa como fracção da germinação final) e o tempo térmico para quatro culturas, no intervalo térmico sub-ótimo.....	91
3.4	Germinação final da ervilha, da tremocilha, do grão, da fava, do girassol do milho e do sorgo, em função da temperatura.....	95
3.5	Temperaturas médias, máximas e mínimas do ar em Évora/Monte dos Álamos (Novembro de 1994 a Outubro de 1996) e Lisboa/Tapada da Ajuda (Novembro de 1993 a Novembro de 1996).....	97
3.6	Nº de dias em que a temperatura máxima (T <sub>máx</sub> ) foi superior a 25°C e a temperatura mínima (T <sub>mín</sub> ) foi inferior a 0°C durante o período experimental e no ano médio em Évora e Lisboa.....	99
3.7	Precipitação e Evapotranspiração Potencial mensais durante o período experimental em Évora/Monte dos Álamos e Lisboa/Tapada da Ajuda...	101
3.8	Número de dias em que a Precipitação foi superior a 10 mm durante o período experimental, no Ano Médio, Évora/Monte dos Álamos e Lisboa/Tapada da Ajuda.....	102
3.9	Teor médio de água no solo Pmg (Évora) entre 0-5 cm, 0-10 cm, 0-20 cm e 20-25 cm de profundidade, ao longo dos anos indicados.....	104
3.10	Teor médio de água no solo Cb (Lisboa) entre 0-5 cm, 0-10 cm, 0-15 cm e 20-25 cm de profundidade, ao longo dos anos indicados.....	105
3.11	Curvas de emergência acumulada ao longo do tempo a várias temperaturas, para as espécies indicadas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).....	108-109

3.12	Varição da taxa de emergência com a temperatura nas espécies indicadas, para 50% do total de plântulas emergidas (E0,5) nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).....	110-111
3.13	Varição da emergência com a temperatura para 50% e 80% das plântulas emergidas das culturas indicadas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).....	117-118
3.14	Diferenças entre as taxas de emergência medidas e as estimadas em função da duração da exposição das plântulas pré-emergentes a temperaturas médias horárias superiores à $T(G)_{opt}$ para $0,5E_f$ das culturas indicadas, nos solos Pmg e Cb.....	124-125
3.15	Efeito do teor de água do solo durante o período de germinação no tempo térmico para a emergência das diversas culturas indicadas nos solos Pmg e Cb.....	128-129
3.16	Relação entre a emergência acumulada (E) e o tempo térmico para as 7 culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa) no Intervalo Térmico A.....	132-133
3.17	Emergência final das sete culturas indicadas, nos solos Pmg e Cb, em função da temperatura do solo à profundidade de sementeira, para teores médios de humidade do solo inferiores a 50% da Capacidade Utilizável, superiores à Capacidade de Campo e entre 50% da C.U. e a C.C. durante toda a emergência.....	138-139
3.18	Evolução temporal do número de folhas na fase de estabelecimento de três culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).....	144-145
3.19	Taxas de produção de folhas na fase de estabelecimento de cinco culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).....	147-149
3.20	Número de folhas produzidas em função da temperatura acumulada, para cinco culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).....	156
3.21	Evolução temporal da área foliar por planta na fase de estabelecimento de cinco culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa), para diferentes temperaturas médias a partir da sementeira.....	160-162
3.22	Evolução da área foliar por planta, de cinco culturas em função da temperatura acumulada (em °Cd) nos solos Pmg e Cb em condições de humidade do solo não limitante (Húmido) e em condições de baixos teores de humidade do solo seco (Seco).....	166-167
4.1	Varição da temperatura média horária no solo às profundidades indicadas para o dia-tipo Médio-Humidade média: valores medidos e valores estimados pela análise harmónica.....	174-175



4.2	Variação da temperatura média horária no solo às profundidades indicadas para o dia-tipo P: valores medidos e valores estimados pela análise harmónica.....	176-177
4.3	Perfis térmicos às horas indicadas nos solos Pmg e Cb em (a) 5 dias-tipo definidos em função da insolação astronómica e do nível de humidade do solo e em (b) 3 dias-tipo definidas em função do nível de nebulosidade.....	193-194
4.4	Profundidade de amortecimento em função do teor médio de água nos solos Pmg e Cb.....	205
4.5	Profundidade de amortecimento em função do teor médio de água do solo Pmg em perfis U, H e S.....	208
4.6	Profundidade de amortecimento em função do teor médio de água do solo Cb em perfis U, H e S.....	209
4.7	Diferenças entre as profundidades de amortecimento dos perfis térmicos PT1, PT2 e PT3 em função do teor médio de água nos solos Pmg e Cb, em fase de secagem, humedecimento e uniforme.....	212
4.8	Relações entre as profundidades de amortecimento obtidas a partir das amplitudes térmicas medidas nos perfis indicados, e as profundidades de amortecimento estimadas a partir da análise harmónica (métodos 1, 2 e 3).....	222-223
4.9	Variação da temperatura média ao longo do ano no solo Pmg (Évora), 1995 (a) solo Cb (Lisboa), 1994 (b) e 1995 (c) às profundidades indicadas.....	226-228
4.10	Perfis térmicos medidos em 1994 (solo Cb), 1995 (solo Cb) e 1995 (solo Pmg).....	233
5.1	Variação dos parâmetros que definem a germinação e a emergência no intervalo de tolerância térmica (modelo geral, a partir dos resultados obtidos).....	257
5.2	Temperatura acumulada, durante um ciclo diário, no intervalo sub-óptimo de germinação de uma cultura e no intervalo supra-óptimo de germinação respectivos intervalos de tempo.....	273

## ÍNDICE DE QUADROS

Número	Pág
2.1 Características dos solos nos locais A (Évora/Mitra) e B (Lisboa/ Tapada da Ajuda): textura (classe) e macroestrutura de campo (forma e tipo, classe, grau).....	27
2.2 Teores de humidade no solo correspondentes às sucções de 15 atmosferas e 1/3 atmosferas para cada horizonte dos solos nos locais A (Évora/Mitra) e B (Lisboa/Tapada da Ajuda).....	28
2.3 Textura, massa volúmica aparente e teor em matéria orgânica para cada horizonte dos solos nos locais A (Évora/Mitra) e B (Lisboa/Tapada da Ajuda).....	29
2.4 Elementos medidos e configuração dos registos para os elementos medidos em (a) Évora e (b) Lisboa/Tapada.....	31
2.5 Características das sementes.....	36
2.6 Características e cronologia das experiências de germinação na placa de gradiente térmico: nº de experiências realizadas para cada cultura, gama térmica imposta ao longo da placa térmica, nº de faixas transversais utilizadas (temperaturas), duração máxima de cada ensaio (em horas) e data de início de cada ensaio.....	44
2.7 Comportamento térmico da placa de gradiente. Temperaturas médias e respectivo desvio-padrão, valores máximos e mínimos da temperatura média horária e desvios-padrão horários (médio, máximo e mínimo) ao longo das 12 faixas transversais e extremos térmicos da placa de gradiente, durante 48 horas em cada intervalo térmico indicado.....	46-47
2.8 Desvios-padrão (°C) da temperatura medida em três pontos (A, B e C) numa faixa transversal da placa de gradiente térmico.....	49
2.9 Cronologia das experiências para o estudo da emergência e da evolução da área foliar da ervilha, da tremocilha, do grão, da fava, do girassol, do milho e do sorgo nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).....	50-51
2.10 Elementos referentes às sementeiras realizadas.....	53
2.11 Dotação de rega: cronologia, quantidades aplicadas e experiências afectadas.....	56
2.12 Parâmetros das regressões lineares entre a área e o comprimento e largura da folha ou folíolo, para as espécies indicadas, utilizando os dois tipos de modelos lineares.....	59

2.13	Conjuntos de dias representativos de 9 combinações entre três níveis de humidade do solo e três níveis de insolação astronómica e respectivos teores de humidade.....	71
2.14	Dias representativos de quatro níveis de nebulosidade ou de insolação real e respectivos teores médios de humidade do solo em Évora (Solo Pmg) e Lisboa (Solo Cb).....	72
3.1	Taxas de germinação vs. temperatura: temperaturas cardinais, intervalos térmicos, tempos térmicos, níveis de correlação e nº de pontos regredidos.....	86
3.2	Intervalos de Confiança para $T_{base}$ (°C) em cada cultura (95% de Confiança).....	88
3.3	Parâmetros da relação entre <i>probit</i> (G) e o tempo térmico.....	92
3.4	Regressão polinomial entre a germinação final $G_f$ e a temperatura (T) para o intervalo supra-óptimo de cada uma das culturas.....	96
3.5	Regressões lineares entre as taxas de emergência de 50% da população emergida e as temperaturas médias, para as culturas indicadas, e respectivas temperaturas-base.....	115
3.6	Temperaturas cardinais e tempo térmicos de emergência (50% e 80% da população emergida) das culturas indicadas, nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa), obtidos a partir das regressões entre a taxa de emergência e a temperatura.....	119
3.7	Intervalos de 95% de Confiança para a $T_{base}$ (°C) de emergência de 50% e 80% da emergência final para cada cultura.....	122
3.8	Tempos térmicos da emergência ( $0,5E_f$ ) no intervalo sub-óptimo ( $\theta_{1Emer}$ ), relativos aos solos Pmg e Cb.....	126
3.9	Parâmetros da relação entre <i>probit</i> (E) e o tempo térmico de emergência ( $\theta$ ), e entre <i>probit</i> (E) e as variáveis ( $\theta$ ) e a temperatura média.....	134
3.10	Temperaturas-base e tempos térmicos para a produção de folhas em cinco culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa), obtidos a partir das regressões lineares entre a taxa de produção de folhas e a temperatura.....	151
3.11	Intervalos de Confiança (95%) da temperatura-base (°C) para a produção de folhas durante o estabelecimento de cada espécie nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).....	153

3.12	Relação entre os tempos térmicos calculados nos solos Pmg e Cb para a emergência das plântulas $\theta_1(E)$ e para a emergência da primeira folha $\theta_1(P)$ de cinco culturas; relação entre os $\theta_1(P)$ estimados nos dois solos.....	155
3.13	Regressões lineares estabelecidas entre o número de folhas produzido por cinco culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa) e a temperatura acumulada.....	157
3.14	Coefficientes de correlação das regressões lineares estabelecidas entre o número de folhas de três culturas (ervilha, milho e sorgo) e a temperatura acumulada nos solos Pmg e Cb para teores médios de humidade do solo inferiores a 50% da C.U ( <sup>1</sup> entre a sementeira e a produção da 4ª ou da 5ª folha; <sup>2</sup> teor médio de humidade ao longo do estabelecimento) e filocrão de cada uma das culturas.....	159
3.15	Áreas foliares por planta e respectivos desvios-padrão à quinta folhas produzida (3ª para o girassol) das espécies indicadas, nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa), a várias temperaturas. O teor de humidade é a média dos valores medidos entre a sementeira e o fim do estabelecimento.....	164
3.16	Regressões estabelecidas entre a área foliar de cinco culturas e a temperatura acumulada nos solos Pmg e Cb, para condições hídricas não limitantes: equações de regressão, respectivos coeficientes de determinação e tempo térmico para o início da expansão da área foliar...	167
3.17	Intervalos de Confiança (95%) dos tempos térmicos (°Cd) para o início da expansão foliar das cinco culturas estudadas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).....	168
4.1	Temperaturas médias diárias e anuais, para os perfis PT1 e PT2 e às várias profundidades, nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).....	170
4.2	Percentagem de variação da temperatura do solo explicada por cada harmónica ou conjunto de harmónicas, a várias profundidades do solo em cinco dias-tipo ao longo do ano, definidos em função do comprimento do dia e do nível de humidade do solo (a) solo Pmg (b) solo Cb.....	178-179
4.3	Percentagem de variação da temperatura do solo explicada por cada harmónica ou conjunto de harmónicas, a várias profundidades do solo em cinco dias-tipo ao longo do ano, definidos em função da nebulosidade.....	180-181

4.4	Horas do dia em que ocorreram valores térmicos extremos e duração dos períodos de aquecimento observados a várias profundidades e calculados pela análise harmónica, para dias tipo ao longo do ano, definidos em função do comprimento do dia e do nível de humidade do solo.....	186-187
4.5	Horas do dia em que ocorreram valores térmicos extremos e duração dos períodos de aquecimento observados a várias profundidades e calculados pela análise harmónica, para dias tipo ao longo do ano, definidos em função da nebulosidade (a) solo Pmg (b) solo Cb.....	188-189
4.6	Semi-amplitudesn e ângulo de fase das duas primeiras harmónicas ajustadas à variação da temperatura a várias profundidades nos solos Pmg e Cb, em dias-tipo ao longo do ano definidos em função (a) do comprimento do dia, do nível de humidade do solo e (b) da nebulosidade.....	197-198
4.7	Profundidades de amortecimento da onda térmica nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa) em 13 dias-tipo: (a) 3 dias curtos 3 dias longos e 3 dias próximos dos equinócios; (b) quatro dias representativos de níveis diferentes de nebulosidade.....	201
4.8	Valores médios e desvios-padrão das profundidades de amortecimento e dos teores de água das classes definidas nos solos Pmg e Cb.....	202
4.9.	Testes t de Student à igualdade dos valores medidos da profundidade de amortecimento em pares de classes com variâncias desiguais.....	204
4.10	Profundidade de amortecimento (média, respectivos desvios-padrão e intervalos de confiança para um nível de probabilidade de 95%) em função do teor de Água nos solo em perfis U, H e S.....	206
4.11	Testes t de Student à igualdade dos valores medidos da profundidade de amortecimento em pares de classes com variâncias desiguais (classes de perfis em secagem, humdedecimento e uniformes).....	210
4.12	Profundidades de amortecimento da onda térmica nos solos Pmg e Cb obtidas a partir das Equações de Amplitude e de Fase para as duas primeiras harmónicas nos perfis térmicos PT1, PT2 e PT3 nos dias tipo indicados.....	214
4.13	Valores da razão entre profundidades de amortecimento nos solos Pmg e Cb estimadas a partir das equações de amplitude e de fase para a 1ª e 2º harmónicas nos perfis térmicos PT1, PT2 e PT3 e nos dias-tipo indicados.....	216

4.14	Profundidades de amortecimento da onda térmica nos solos Pmg e Cb para o perfil parcial (PT4) (2 a 8 cm) em 9 dias-tipo, obtidas a partir das amplitudes térmicas medidas e a partir das equações de amplitude e de fase das duas primeiras harmónicas, e respectivos valores de $R^2$ .....	217
4.15	Profundidades de amortecimento da onda térmica estimadas pelos métodos 1, 2 e 3 no perfil completo (PT1) e nos perfis parciais (PT2, PT3 e PT4) nos dias-tipo indicados.....	219
4.16	Regressões lineares entre as profundidades de amortecimento estimadas a partir da análise harmónica (Métodos 1, 2 e 3) e as estimadas a partir das amplitudes térmicas medidas para o perfil completo (PT1) e para os perfis parciais (PT2, PT3 e PT4).....	224
4.17	Percentagem de variação da temperatura do solo explicada por cada harmónica ou conjunto de harmónicas para os ciclos anuais, nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).....	229
4.18	Décadas do ano em que ocorreram valores térmicos extremos e períodos de aquecimento, observados e estimados para os ciclos anuais nos solos Pmg e Cb, às profundidades indicadas.....	231
4.19	Semi-amplitudes e ângulos de fase das duas primeiras harmónicas ajustadas à variação da temperatura a várias profundidades nos solos Pmg e Cb, em três ciclos anuais.....	235
4.20	Profundidades de amortecimento da onda térmica para o perfil completo (PT1) e para os perfis parciais (PT2 e PT3) nos ciclos anuais indicados, obtidas a partir das regressões entre amplitudes térmicas medidas e profundidades.....	236
4.21	Profundidades de amortecimento da onda térmica para o perfil completo (PT1) e para os perfis parciais (PT2 e PT3) nos ciclos anuais indicados, obtidas a partir das regressões entre amplitudes térmicas estimadas para a 1ª harmónica e respectivas profundidades.....	237
5.1	Temperaturas-base para a germinação, a emergência e o aparecimento das primeiras cinco folhas das diferentes culturas e correspondentes valores médios ( $T_{base}$ de estabelecimento).....	241
5.2	Tempos térmicos para a germinação de 50% do total de sementes germinadas, a emergência nos solos Pmg e Cb (50% do total de plântulas emergidas), ao início da produção foliar e da expansão foliar e à produção da 1ª e da 5ª folhas nos solos Pmg indicadas.....	245

5.3	Difusividades térmicas nos solos Pmg e Cb, em 9 dias-tipo, obtidas a partir das amplitudes térmicas medidas e a partir da equação de amplitude da 1ª harmónica nos perfis térmicos PT3 e PT4.....	265
5.4	Temperatura acumulada em cada dia-tipo para cada cultura para PT3 medidos nos solos Pmg e Cb.....	275

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área foliar (cm <sup>2</sup> )
AF	Área foliar total por planta (cm <sup>2</sup> )
A <sub>n</sub>	Termo da semi-amplitude C <sub>n</sub> da harmónica n (°C)
B <sub>n</sub>	Termo da semi-amplitude C <sub>n</sub> da harmónica n (°C)
C	Valor da constante de intercepção da relação linear entre <i>probit</i> (G) ou <i>probit</i> (E) e o tempo térmico $\theta_1$
C	Fluxo de entalpia entre a superfície e o ar imediatamente acima (W m <sup>-2</sup> )
c	Calor específico a pressão constante (J Kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
C.C.	Capacidade de Campo do Solo
C.E.	Coefficiente de Emurhecimento do Solo
C.U.	Capacidade Utilizável do Solo
C <sub>n</sub>	Semi-amplitude da harmónica n (°C)
C <sub>z,n</sub>	Semi-amplitude para a profundidade z e harmónica n (°C)
D	Drenagem (mm)
Dap	Densidade aparente do solo
D <sub>c</sub>	Profundidade de amortecimento estimada a partir da análise harmónica (cm)
DC	Dias curtos (insolação astronómica curta)
D <sub>1</sub>	Profundidade de amortecimento da harmónica fundamental (cm)
DL	Dias longos (insolação astronómica elevada)
DM	Dias médios (insolação astronómica intermédia)
D <sub>m</sub>	Profundidade de amortecimento estimada a partir das amplitudes térmicas medidas (cm)
D <sub>n</sub>	Profundidade de amortecimento da harmónica n (cm)
DT	Dotação de rega (mm),
D <sub>w</sub>	Densidade da água
E	Emergência
E	Evaporação da água à superfície (mm)
ETP	Evapotranspiração potencial (mm)
E <sub>s</sub>	Escoamento (mm)
ET	Evapotranspiração (mm)



F	Produção de folhas
$F_s$	Água congelada por unidade de tempo e por unidade de área
G	Germinação
G	Fluxo de energia do solo (no plano horizontal que limita inferiormente a camada de solo considerada ( $W m^{-2}$ ))
H	Variação de humidade no solo (%)
Hb	Humidade baixa
He	Humidade elevada
Hm	Humidade média
$H_m$	Teor de humidade médio do solo ( $m_w$ )
$H_v$	Humidade do solo ( $cm^3/cm^3$ )
I	Dia de céu limpo
L	Comprimento de uma folha (cm)
LE	Fluxo de calor latente resultante dos fenómenos de evaporação, condensação e transpiração ocorridos à superfície do solo
Lm	Calor latente de fusão ( $=334Jg^{-1}$ )
M	Dia de céu muito nublado
Ms	Neve e gelo fundidos por unidade de tempo e por unidade de área
$m_s$	Massa do solo seco em estufa (gr)
<i>m.a.a.</i>	Mínimos agronomicamente aceitáveis (%)
n	Número de ordem da harmónica
N	Número de contagens efectuado entre a sementeira e a germinação final ou a emergência final.
N	Dia de céu encoberto
P	Período de oscilação (24 horas para o dia e 365 dias para o ano).
P	Precipitação
P	Dia de céu pouco nublado
PAq	Períodos de aquecimento (horas, décadas)
pF	Logaritmo da altura em centímetros da coluna de água que exerce pressão equivalente à força de retenção ou atracção do solo para a água
PH	Perfis em fase de humedecimento
PS	Perfis em fase de secagem
PT1	Perfil térmico completo (0, 2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)

PT2	Perfil térmico parcial (2, 4, 6, 8, 16 e 32 cm)
PT3	Perfil térmico parcial (2, 4, 6, 8 e 16 cm)
PT4	Perfil térmico parcial (2, 4, 6 e 8 cm)
PU	Perfis uniformes
$R_i$	Taxa de um processo de desenvolvimento vegetal ( $d^{-1}$ )
$R_n$	Fluxo de radiação líquida à superfície ( $W m^{-2}$ )
R	Rega (mm)
$R^2$	Coefficiente de determinação
$R_{máx}$	Taxa máxima de um processo de desenvolvimento vegetal ( $d^{-1}$ )
$R_{med}$	Taxa de emergência medida ( $d^{-1}$ )
$R_{est}$	Taxa de emergência estimada ( $d^{-1}$ )
S	Variação da humidade (mm)
$S_T^2$	Variância em torno de $T_{méd}$
$z_s, s$	Profundidade de sementeira (cm)
t	Tempo cronológico
$t_g$	tempo de germinação (dias)
$t_e$	tempo de emergência (dias)
T(t)	Variação temporal da temperatura do solo ( $^{\circ}C$ )
$T_{méd}$	Temperatura média do solo, diária ou anual ( $^{\circ}C$ )
$T'_m$	Temperatura máxima acima da qual os <i>m.a.a.</i> não são atingidos ( $^{\circ}C$ )
$T'_b$	Temperatura base abaixo da qual os <i>m.a.a.</i> não são atingidos ( $^{\circ}C$ )
$T_{base}''$	Temperatura base (da germinação ou da emergência) acima da qual a dispersão é mínima ( $^{\circ}C$ )
T	Temperatura do solo a uma dada profundidade ( $^{\circ}C$ )
T	Transpiração das plantas (mm)
$T_{base}, T_b$	Temperatura-base de um processo de desenvolvimento vegetal
$T_{máx}, T_m$	Temperatura máxima de um processo de desenvolvimento
$T_{ópt}, T_o$	Temperatura óptima de um processo de desenvolvimento
$T_1$	Temperatura média no intervalo de tempo $\Delta t_1$
$T_2$	Temperatura média no intervalo de tempo $\Delta t_2$
$t_b$	Limite (temporal) superior de integração do intervalo $\Delta t_1$
$t_a$	Limite (temporal) inferior de integração do intervalo $\Delta t_1$

$t_d$	Limite (temporal) superior de integração do intervalo $\Delta t_2$
$t_c$	Limite (temporal) inferior de integração do intervalo $\Delta t_2$
$U$	Fluxo capilar ascendente (mm)
$W$	Largura de uma folha (cm)
$y_i$	Valores observados da germinação ou da emergência acumulada,
$\hat{y}$	Valores estimados a partir da análise <i>probit</i>
$y$	Média dos valores observados
$z$	Profundidade (cm)
$Z$	Espessura de solo humedecida (mm).
$\alpha$	Difusividade térmica ( $m^2 s^{-1}$ )
$\Delta H_s$	Varição do armazenamento de energia por unidade de área ( $W m^{-2}$ )
$\Delta t$	Período de tempo
$\Delta S$	Varição do armazenamento de água na camada superficial por unidade de área (mm)
$\Delta V$	Incremento de água incorporado na biomassa (mm) Varição do armazenamento (mm)
$\Delta z$	Espessura de uma camada de solo (cm)
$\phi_n$	Ângulo de fase da harmónica de ordem $n$ ( $\pi$ rad)
$\lambda$	Condutividade térmica ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
$\pi$	3,1416
$\theta_1$	Tempo térmico ou duração térmica de um processo de desenvolvimento vegetal no intervalo térmico sub-ótimo ( $^{\circ}Cd$ )
$\theta_2$	Tempo térmico ou duração térmica de um processo de desenvolvimento vegetal no intervalo térmico supra-ótimo ( $^{\circ}Cd$ )
$(\theta_1)'$	Tempo térmico $\theta_1$ equivalente a $\theta_2$ ( $^{\circ}Cd$ )
$\theta$	Teor de água volumétrico do solo a uma dada profundidade ( $cm^3/cm^3$ )
$\rho$	massa volúmica do solo ( $Kg m^{-3}$ )
$\rho c_m$	capacidade calorífica volumétrica ( $J m^{-3}K^{-1}$ )
$\sigma$	Desvio padrão da distribuição de frequências do tempo térmico ( <i>análise probit</i> )
$\tau$	Tempo cronológico de um processo de desenvolvimento vegetal (dia)

$\omega$	Frequência angular da oscilação térmica ( $d^{-1}$ )
$\nabla T$	Gradiente espacial de temperatura.
$\nabla^2 T$	Laplaciano da temperatura em coordenadas cartesianas
$\Delta t_1$	Intervalo de tempo durante o qual se registaram temperaturas abaixo da temperatura óptima de germinação
$\Delta t_2$	Intervalo de tempo durante o qual se registaram temperaturas superiores à temperatura óptima de germinação



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 . Clima, desenvolvimento e produção vegetais

A temperatura, a água e a luz influenciam directamente o desenvolvimento e a produção vegetais (Monteith, 1977): a água transporta os nutrientes e constitui uma percentagem elevada da biomassa; a luz é a fonte de energia utilizada para realizar a fotossíntese; a temperatura regula o ritmo de desenvolvimento vegetal. A influência da temperatura e da humidade do solo em diferentes fases do desenvolvimento e do crescimento das culturas é demonstrada em numerosos trabalhos (Denmead e Shaw, 1962; Knoll *et al*, 1963; Stoffer e Van Riper, 1964; Adams, 1967; Maun *et al*, 1968; Power *et al*, 1970; Pearson *et al*, 1970; Bhattacharyya e De Datta, 1971; Wanjura e Buxton, 1972; Ralston e Daniel, 1972; Mosher e Miller, 1972; Allmaras e Nelson, 1973; Boatwright *et al*, 1976; Morrow e Power, 1979; Wilson, 1981; Kaspar *et al*, 1981; Stone *et al*, 1983; Sharratt, 1991; Helms *et al*, 1996; Weaich *et al*, 1996a). Os efeitos da temperatura (do solo e/ou do ar) no desenvolvimento e na produção vegetais interagem com os do teor de água no solo (Sharma, 1976; Chirkov, 1979; Rosemberg *et al*, 1983; Gummerson, 1986). Vários modelos de crescimento, desenvolvimento e produção vegetais incluem como variáveis motrizes a temperatura do solo (Knoll *et al*, 1963; Warrington e Kanemasu, 1983; Ferreira *et al*, 1997) ou a temperatura e o teor de humidade do solo (Gilmore e Rogers, 1958; Andersen e Kemper, 1964; Epstein, 1966; Lindstrom *et al*, 1976; Campbell e Diaz, 1998; Ketring e Wheless, 1989; Brar *et al*, 1992; Abreu, 1994).

A produção de uma cultura depende da produtividade por planta e do número de plantas simultaneamente produtivas. Os factores que mais limitam a produtividade das culturas nas regiões mediterrâneas semi-áridas são a irregularidade da precipitação, a que se associam défices hídricos no solo relativamente prolongados (Fisher e Turner, 1978; Ong, 1984), e as temperaturas extremas, que são frequentemente impeditivas do desenvolvimento das plantas (Lal, 1974; Wilson *et al*, 1982). Na Primavera, o comportamento térmico e hídrico da camada superficial do solo é frequentemente afectado pela elevada radiação solar e pelos valores elevados da evapotranspiração potencial e do défice de saturação da atmosfera durante o dia; no Outono e no Inverno as precipitações são irregulares e frequentemente de elevada intensidade e o solo encontra-se com frequência à capacidade de campo ou a níveis aproximados desta.

Além disso, em Portugal Continental detecta-se uma tendência decrescente nos valores anuais de precipitação, sendo o decréscimo maior na Primavera e sobretudo em Março, onde é altamente significativo (IM, 2001).

O número de plantas produtivas depende da densidade da sementeira e de um adequado estabelecimento das culturas.

## **1.2. Estabelecimento das culturas**

O estabelecimento de uma cultura compreende as fases de germinação das sementes, de emergência das plântulas à superfície do solo e da produção de um número inicial de folhas suficiente para tornar a plântula independente das reservas limitadas contidas na semente.

### **1.2.1. Sucesso do estabelecimento**

A germinação, a emergência das plântulas à superfície e o aparecimento das primeiras folhas constituem fases particularmente críticas do desenvolvimento. O sucesso do estabelecimento de uma cultura assenta numa germinação e numa emergência rápidas (isto é, de curta duração), uniformes (pequena dispersão no tempo ao longo da população de sementes ou plântulas) e máximas (isto é, com uma dimensão final percentualmente elevada) e num rápido crescimento da área foliar, a qual determina a intercepção total de radiação pela planta, como nos casos do milho (Fortin *et al.*, 1994) e do amendoim (Abreu, 1987). Uma percentagem elevada de plântulas emergidas aumenta a capacidade competitiva relativamente a infestantes e à intercepção da luz, enquanto que uma emergência mais concentrada no tempo permite maior uniformidade de desenvolvimento (Covell *et al.*, 1986a). Emergências rápidas permitem menor exposição a organismos patogénicos do solo (Hatfield e Egli, 1974), em particular para temperaturas mais baixas (Angus *et al.* 1981a; Ong, 1983), evitam os efeitos de secagem brusca do solo, sobretudo para temperaturas mais elevadas (Webb *et al.*, 1987; Itabari *et al.*, 1993; Peacock *et al.*, 1993) e aumentam a competitividade ante as infestantes. O insucesso do estabelecimento aumenta consideravelmente o número de sementes a utilizar por planta produtiva e conduz a desequilíbrios irrecuperáveis nos estádios de desenvolvimento subsequentes.

O sucesso do estabelecimento das culturas depende sobretudo das condições térmicas e hídricas do solo (Abreu, 1987). Durante a época de sementeira das culturas

primaveris, a variação do teor de água no solo é por vezes considerável e as temperaturas máximas diárias à superfície do solo são muitas vezes superiores a 30°C. As baixas temperaturas mínimas diárias, associadas eventualmente à ocorrência de geadas, podem limitar o estabelecimento das culturas outono-invernais, mas sobretudo o das primaveris.

### **1.2.2. Germinação e emergência**

Uma semente viável germina se a sua dormência for quebrada (Bewley e Black, 1994). Outros factores influenciam a germinação: a viabilidade das sementes depende das características genéticas das sementes (Mayer e Poljakoff-Mayber, 1975), da variedade de factores a que as plantas foram expostas durante a formação e a maturação das sementes, das suas condições de armazenamento, da proveniência das sementes e de tratamentos prévios a que são sujeitas (Thompson, 1970). De um ponto de vista estritamente botânico, Everani (1957) definiu germinação como um processo que se inicia com a embebição da semente e termina com a protusão da raiz embriónica (radícula) através do tegumento, enquanto Bewley e Black (1994) estabeleceram o seu termo no início do alongamento do eixo embriónico, normalmente a radícula. Thomson (1979) resumiu o processo como sendo o recomeço do crescimento activo do embrião. Vários autores entenderam a germinação em *senso lato*, considerando-a terminada quando as plantas produzem uma superfície fotossintética suficiente para se alimentarem (Kramer e Kozlowski, 1960; Wellington, 1965). Côme e Thévenot (1982) caracterizaram o processo germinativo, *senso lato*, como sendo composto por 3 fases: a fase de embebição, a que corresponde uma rápida absorção de água pela semente (aumento de peso) e um acréscimo rápido do consumo de oxigénio; a fase de germinação verdadeira ou de activação (germinação em *senso stricto*), durante a qual o teor de água das sementes se mantém relativamente estável e a taxa de absorção de oxigénio diminui; a fase de crescimento, que se inicia com o alongamento da radícula, associado a nova absorção de água. Na 1ª fase, o conteúdo em água da semente passa de valores inferiores a 15% do peso húmido para valores entre 30 e 50% (Simon, 1982); na 3ª fase, a preparação ao nível metabólico do crescimento da radícula é controlada fortemente pela temperatura (Simon, 1982). A passagem da 2ª para a 3ª fase corresponde ao fim do processo germinativo definido por Bewley e Black (1994) e é seguida de um aumento sustentado do peso fresco.



Associado ao alongamento da radícula há posterior alongamento do caulículo (dicotiledóneas) ou do coleóptilo (monocotiledóneas) em direcção à superfície. Uma plântula emerge quando são visíveis à superfície do solo os cotilédones ou o epicótilo no caso das dicotiledóneas, ou o coleóptilo para a maioria das monocotiledóneas. Uma plântula normal é definida, pelas Regras Internacionais para o Ensaio de Sementes (FAO, 1986), como a que apresenta capacidade de desenvolver uma planta normal quando cresce em solos de boa qualidade e sob condições favoráveis de humidade; podem ser plântulas intactas ou com ligeiros defeitos ou infecções secundárias. A emergência é epigea quando os cotilédones emergem do solo por extensão do hipocótilo, processando-se de seguida o desenvolvimento do epicótilo e do gomo terminal. Este comportamento é apresentado pela maioria das espécies agrícolas, hortícolas e lenhosas. A emergência é hipógea quando os cotilédones permanecem abaixo do solo e as primeiras folhas verdadeiras se expandem a partir do epicótilo. Este comportamento ocorre na maioria das monocotiledóneas, em algumas leguminosas de sementes grandes (por exemplo, na fava) e em algumas espécies arbóreas e florestais.

### **1.2.3. Factores que afectam o estabelecimento**

A germinação de sementes viáveis depende de factores que interferem na quebra de dormência e que intervêm directamente no desenrolar do processo germinativo, influenciando os seus parâmetros (duração ou velocidade, dimensão e dispersão numa população de sementes). Os factores que afectam a emergência das plântulas são os que afectam a germinação e os que afectam o alongamento da plântula até à sua emergência à superfície do solo, influenciando a percentagem final (dimensão) de plântulas emergidas, a dispersão temporal e a duração da emergência das diferentes fracções de uma população de plântulas.

A temperatura do solo e os teores de água e de ar no solo influenciam directamente o estabelecimento, enquanto que a temperatura do ar é importante no aparecimento (ou na produção) das primeiras folhas, no caso das dicotiledóneas. Vários estudos mostram a influência da temperatura na quebra de dormência (Vegis, 1963; Chaudhary e Ghildyal, 1969; Roberts, 1972; Thomson, 1979), no início da embebição (Fayemi, 1957; McGinnes, 1960), na taxa de absorção de água pelas sementes, na velocidade dos processos bioquímicos associados à germinação (Poljakoff-Mayber, 1975; Fyfield e Gregory, 1989; Bewley e Black, 1994) e na velocidade de alongamento do hipocótilo/coleóptilo (Hatfield e Egli, 1974). Para diferentes culturas agrícolas,

Singh e Dhaliwal (1972) e Chu *et al.* (1991) mostraram a influência da temperatura do solo na capacidade das plântulas pré-emergentes em vencer a resistência à subida, sobretudo a temperaturas extremas; a influência na germinação e emergência finais assim como nas respectivas taxas (velocidades), foi demonstrada por Garcia-Huidobro *et al.* (1982a,b), Mohamed *et al.*, (1988a,b) e Mosjidis (1990) respectivamente para o milho painço, o amendoim e *Lespedeza cuneata* (Dumont de Courset)G.Don., por Covell *et al.* (1986a), Ellis *et al.* (1986b, 1987c) e Brar *et al.* (1991) para diferentes leguminosas, entre as quais o grão de bico e a fava e por Thompson (1970) para diferentes espécies agrícolas. A influência da temperatura do solo na dispersão ao longo do tempo da germinação de diferentes espécies agrícolas foi demonstrada em numerosos trabalhos, como por exemplo, os de Janssen (1973) de Hsu *et al.* (1984), de Covell *et al.* (1986a), de Ellis *et al.* (1986a, 1987c), de Welbaun e Bradford (1991) e de White e Montes-R (1993), assim como a influência na dispersão ao longo do tempo da emergência (Hsu *et al.*, 1984; Abreu e Clark, 1993). Além disso, a temperatura do solo em contacto directo com o meristema apical influencia a produção e o crescimento foliar do milho painço (Mohamed *et al.*, 1988b), do milho (Bollero *et al.*, 1996) e do trigo (Gallagher, 1979).

Do teor de água do solo depende o início da germinação (Côme e Thévenot, 1982; Bewley e Black, 1994). A influência do teor de água do solo no estabelecimento das culturas ficou demonstrada, por exemplo, por Feddes (1971) na germinação final de sementes de favas, espinafres e rabanetes, por Hsu *et al.* (1984) e por Abreu e Clark (1993) na dispersão da emergência, respectivamente de *Sorghastrum nutans* L. e do amendoim; por Abreu (1987), Lafond e Flower (1989) e Itabari *et al.* (1993) na velocidade de crescimento da plântula em direcção à superfície e nas emergências finais do amendoim, do trigo e do milho, respectivamente. Por sua vez, Leong e Ong (1983), Craufurd *et al.* (1993) e Barlow *et al.* (1977) demonstraram que teores baixos de humidade do solo influenciam negativamente a produção das primeiras folhas, respectivamente, de amendoim, de sorgo e de milho.

Outros factores influenciam a germinação: a dureza do revestimento da semente (tegumento) (Bewley e Black, 1994), a sua composição e a permeabilidade da testa ou do fruto à água (Mayer e Poljakoff-Mayber, 1975) interferem na quebra de dormência das sementes; factores internos como o tamanho da semente (Lafond e Baker, 1986; Qiu *et al.*, 1995), o seu teor de água inicial (Cal e Obendorf, 1972; Muendel, 1986), a presença ou ausência de revestimento do endosperma (Dahal *et al.*, 1990b) e factores

externos como a taxa de difusão do oxigénio (Hanks e Thorp, 1956; Unger e Danielson, 1964; Hegarty, 1977; Dahal *et al.* 1996), a compactação do solo (Mayer e Poljakoff-Mayber, 1975) ou a exposição à luz assim como a sua intensidade, duração ou composição espectral (Pollock, 1972) influenciam também os parâmetros da germinação (dimensão, duração e dispersão).

Nem todas as sementes germinadas emergem à superfície. A diferença entre o nº de sementes germinadas e o correspondente número de plântulas emergidas deriva, em larga medida, de uma duração excessiva da permanência de plântulas abaixo da superfície do solo, o que aumenta a possibilidade de esgotamento de reservas antes da emergência (Itabari *et al.*, 1993). A duração desta permanência depende de factores como a formação de crostas à superfície do solo, frequente em zonas semi-áridas e em solos com fraca estabilidade estrutural nos horizontes superiores (Taylor, 1962; Ghildial e Tripathi, 1987; Brar e Stewart, 1994; Bresson, 1995), a profundidade de sementeira (Parker e Taylor, 1965; Alessi e Power, 1971; Gan *et al.*, 1992; Roundy *et al.*, 1993) e também das características genéticas das culturas (Stucky, 1976). A percentagem final de plântulas emergidas também pode ser afectada por baixas taxas de difusão de oxigénio (Wengel, 1966). Parker e Taylor (1965), Alessi e Power (1971), Gan *et al.* (1992) e Roundy *et al.* (1993) mostraram, para diferentes culturas, que a profundidade de sementeira pode afectar a velocidade e a dispersão da emergência.

### **1.3. Tempo térmico e desenvolvimento vegetal**

Nas últimas décadas, fisiologistas, físicos e agrónomos procuraram estabelecer relações entre a taxa (ou velocidade) de desenvolvimento de diferentes fases do ciclo vegetativo das plantas (germinação, emergência, aparecimento de folhas, floração...) e a temperatura. Numerosos estudos indicam que esta relação é linear (Bierhuizen e Feddes, 1969; Hegarty, 1973; Bierhuizen e Wagenvoort, 1974; Thompson e Fox, 1976; Monteith, 1977). A partir desta relação foram definidos conceitos como soma de calor (Bierhuizen e Feddes, 1969; Warrigton e Kanemasu, 1983), unidade de calor (Kanemasu *et al.*, 1975; Singh *et al.*, 1984; Fidanza *et al.*, 1996), temperatura total (Gasparin cit. por Diehl, 1989), temperatura acumulada e, mais recentemente, tempo térmico ou duração térmica (Monteith, 1977; Garcia-Huidobro, 1982a; Leong e Ong, 1983; Mohamed *et al.*, 1988a,b; Abreu, 1987).

Para uma fase específica do desenvolvimento  $i$ , representada por um número (1,...,n) se for um processo de diferenciação, Monteith (1977) demonstrou que a taxa de desenvolvimento ( $R_i$ , em  $d^{-1}$ ) é função linear da temperatura ( $T$ , °C) acima de uma temperatura-base ( $T_{base}$  ou  $T_b$ ):

$$R_i = 1/\tau_i = (1/\theta_1) (T - T_{base}) \quad (1.1)$$

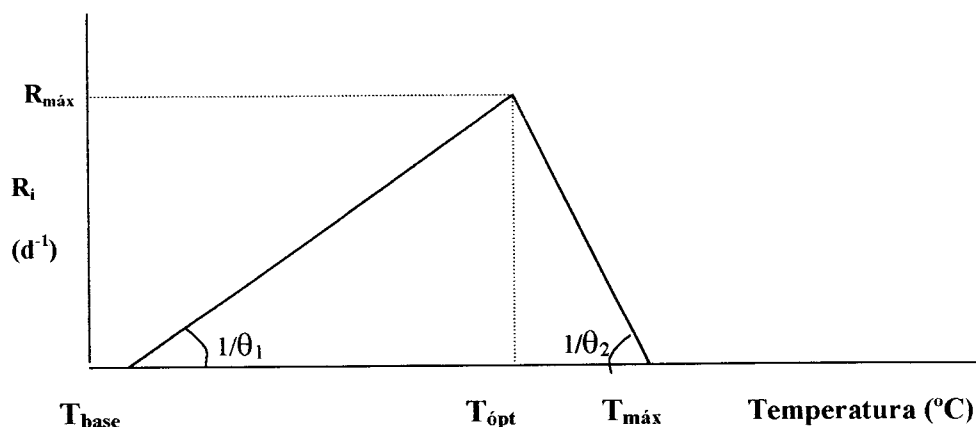
onde  $\tau_i$  é o tempo cronológico de duração da fase  $i$ , e  $\theta_1$  é o tempo térmico ou duração térmica da mesma fase e exprime-se em graus-dia (°Cd) (Fig. 1.1).  $\theta_1$  é a temperatura que é necessário acumular ao longo do tempo cronológico para que se verifique, ou se conclua, o processo ou a fase de desenvolvimento considerados, e  $T_{base}$  é a temperatura abaixo da qual o desenvolvimento é nulo ( $R_i = 0$ ), isto é, a duração cronológica  $\tau_i$  é infinita. O produto do tempo cronológico por  $(T - T_{base})$  é a temperatura acumulada, em °Cd, durante esse tempo.

Garcia-Huidobro *et al.*, (1982a,b) e Mohamed *et al.*, (1988a,b) descreveram a germinação (G), a emergência (E) e a produção de folhas (F) de diferentes culturas ao longo de uma gama extensa de temperaturas e definiram dois intervalos de temperatura complementares (Fig. 1.1): um intervalo sub-óptimo ( $T_{base} < T < T_{opt}$ ) ao longo do qual as respectivas taxas ( $R_i$ , onde  $i = G, E$  ou  $F$ ) crescem linearmente com a temperatura segundo a eq. (1.1), e um intervalo supra-óptimo ( $T_{opt} < T < T_{máx}$ ) ao longo do qual as taxas decrescem com o aumento da temperatura de acordo com:

$$R_i = 1/\tau_i = (1/\theta_2) (T_{máx} - T) \quad (1.2)$$

onde  $\theta_2$  é o tempo térmico ou duração térmica para o intervalo supra-óptimo (intencionalmente definido como na Fig. 1.1) e  $T_{máx}$  é a temperatura acima da qual o desenvolvimento é nulo ( $R_i=0$ ). A temperatura que corresponde à taxa máxima de desenvolvimento é a temperatura óptima ( $T_{opt}$ ).  $T_{base}$ ,  $T_{opt}$  e  $T_{máx}$  são as temperaturas cardinais e são características de cada cultura (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a).

Entre as respectivas temperatura base e a temperatura máxima, as culturas desenvolvem-se ao longo do tempo cronológico a uma taxa que é modificada pela temperatura (equações 1.1 e 1.2). O tempo térmico varia com a fase de desenvolvimento considerada mas, para cada fase, é considerado independente da temperatura ambiente dentro dos limites considerados e característico de cada cultivar (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a). Por isso, pode ser usado para comparar o comportamento de diferentes culturas durante o desenvolvimento ou, para cada cultura, a duração cronológica de uma fase específica em diferentes climas e locais (Bierhuizen e Wagenvoort, 1974,



**Fig. 1.1. Variação hipotética da taxa de desenvolvimento de um dado processo vegetativo ( $R_i$ ) em função da temperatura e respectivas temperaturas cardinais.**

Kanemasu *et al.*, 1975; Angus *et al.*, 1981a). A aplicação do conceito de tempo térmico para cada fase de desenvolvimento de uma determinada cultura permite: definir os respectivos limites térmicos de tolerância ( $T_{base}$  e  $T_{máx}$ ) e a temperatura a que correspondem as durações cronológicas mínimas ( $T_{ópt}$ ); avaliar os efeitos da temperatura separadamente dos de outros factores, nomeadamente do teor de água do solo (Abreu e Clark, 1993); avaliar a dispersão da germinação e da emergência das várias fracções de população germinadas ou emergidas com base na dispersão dos tempos térmicos e não somente a partir da relação entre a germinação ou a emergência acumuladas e o tempo cronológico (Jansen, 1973; Covell *et al.*, 1986a; Abreu e Clark, 1993).

#### **1.4. Temperatura e humidade do solo**

##### **1.4.1. O sistema - solo**

O solo “(...) é uma colecção de corpos naturais que foram sintetizados em forma de perfil a partir de uma mistura variável de minerais quebrados e desintegrados e matéria orgânica em decomposição, que cobre a terra numa fina camada, e que fornece, quando contém as quantidades apropriadas de ar e água, suporte mecânico e sustentação para as plantas” (Brady, 1990). Serve de meio de crescimento a uma versátil comunidade de organismos vivos, interage dinamicamente com a atmosfera e com os estratos subjacentes, e desempenha um importante papel ambiental como reactor bio-físico-químico, (Hillel, 1998).

A camada superficial do solo é fundamental quer em termos de comportamento energético e hídrico do solo, quer em termos de desenvolvimento das plantas. As variações na composição de cada unidade-solo, incluindo a variação do seu teor em água, são normalmente mais pronunciadas na direcção vertical que na horizontal. As características físicas e químicas variam ao longo do perfil do solo, assim como a actividade biológica. Os processos biológicos e químico-biológicos ocorrem sobretudo nos 5-10 cm superficiais do solo (Kluender *et al.*, 1993). A camada mais superficial do solo contém a maior parte da massa total das plantas (Scharringa, 1976), pelo que a matéria orgânica, em grau variável de decomposição, decresce com a profundidade e determina a distribuição dos microorganismos (bactérias, fungos, algas e protozoários), na sua maior parte aeróbios (Fitzpatrick, 1980). O equilíbrio gasoso (razão oxigénio/dióxido de carbono) é menos estável na camada superficial e o vapor de água é suficiente para manter saturada a atmosfera do solo (Ghildyal e Tripathi, 1987). As profundidades de sementeira usualmente praticadas para cereais e leguminosas variam entre 1 e 3 cm (Dihel, 1989) enquanto que o regime térmico do sistema radical, na fase de estabelecimento, depende das variações térmicas diárias nos 8-10 cm superficiais.

#### 1.4.2. Balanço energético e temperatura do solo

A temperatura de uma camada de solo está directamente ligada ao seu balanço energético. As variações térmicas num solo dependem das trocas energéticas que ocorrem na interface solo-atmosfera, variáveis ao longo dos ciclos diário e anual, e das suas propriedades térmicas (isto é, do solo enquanto meio de propagação de calor).

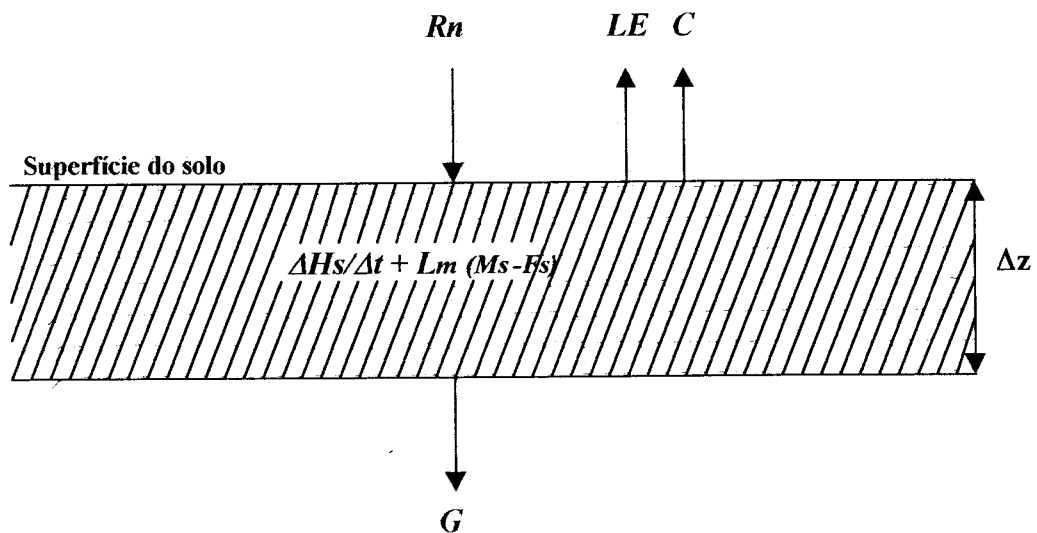
##### Balanço energético

O solo é um sistema aberto, de paredes permeáveis e diatérmicas. O balanço de energia da sua camada superficial, de massa e capacidade calorífica finitas e espessura  $\Delta z$  limitada por planos horizontais à superfície e na base, pode ser escrito na forma (Peixoto e Oort, 1992):

$$\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = Rn - C - LE - G - Lm(Ms - Fs) \quad (W m^{-2}) \quad (1.3)$$

onde  $\Delta H_s/\Delta t$  é a taxa de variação do armazenamento de energia por unidade de área da camada considerada (na forma de energia interna),  $Rn$  é a densidade de fluxo de radiação líquida à superfície,  $C$  a densidade de fluxo de entalpia entre a superfície e o ar

imediatamente acima,  $LE$  a densidade de fluxo de calor latente resultante dos fenómenos de evaporação, condensação e transpiração ocorridos à superfície,  $G$  o fluxo de energia do solo através do plano horizontal que limita inferiormente a camada de solo considerada,  $Lm$  é o calor latente de fusão,  $Ms$  é a quantidade de neve e de gelo fundidos por unidade de tempo e por unidade de área e  $Fs$  a água congelada por unidade de tempo e por unidade de área (Fig. 1.2). Os fluxos considerados são fluxos verticais líquidos nas fronteiras da camada considerada. O balanço energético da superfície do solo (sistema bidimensional e sem capacidade calorífica) obtém-se fazendo  $\Delta Hs/\Delta t$  igual a zero na equação (1.3), sendo  $G$  o fluxo de energia da superfície para o interior do solo ou vice-versa.



**Fig. 1.2. Termos do balanço energético da camada superficial de um solo ( $\Delta z$ ) durante o dia. O significado dos símbolos está explicado no texto. (Peixoto e Oort, 1992)**

São por vezes incluídas no balanço energético parcelas como a fotossíntese e outras permutas energéticas à superfície (Rosemberg *et al.*, 1983). Contudo, a soma dos fluxos que as representam é usualmente menor que 5% da radiação líquida disponível (Lemon, 1960b) ou que o erro experimental cometido no cálculo de  $Rn$  ou de  $LE$  (Taylor e Ashcroft, 1972).

A taxa de armazenamento de energia na camada é dada por

$$\frac{\Delta H_s}{\Delta t} = \int \frac{\Delta}{\Delta t} (\rho c T) dz \quad (1.4)$$

onde  $c$  é o calor específico ( $\text{J Kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) e  $\rho$  ( $\text{Kg m}^{-3}$ ) e  $T$  ( $^\circ\text{C}$ ) são a massa volúmica aparente e a temperatura do solo a uma dada profundidade  $z$ , respectivamente. Quando os fluxos de energia entrados no sistema excedem os saídos há aquecimento do solo ( $\Delta H_s/\Delta t > 0$ ), isto é, há fluxo líquido convergente; se os fluxos saídos do sistema excedem os que entram há fluxo líquido divergente e o solo arrefece ( $\Delta H_s/\Delta t < 0$ ).

A importância relativa do fluxo de energia ( $G$ ) no balanço energético varia com a altura do dia e do ano, o tipo de clima, a humidade do solo à superfície, o tipo e o grau de cobertura ou a microtopografia do solo. Em termos médios não excede 10-15% da radiação líquida diária (Tanner e Pelton, 1960; Sellers, 1965; Horton e Wierenga, 1983). Em solos cultivados e sem limitações hídricas varia entre 5% e 20% consoante o tipo de cultura e o teor de água no solo (Baver *et al.*, 1972; Verhoef *et al.*, 1996). Em solo arenoso e nu, pode exceder 50% (Fuchs e Tanner, 1968), e mesmo mais em balanços horários, particularmente em solos secos e desérticos (Horton e Wierenga, 1983).

#### **Equações de condução de calor**

No solo, o fluxo de energia ( $G$ ) faz-se fundamentalmente por condução molecular. Transferências por radiação e convecção são, na maior parte dos casos, de importância secundária. A lei de Fourier estabelece que o fluxo de energia por condução, num corpo homogéneo e isotrópico, é proporcional ao gradiente de temperatura e paralelo à sua direcção:

$$G = -\lambda \nabla T \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (1.5)$$

onde  $G$  é o fluxo de energia (quantidade de energia conduzida por unidade de área e por unidade de tempo),  $\lambda$  é a condutividade térmica ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) e  $\nabla T$  o gradiente espacial de temperatura. O sinal negativo significa que o vector  $G$  tem um sentido oposto ao gradiente de temperatura (2º Princípio da Termodinâmica). Esta equação descreve a condução de calor para um campo de temperatura estacionário (a temperatura em cada ponto do meio condutor é invariante isto é, a sua derivada euleuriana em ordem ao tempo é nula).

A direcção predominante do fluxo de energia no solo ( $G$ ) é a vertical porque a superfície do solo é a fronteira energeticamente mais activa (a fonte principal de energia



é a radiação solar). Para a direcção vertical  $z$ , a equação (1.5) escreve-se da seguinte forma:

$$G(z) = -\lambda \cdot dT/dz \quad (\text{W m}^{-2}) \quad (1.6)$$

admitindo que  $\lambda$  é independente de  $z$ .

Considerando o princípio da conservação da energia na forma da equação da continuidade (na ausência de fontes e sumidouros, a taxa de variação da concentração energética num elemento de volume de um meio condutor,  $\rho c \partial T / \partial t$ , iguala a variação espacial da densidade de fluxo de energia), a equação (1.6) vem

$$\partial T / \partial t = \alpha \partial^2 T / \partial z^2 \quad (1.7)$$

onde  $\alpha$  é a difusividade térmica, definida analiticamente como a razão entre a condutividade ( $\lambda$ ) e a capacidade calorífica volumétrica ( $C$ ):

$$\alpha = \lambda / C \quad (\text{m}^2 \text{s}^{-1}) \quad (1.8)$$

A condutividade térmica, a capacidade calorífica volumétrica e a difusividade térmica são as propriedades térmicas do solo. As duas primeiras traduzem a capacidade de transferir ou de armazenar energia, respectivamente; a terceira é uma medida do impacte do fluxo de energia na variação térmica do solo.

A condutividade e difusividade térmicas de um meio dependem do estado físico e da superfície de contacto entre as partículas que o constituem. Por isso, no solo variam com o teor de humidade do solo, a textura, a estrutura e a densidade aparente. Solos húmidos ou muito húmidos apresentam difusividades térmicas mais elevadas que solos secos ou quase secos (van Wijk e de Vries, 1963); além disso, as difusividades térmicas são mais elevadas em solos arenosos que em solos de textura mais fina e aumentam com a profundidade devido ao aumento da densidade aparente. Por isso, o atraso da onda térmica em profundidade é maior nos solos argilosos que nos solos arenosos (Baver *et al.*, 1972).

#### **Limitações à aplicação da equação da condução de calor**

A aplicação a solos reais da teoria de condução de calor para meios semi-infinitos homogéneos apresenta limitações, porque a condução não é o único modo de transferência de energia e porque as propriedades térmicas do solo variam ao longo do perfil e do tempo (Lettau, 1954). No espaço poroso de solos, sobretudo quando não saturado de água, há transferência convectiva de energia associada ao fluxo de água líquida ou de vapor de água (Philip e de Vries, 1957). Por outro lado, a composição mineralógica, a textura, a estrutura, a densidade aparente e o teor de humidade do solo variam, em grau diverso, ao longo do perfil e do tempo (Costa, 1973), fazendo variar a

difusividade térmica ao longo do perfil e do tempo (de Vries, 1975; Sepaskhah e Boersma, 1979).

Além disso, em determinadas condições, o calor libertado ou gerado na camada de solo (efeitos não-adiabáticos) pode ter alguma importância relativa na taxa de variação da concentração energética. As fontes internas de calor englobam a decomposição da matéria orgânica, o humedecimento inicial de um solo ou a condensação de vapor de água (Hillel, 1998). Os sumidouros estão geralmente associados à evaporação (fluxo de vapor isotérmico) a partir de uma camada de solo. O calor latente associado é proporcional ao gradiente térmico nos poros (Ghildayl e Tripathi, 1987) e tem alguma expressão relativa nos perfis em fase de secagem (de Vries, 1975; Buchan, 1982; Hillel, 1998) e com baixos teores médios de humidade (Monteith e Unsworth, 1990).

### **Variação da temperatura na camada superficial do solo**

A variação diária e anual da temperatura à superfície acompanha as variações da irradiância solar, pelo que tem um carácter periódico. A condutividade e a difusividade térmicas dos diferentes materiais que compõem o solo, por serem geralmente baixas, limitam o alcance da onda térmica em profundidade e retardam a sua propagação (Baver *et al.*, 1972; Rosemberg *et al.*, 1983; Hillel, 1998). Por isso, a amplitude térmica decresce com a profundidade e os extremos térmicos ocorrem com atraso crescente. Logo, a camada superficial é a que apresenta maiores variações de energia armazenada e, conseqüentemente, de temperatura. Estas variações térmicas são ainda mais extremadas por variações bruscas de humidade (Cochrane e Baker, 1985) devido aos diferentes valores das difusividades térmicas em solos secos ou quase secos (cerca de  $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ) e em solos com teores de humidade superiores a  $0,15\text{-}0,20 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , onde as difusividades são superiores a  $4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  (Baver *et al.*, 1972; de Vries, 1975).

Na maioria dos solos minerais, a amplitude diária da temperatura do solo a 50 cm de profundidade é menor que 1% da amplitude verificada à superfície (Horton e Wierenga, 1983). A espessura da maior parte dos solos agrícolas excede as profundidades onde ainda há variação da temperatura ao longo do ciclo diário, mas é menor que as correspondentes profundidades para o ciclo anual. Seguindo um critério baseado na magnitude das amplitudes térmicas dos solos, é possível subdividir o sistema-solo em dois sub-sistemas para o ciclo diário: no primeiro, mais superficial, a temperatura varia e a sua variação diminui com a profundidade; no segundo, os

gradientes térmicos são nulos. Por estas razões, as sementes e as raízes das plântulas durante a fase de estabelecimento, sobretudo para as culturas primaveris, podem suportar variações térmicas apreciáveis ao longo do dia e o gradiente de temperatura ao longo do sistema radical pode ser muito elevado num dado momento do dia, sobretudo se o teor de humidade do solo for baixo.

### **Soluções da equação de calor**

A integração da equação (1.7) é difícil e carece de condições-fronteira bem definidas. As soluções da equação de condução de calor incluem simulações numéricas e soluções analíticas. As soluções numéricas transformam a equação diferencial de condução de calor num conjunto de equações algébricas, tantas quanto as camadas em que o perfil é dividido (Carlaw e Jaeger, 1967; Hanks *et al.*, 1971; Maharer, 1979; Meikle e Treadway, 1979; Schieldge *et al.*, 1982; Stathers *et al.*, 1985; Sui *et al.*, 1992; Hares e Novak, 1992a,b; Wu *et al.*, 1995); simulam satisfatoriamente as variações térmicas em solos não uniformes, com condições fronteira e condições iniciais irregulares (Buchan, 1982), mas requerem um número considerável de medições e cálculos. As soluções analíticas requerem um conjunto restrito de medições e assentam em pressupostos simplificados como a uniformidade do perfil ou a variação analítica das propriedades térmicas com a profundidade, e em condições iniciais e condições fronteira modeladas analiticamente (Lettau, 1954; Buchan, 1982). Através da integração em ordem ao tempo, as soluções analíticas transformam a equação (1.7) numa equação diferencial ordinária apenas com coordenadas espaciais. As soluções analíticas incluem variações não periódicas (transformações de Laplace), usadas, por exemplo, por van Wijk (1963), Bellman *et al.* (1964) ou Asrar e Kanemasu (1983) e variações periódicas (transformações de Fourier).

As soluções periódicas para a variação térmica do solo foram usadas, entre outros autores, por Carson (1963), Krishnan e Kushwaha (1972), Ghuman e Lal (1982), Horton e Wierenga (1983), Gupta *et al.*, (1984), Hayhoe *et al.* (1987), Camillo (1989), Figueiredo e Gonçalves (1991). As soluções periódicas não são facilmente aplicáveis a um perfil real porque as propriedades térmicas de um solo variam em profundidade, nomeadamente a difusividade térmica (Lettau, 1954; van Wijk, 1963). Alguns autores usaram soluções periódicas para estimar a difusividade térmica do solo a partir da teoria da condução do calor aplicada a solos homogêneos (Carson, 1963; Wierenga *et al.* (1969), Horton *et al.*, 1983; Verhoef *et al.*, 1996); outros usaram-nas para estimar a difusividade térmica (Nassar e Horton, 1989; Nassar e Horton, 1990; Massman, 1993;

Passerat de Silvens *et al.*, 1996) a partir da teoria de condução de calor adaptada a solos não homogêneos (Lettau, 1954), com métodos de cálculo que, de uma forma geral, são demasiado complexos para serem facilmente aplicáveis sob o ponto de vista agronómico. Contudo, as soluções periódicas têm a grande vantagem de serem mecanisticamente representativas dos fenómenos físicos responsáveis pelo aquecimento e arrefecimento diário e anual do solo (equação 1.3), isto é, procuram transcrever o carácter periódico da variação da radiação líquida à superfície do solo, ao longo de um ciclo diário ou de um ciclo anual, de variação da temperatura do solo.

### 1.4.3. Balanço hídrico e humidade de solo

A água é um constituinte do solo e o seu teor é complementar do teor de ar no espaço poroso do solo, influenciando deste modo o seu arejamento (Hillel, 1998). Influencia as variações térmicas nos solos devido ao seu elevado calor específico ( $4,18 \text{ J g}^{-1}\text{°C}^{-1}$ ) e à sua baixa difusividade ( $0,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ), se comparada com a do ar ( $20,5 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) ou com as dos constituintes minerais sólidos ( $1,2 \text{ a } 4,18 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ): solos húmidos uniformizam o perfil térmico dos solos, diminuindo as amplitudes térmicas, enquanto que em solos secos o gradiente vertical de temperatura é maior; por outro lado, o atraso na propagação da onda térmica em profundidade é menor em solos mais húmidos que em solos mais secos. Além disso, o movimento de água líquida ou no estado vapor transfere energia por convecção, em quantidades por vezes importantes em solos não saturados (de Vries, 1975). Quando o teor de água diminui rapidamente, contribui para a formação de crostas à superfície (Dasberg *et al.*, 1966), sobretudo em solos com estruturas pouco estáveis.

As variações do teor de água num solo (balanço hídrico) dependem, em larga medida, das diferenças entre a precipitação ocorrida e a água evaporada à superfície assim como das propriedades do solo que governam o movimento de água no seu interior (capacidade de retenção do solo para a água, condutividade hidráulica,...).

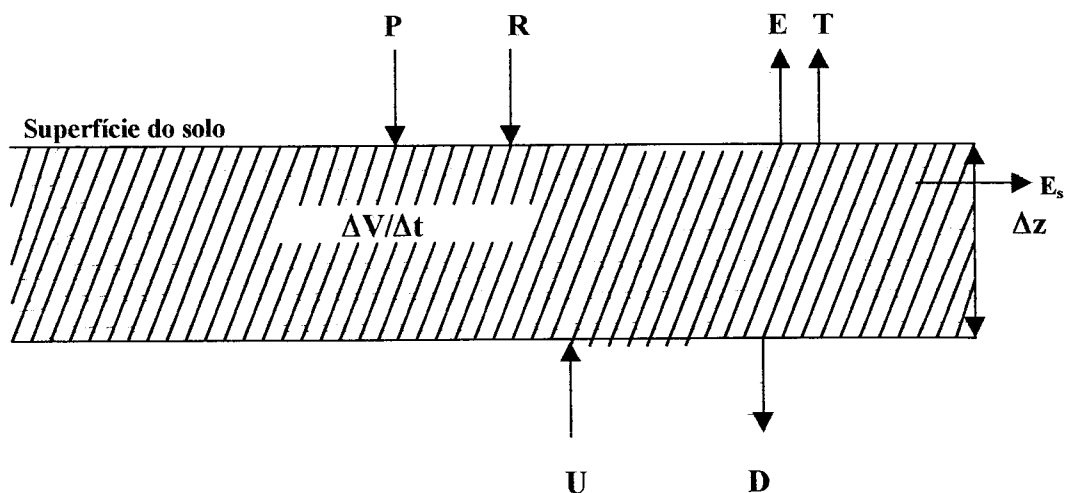
### Balanço hídrico e humidade do solo

Um balanço hídrico baseia-se na *lei da conservação da massa*. O balanço hídrico da camada superficial de um solo, durante um dado período de tempo ( $\Delta t$ ) pode ser descrito na forma (Hillel, 1998):

$$\Delta S + \Delta V = (P + R + U) - (E_s + D + E + T) \quad (\text{mm}) \quad (1.9)$$

onde, por unidade de área e durante  $\Delta t$ ,  $\Delta S$  é a variação do armazenamento de água na camada,  $\Delta V$  o incremento de água incorporado na biomassa,  $P$  a precipitação,  $R$  a rega,  $U$  é o ganho hídrico por ascensão capilar,  $E_s$  é o escoamento,  $D$  a drenagem,  $E$  a evaporação de água directamente da superfície e  $T$  é a transpiração das plantas (Fig. 1.3). Na ausência de rega, o aumento da humidade do solo é feito a expensas da precipitação. A maior proporção das perdas refere-se aos termos  $E$  e  $T$  ou, conjuntamente, ao termo  $ET$  (Evapotranspiração) que depende, em primeiro lugar, da radiação solar e do défice de saturação em vapor de água do ar em solos sem limitações hídricas. A variação do armazenamento de água no solo pode ser obtida pela integração ao longo do tempo ( $t$ ) e do perfil, entre a superfície e a profundidade  $z$ , da taxa de variação do teor volumétrico de água do solo ( $\theta$ ) a cada profundidade:

$$\Delta S = \int_0^z \int_{t_1}^{t_2} (\partial\theta / \partial t) dz dt \quad (\text{mm}) \quad (1.10)$$



**Fig. 1.3. Balanço hídrico de uma camada superficial de solo ( $\Delta z$ ), durante o dia. O significado dos símbolos está explicado no texto.**

Após uma chuvada, o humedecimento dos solos é rápido mas a secagem posterior é lenta. Por isso, os perfis em fase de secagem duram mais tempo que os perfis em fase de humedecimento, sendo esta diferença mais acentuada quando a precipitação é pouco frequente como acontece nas regiões mediterrâneas. O processo de secagem em solos de textura argilosa é mais lento que em solos de textura arenosa (Richards e

March, 1961), porque aqueles solos armazenam maior quantidade de água e têm mais capacidade de retenção para a água que os solos com textura mais grosseira.

De uma forma geral, as plantas não utilizam água retida no solo sob tensões superiores a 15 atm ( $\approx$  Coeficiente de Emurchecimento) nem inferiores a 1/3 atm ( $\approx$  Capacidade de Campo). A Capacidade Utilizável é a diferença entre as percentagens de água à Capacidade de campo e ao Coeficiente de Emurchecimento, e varia com o tipo de solo: é maior para texturas mais finas, atingindo nalguns solos cerca de 15% (peso em peso), enquanto que para texturas mais grosseiras (francas e arenosas) não ultrapassam 10% (peso em peso) (Donahue, 1987; Brady, 1990).

#### **Variação do teor de humidade na camada superficial do solo**

Na ausência de precipitação, a variação diária do teor de humidade na camada superficial do solo acompanha a respectiva variação diária da taxa de evaporação da água do solo (Jackson, 1973): é geralmente maior entre o nascer e o pôr do solo que no período nocturno, ao longo do qual a camada superficial pode mesmo humedecer, sobretudo devido ao fluxo capilar ascendente. Em solos de textura grosseira a evaporação é mais rápida que em solos de textura mais fina (Hillel, 1998). A amplitude da variação diária de humidade diminui com a profundidade. Nas regiões mediterrâneas, a amplitude das variações do teor de humidade do solo na camada superficial pode ser considerável durante o estabelecimento das culturas, sobretudo das primaveris, devido a taxas de evaporação que, nesta altura do ano, atingem valores frequentemente superiores a 6-7 mm num dia.

### **1.5. Objectivos gerais do trabalho**

Em regiões mediterrâneas semi-áridas, são de esperar diferentes combinações de água e temperatura do solo nas épocas normais de sementeira das culturas outono-invernais ou primaveris, com diferentes níveis de sucesso no estabelecimento das culturas. A maior parte dos estudos relativos à emergência de culturas tem sido conduzida em ambiente controlado e sob temperatura constante: em estufas (Wanjura e Minton, 1981; Leong e Ong, 1983; Mohamed *et al.*, 1988b; Carberry e Campbell, 1989), em câmaras de crescimento (Herbel e Sosebee, 1969; Hatfield e Egli, 1974; Hopper *et al.*, 1979; Stamp, 1987; Cao e Moss, 1989; Lafond e Fowler, 1989; Mosjidis, 1990; Brar e Stewart, 1994; Castañeda *et al.*, 1996; Vigil *et al.*, 1997) ou em placas de gradiente térmico (Halldal e French, 1958; Barbour e Racine, 1967; Cole, 1972; Clegg

e Eastin, 1978; Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a,b; Webb *et al.*, 1987; Mohamed *et al.*, 1988a; Abreu e Clark, 1993). Ao invés, escasseiam estudos sobre a emergência das culturas em pleno campo, onde a evolução das perturbações meteorológicas ao longo do dia se traduz em flutuações térmicas e hídricas na camada superficial do solo, dificilmente simuláveis em ambiente controlado; alguns exemplos são os trabalhos de Wanjura *et al.* (1969) sobre o algodão, de Alessi e Power (1971) sobre o milho, de Kanemasu *et al.* (1975) sobre o sorgo, de Muendel (1986) sobre a soja, de Del Pozo *et al.* (1987) e Gan *et al.* (1992) sobre o trigo.

Além disso, faltam estudos que delimitem as condições de aplicação da teoria de condução de calor para meios semi-infinitos homogêneos a solos agrícolas a partir do uso de soluções periódicas, nomeadamente na camada mais superficial em contacto directo com as sementes e com a radícula durante o estabelecimento das culturas, em função do conhecimento prévio das propriedades do solo. Algumas das soluções periódicas para as variações de temperatura em solos agrícolas descritas na literatura (Krishman e Kushwaha, 1972; Gupta *et al.*, 1984; Massman, 1992) referem-se a condições específicas, mais ou menos localizadas (diferentes tipos de cobertura do solo, diferentes técnicas culturais, condições climáticas diferentes das mediterrâneas,...) e não têm em conta factores como o teor de água no solo, o comprimento do dia ou o grau de nebulosidade.

Este trabalho pretende:

a) Estudar o efeito combinado da água e da temperatura no estabelecimento de culturas representativas das condições agrometeorológicas mediterrâneas, oleaginosas e proteoginosas em cuja produção Portugal é deficitário (ervilha, fava, tremocilha, grão, girassol, milho e sorgo). Este estudo compreende o efeito da temperatura na germinação (em ambiente controlado) e o efeito da temperatura e humidade do solo na emergência das plântulas e na produção das primeiras folhas (em pleno campo). Na análise das diferentes fases que constituem o estabelecimento das culturas será utilizado o conceito de tempo térmico.

b) Estudar o comportamento térmico de dois solos com características mineralógicas e texturais diferentes e cuja ocupação é fundamentalmente agrícola. Este estudo baseia-se na simulação das variações térmicas diária e anual a várias profundidades nos dois solos, em várias situações hídricas e em diferentes alturas do ano e graus de nebulosidade, através do desenvolvimento de séries de Fourier (Análise Harmónica) e, com base nos resultados obtidos por esta análise, na discussão da

influência da heterogeneidade do perfil no amortecimento em profundidade da onda térmica.

c) Avaliar a influência do tipo de solo na emergência e no aparecimento de folhas das culturas referidas a partir dos resultados obtidos nos dois solos referidos na alínea anterior.

d) Contribuir para um melhor conhecimento global da influência das condições agrometeorológicas mediterrâneas no comportamento das culturas.

e) Contribuir para um maior conhecimento global dos regimes térmicos dos solos em condições mediterrâneas.

O cumprimento destes objectivos deverá permitir prever a duração do estabelecimento de uma cultura em função das suas exigências térmicas e hídricas, da simulação do comportamento térmico do solo e do conhecimento da variação do teor de água no solo. Além disso, o conhecimento do comportamento térmico e hídrico das culturas poderá contribuir para a resolução de aspectos práticos como a escolha das datas de sementeira, a escolha das técnicas de sementeira mais apropriadas (preparação do terreno, densidade de sementeira...), etc....





## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Caracterização dos locais experimentais**

#### **2.1.1. Localização geográfica**

As experiências sobre a influência da temperatura no comportamento germinativo de diversas culturas decorreram no Laboratório de Agrometeorologia do Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. As experiências de campo sobre o desenvolvimento das plantas durante a fase de estabelecimento e sobre o comportamento térmico do solo decorreram em dois locais A e B (Fig. 2.1).

O local A (38°30'N, 7°45'30''W e 210 m de altitude) corresponde a uma parcela de terreno do Monte dos Álamos (Concelho de Évora), pertencente à Fundação Eugénio de Almeida, localizada ao lado da Estrada Nacional nº256 e próxima do cruzamento desta com o IP2. A zona é plana ou levemente ondulada (o declive é inferior a 5%) e a ocupação do solo é essencialmente agrícola (arvenses de sequeiro).

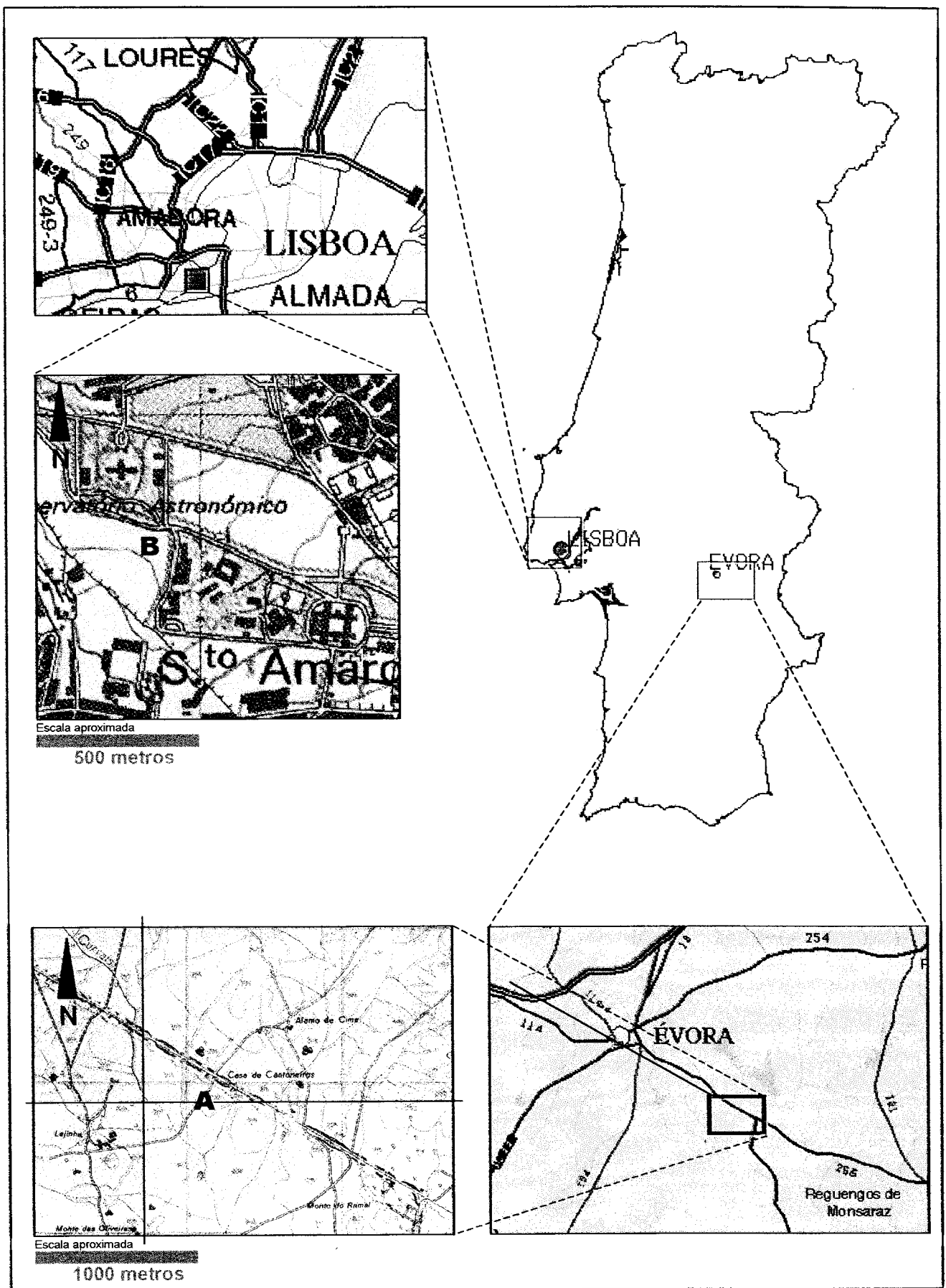
O local B (38°42'N, 9°11'W e 60 m de altitude) corresponde a uma parcela de terreno na Tapada da Ajuda (Concelho de Lisboa) pertencente ao Instituto Superior de Agronomia (I.S.A.), localizada na Terra do Almotive, a Sul do Observatório Astronómico. O terreno, exposto a sul, tem um declive entre 10% e 20% e nele foi cultivada a vinha durante os últimos anos.

Estes locais foram escolhidos porque correspondem a diferentes tipos de solos e porque apresentam diferentes características climáticas. A disponibilidade em usar estes terrenos para as experiências assim como a facilidade de acesso a cada um deles também justificaram a sua selecção.

#### **2.1.2. Caracterização climática**

A caracterização climática do local A foi feita com base nos dados das Normais Climatológicas do período 1951/80 para a Estação Meteorológica de Évora/Mitra (38°32'N, 8°01'W e 200 m de altitude), situada a cerca de 25 Km do local das experiências. Para o local B foram utilizadas as Normais Climatológicas de 1951/80, da Estação Lisboa/Tapada da Ajuda, situada a cerca de 100 metros do campo experimental.

Para os dois locais, a Fig. 2.2 mostra o curso das temperaturas mínimas, médias e máximas ao longo do ano médio e a Fig. 2.3 mostra o nº médio de dias em que a temperatura do ar excede 25°C ou é inferior a 0°C. Em ambos os locais, Julho, Agosto e



**Fig. 2.1. Localização das experiências: Local A (Monte dos Álamos, Concelho de Évora); Local B (Tapada da Ajuda, Concelho de Lisboa)**

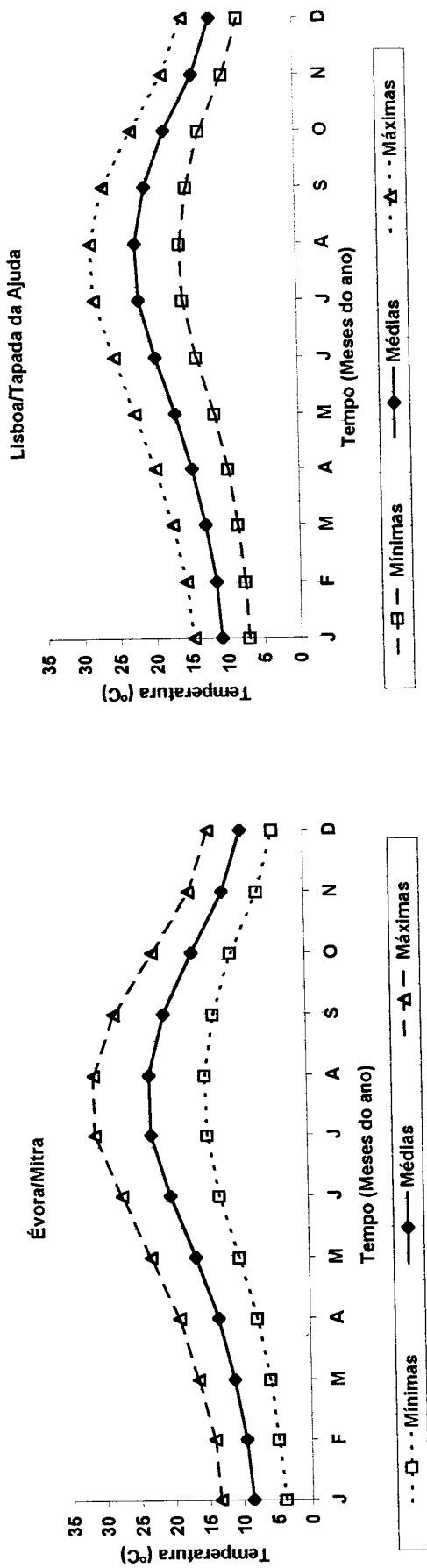


Fig. 2.2. Valores médios mensais das temperaturas máxima, mínima e média do ar no período 1951-1980, em Évora/Mitra e em Lisboa/Tapada da Ajuda

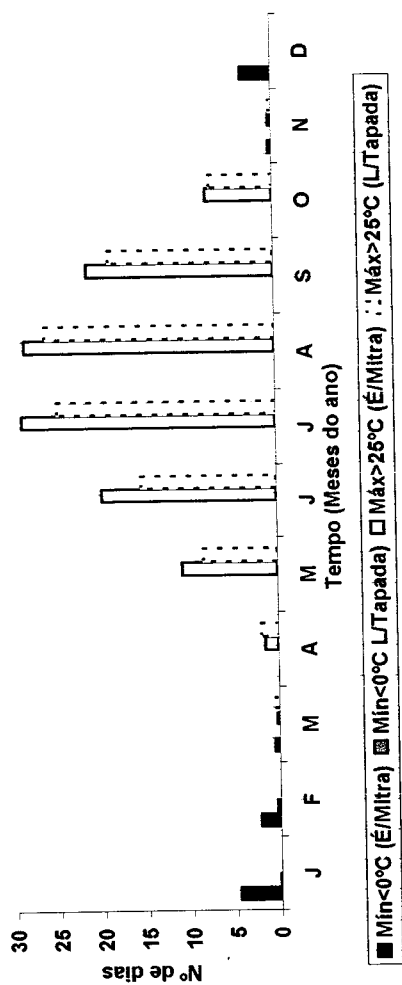


Fig. 2.3. Nº médio mensal de dias em que foram registadas temperaturas do ar inferiores a 0°C ou superiores a 25°C, em Évora/Mitra ou em Lisboa/Tapada da Ajuda.

Setembro são os meses mais quentes enquanto Janeiro, Fevereiro e Dezembro são os mais frios. As temperaturas médias anuais para Évora/Mitra e para Lisboa/Tapada da Ajuda são, respectivamente, de 15,4°C e de 16,4°C, mas as amplitudes térmicas são maiores em Évora que na Tapada da Ajuda. No primeiro local as temperaturas médias mensais variam entre 8,6°C (Janeiro) e 23,1°C (Agosto) e, no segundo, entre 11,0°C (Janeiro) e 22,3°C (Agosto). As temperaturas máximas mensais variam entre 13,4°C e 31,3°C em Évora e entre 14,9°C e 28,1°C em Lisboa; as mínimas mensais variam entre 3,8°C e 14,9°C em Évora e entre 7,1°C e 16,1°C em Lisboa. Em Évora/Mitra a temperatura máxima do ar excede 25°C em 119 dias e a mínima do ar é negativa em 11 dias enquanto que em Lisboa os valores correspondentes foram de 103 dias e cerca de meio dia (0,4 dias). No 1º local as temperaturas mínimas negativas foram registadas entre Novembro e Março enquanto que no segundo local apenas o foram em Janeiro e Fevereiro; em ambos os locais, as temperaturas máximas superiores a 25°C foram registadas entre Março e Novembro, e em mais de 10 dias por mês entre Maio e Setembro no 1º local e entre Junho e Setembro no 2º local.

A precipitação média mensal e a evapotranspiração potencial (ETP) calculada pelo Método de Penman (FAO, 1979), para Évora/Mitra e Lisboa/Tapada são apresentadas na Fig. 2.4. A precipitação média anual é de cerca de 665 mm em Évora/Mitra e de 731 mm na Tapada da Ajuda. A precipitação concentra-se nos meses mais frios enquanto que a estação mais quente corresponde à estação mais seca. Em ambos os locais, Janeiro é o mês mais chuvoso (98 mm em Évora e 112 mm em Lisboa) enquanto que em Julho e Agosto a precipitação média não excede 6 mm. Tanto em Évora como em Lisboa, a ETP excede a precipitação entre Abril e Outubro (meses secos); do ponto de vista agrónomico, o período seco -  $R_{\text{mensal}} < 0,5ETP_{\text{mensal}}$  (Barry e Charley, 1976) - ocorre entre Maio e Setembro no 1º local e entre Abril e Setembro no 2º local.

A Fig. 2.5 mostra a evolução do défice de saturação de humidade do ar ao longo do ano médio para Évora/Mitra e para Lisboa/Tapada da Ajuda. Os valores foram estimados a partir das temperaturas e humidades relativas médias mensais. No 1º local o défice de saturação do ar (expresso em pressão de vapor de água) varia entre 221 Pa (Dezembro) e 1554 Pa (Agosto) e no 2º local varia entre 250 Pa (Janeiro) e 1076 Pa (Agosto). Entre Outubro e Abril, os valores do défice de saturação são semelhantes nos dois locais, mas entre Maio e Setembro os valores são marcadamente superiores em Évora/Mitra.

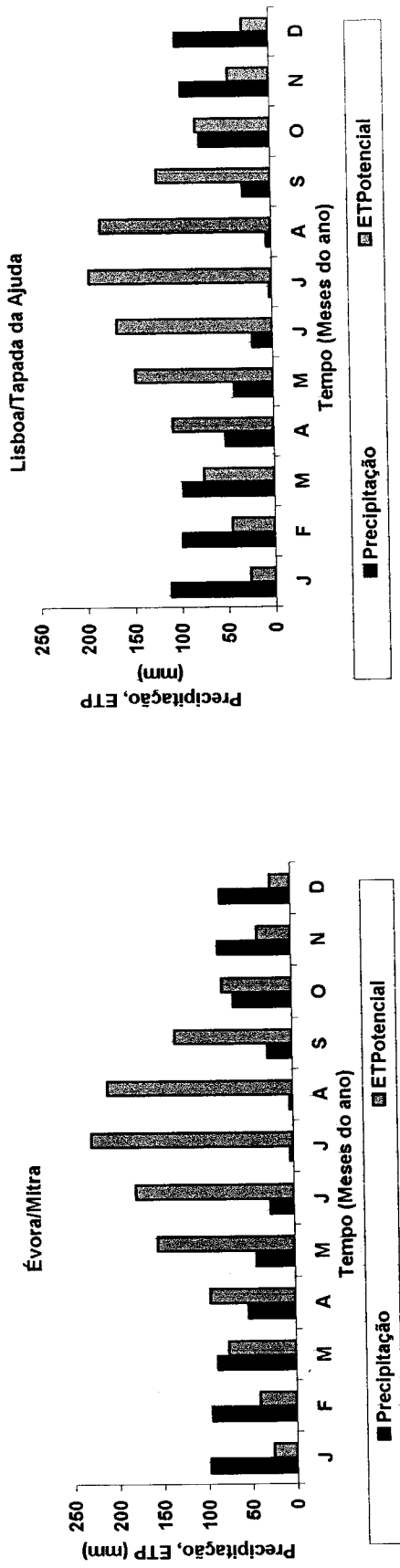


Fig. 2.4. Precipitação média mensal (Normais Climatológicas 1951-1981) e evapotranspiração potencial média mensal (método de Penman) em Évora/Mitra e Lisboa/Tapada da Ajuda

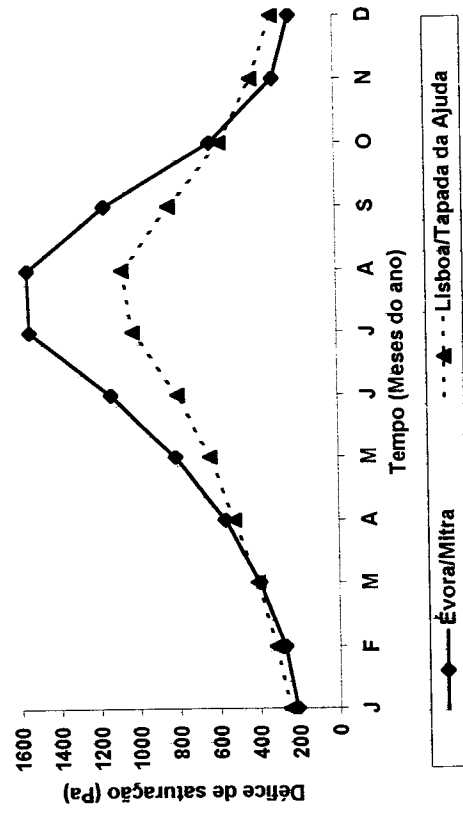


Fig. 2.5. Déficits de Saturação do ar (em Pa) médios mensais, estimados para o período 1951 - 1980

Ambos os locais possuem um clima temperado do tipo *Csa* da classificação de Köppen (mesotérmico húmido de verões quentes e secos). Segundo a Classificação Climática de Thornthwaite o clima do Local A é do tipo  $C_1, B', s_2, a'$  (Sub-húmido seco, Mesotérmico, grande excesso de água no Inverno e pequena concentração da eficiência térmica na estação quente); o Local B possui um clima do tipo  $C_2, B', s_2, a'$  (Sub-húmido chuvoso, Mesotérmico, grande deficiência de água no Verão e pequena concentração da eficiência térmica na estação quente).

Em síntese, em Évora/Mitra as amplitudes térmicas são maiores que em Lisboa/Tapada da Ajuda, e as condições de secura do ar e do solo no semestre quente são muito mais evidentes.

### 2.1.3. Solos

Para a caracterização dos solos nos locais A (Solo A) e B (Solo B) abriram-se perfis no campo. *In situ* foram identificados horizontes e classificadas a textura e a macroestrutura de campo de cada horizonte (Quadro 2.1). Nos dois solos desenvolvem-se horizontes superficiais *A* visivelmente perturbados por mobilizações ou outras práticas agrícolas (*Ap*), cada um subdividido em duas sub-camadas, *Ap1* e *Ap2*, por evidenciarem características morfológicas diferentes. Sob os horizontes *Ap2* desenvolve-se um horizonte de transição *BC* no solo do local A e um horizonte *Bw*, de alteração *in situ*, no solo do local B. A textura de campo não diferiu significativamente ao longo do perfil de cada solo: no horizonte superficial do solo A é franco-arenosa e no do solo B é franco-argilo-arenosa; nos horizontes subsuperficiais o teor de argila parece aumentar ligeiramente. A forma da macroestrutura de campo é anisoforme nos horizontes *Ap* (*Ap1* e *Ap2*) e prismática no horizontes *BC* (solo A) e anisoforme e prismática no horizonte *Bw* (solo B); a classe é média e/ou grosseira em ambos os solos; o grau de agregação é forte no solo A e fraco no solo B.

Foram recolhidas amostras de cada horizonte e, em laboratório, procedeu-se à sua análise para determinar as constantes de humidade correspondentes a 15 atmosferas ( $pF \approx 4,17$ ) e a 1/3 atmosferas ( $pF \approx 2,54$ ), medidas aproximadas da capacidade de campo e do coeficiente de emurchecimento, respectivamente (Quadro 2.2), assim como a textura, a massa volúmica aparente e a matéria orgânica (Quadro 2.3). As constantes de humidade foram determinadas pelos métodos da membrana de pressão e da placa de pressão, respectivamente, e foram expressas em volume de água presente num volume

unitário de solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); também foram expressas em % de massa de água existente numa massa de solo seca até peso constante, devido à natureza expansível dos minerais

**Quadro 2.1. Características dos solos nos locais A (Évora/Mitra) e B (Lisboa/Tapada da Ajuda): textura (classe) e macroestrutura (forma e tipo, classe e grau) de campo**

Solo	Horizonte	Profundidade (cm)	Textura de campo	Macroestrutura de campo
Local A	<i>Ap1</i>	0-20	Franco-arenoso	Anisoforme subanguloso, média a grosseira, forte
	<i>Ap2</i>	20-36	Franco-argilo-arenoso	Anisoforme subanguloso, média a grosseira, forte
	<i>BC</i>	36-64	Franco-argilo arenoso	Prismática, fina a média, média a forte
Local B	<i>Ap1</i>	0-15	Franco-argilo-arenoso	Anisoforme anguloso e subanguloso, média, fraco
	<i>Ap2</i>	15-30	Franco-argiloso	Anisoforme anguloso, média, fraco
	<i>Bw</i>	30-45	Franco-argiloso	Anisorforme anguloso e prismático, médio, fraco

de argila que constituem parte significativa da fracção mineral do solo em Lisboa/Tapada da Ajuda. Os teores de humidade correspondentes a 15 atm e a 1/3 atm nos horizontes *Ap* são maiores no solo B que no solo A e, de uma forma geral, aumentam ao longo dos perfis. Para 15 atm, aumentaram no solo A entre  $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e  $0,28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  enquanto que no solo B se mantiveram mais ou menos constantes; para 1/3 atm, aumentaram entre  $0,23 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e  $0,50 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  no solo A e entre  $0,42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e  $0,44 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  no solo B.

A textura foi determinada por análise mecânica ou granulométrica. Os resultados confirmam os obtidos *in situ*: a textura é mais fina no solo B que no solo A e não varia significativamente ao longo do perfil. A percentagem de argila no solo A é cerca de metade da obtida no solo B (cerca de 17% no solo A e mais de 33% no solo B). A percentagem de elementos grosseiros é maior no solo A que no solo B, aumenta em profundidade no solo A (entre 15,6% em *Ap1* e 36,4% em *BC*) e permanece mais ou menos constante ao longo do perfil do solo B.



**Quadro 2.2. Teores de humidade no solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) correspondentes às sucções de 15 atmosferas ( $pF \approx 4,17$ ) e 1/3 atmosferas ( $pF \approx 2,54$ ) para cada horizonte dos solos nos locais A (Évora/Mitra) e B (Lisboa/Tapada da Ajuda). Entre parênteses mostram-se os teores de humidade em % de massa de água/massa de solo.**

Solo	Horizonte	Profundidade (cm)	Teor de humidade [ $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ (%)]	
			a 15 atm	a 1/3 atm
Local A	<i>Ap1</i>	0-20	0,10 (7,1)	0,23 (15,5)
	<i>Ap2</i>	20-36	0,23 (13,8)	0,35 (21,0)
	<i>BC</i>	36-64	0,28 (15,7)	0,50 (28,1)
Local B	<i>Ap1</i>	0-15	0,26 (22,0)	0,42 (34,4)
	<i>Ap2</i>	15-30	0,35 (21,4)	0,43 (32,3)
	<i>Bw</i>	30-45	0,27 (21,0)	0,44 (35,0)

A massa volúmica aparente é a razão entre o peso de uma amostra de solo seca a 105°C e o volume de um cilindro usado na recolha de amostras de solo não perturbadas (Método dos Cilindros). A massa volúmica aparente (total) é maior no solo A que no solo B: no primeiro varia entre 1,48 (*Ap1*) e 1,78 (*BC*) enquanto no segundo aumenta entre *Ap1* (1,22) e *Ap2* (1,33) e volta a diminuir em *Bw* (1,27). Para uma densidade real de 2,65, no solo A a porosidade diminuiu cerca de 16% entre *Ap1* (0 a 20 cm) e *Ap2* (20 a 36 cm) e cerca de 25% entre *Ap1* e *BC* (36 a 64 cm) enquanto que no solo B diminuiu cerca de 8% entre *Ap1* (0 a 15 cm) e *Ap2* (15 a 30 cm) e aumentou cerca de 5% entre *Ap2* e *Bw* (30 a 45 cm).

A matéria orgânica foi determinada através da medição do  $\text{CO}_2$  libertado pela combustão de uma amostra de 1 gr de solo a 1200°C (Ströhline). O teor de matéria orgânica é de cerca de 1% no solo A e não ultrapassa 3% no solo B.

Segundo a Carta de Solos do CRNOA, o Local A (Évora) situa-se numa mancha correspondente a um complexo de Solos Mediterrâneos Pardos, Pm+Pmg. As características apresentadas pela análise dos perfis abertos permitem classifica-lo como Solo Mediterrânico Pardo Normal (Pmg). Segundo a Carta de Solos da FAO/UNESCO

Quadro 2.3. Textura, massa volúmica aparente e teor em matéria orgânica para cada horizonte dos solos nos locais A (Évora/Mitra) e B (Lisboa/Tapada da Ajuda).

Solo	Horizonte	Profundidade (cm)	Textura				Elementos Grosseiros (%)	Massa Volúmica Aparente (ton/m <sup>3</sup> )			Matéria Orgânica (%)
			Areia Grossa (%)	Areia Fina (%)	Limo (%)	Argila (%)					
Local A	<i>Ap1</i>	0-20	37,0	37,6	8,6	15,6±0,9	1,48±0,15	16,8	1,67±0,03	1,04±0,06	
	<i>Ap2</i>	20-36	41,9	32,4	8,4	17,6±3,99	1,67±0,03	17,3	1,67±0,03	0,92±0,11	
	<i>BC</i>	36-64	40,4	34,1	8,4	36,4±4,32	1,78±0,02	17,1	1,78±0,02	0,98±0,09	
Local B	<i>Ap1</i>	0-15	7,7	38,5	20,3	8,7±2,51	1,22±0,02	33,5	1,22±0,02	2,7±0,17	
	<i>Ap2</i>	15-30	7,7	38,5	18,5	7,1±2,13	1,33±0,03	35,3	1,33±0,03	2,47±0,32	
	<i>Bw</i>	30-45	7,2	37,3	19,6	8,4±2,10	1,27±0,05	35,9	1,27±0,05	2,33±0,47	

(1988), este solo pode ser classificado como Luvissole Háplico (LVv). O solo no Local B (Tapada da Ajuda) é classificado como Barro Castanho-Avermelhado Não Calcário, sobre tufos (formações piroclásticas) (Cb) segundo a Classificação Portuguesa. Segundo a Carta de Solos da FAO/UNESCO (1988) pode ser classificado como um Vertissolo Êutrico (Vre).

Em síntese, os resultados mostram que as características de ambos os perfis denotam forte intervenção humana. Além disso, as características do perfil do solo Cb são também consequência de diferentes usos a que foi sujeito, nomeadamente do tipo de mobilização associada ao cultivo da vinha, além de serem fortemente influenciadas pelo fendilhamento, próprio deste tipo de solos (propriedades vérticas). Por isso, a heterogeneidade que este perfil mostra, torna-o aparentemente atípico relativamente ao que seria de esperar pela descrição-padrão deste tipo de solos.

## **2.2. Medições físicas durante o período experimental (experiências de campo)**

Para o estudo do comportamento térmico dos solos Pmg e Cb e do comportamento de diversas culturas na fase de estabelecimento (germinação, emergência e produção inicial de folhas) foram medidos os perfis de temperatura e de humidade do solo Pmg (Évora) e no solo Cb (Lisboa), entre Novembro de 1993 e Novembro de 1996. No local A (Évora) foram também medidos, junto ao campo experimental, os seguintes elementos meteorológicos: precipitação, velocidade do vento, temperatura do ar e temperatura do termómetro molhado. No local B, foram utilizados dados de insolação, temperatura, humidade do ar e precipitação da estação meteorológica convencional Lisboa/Tapada da Ajuda.

Os sensores de medição da temperatura do solo e dos vários elementos meteorológicos foram ligados a dois registadores automáticos de dados – modelo CR10 da *Campbell Scientific, Inc.* -, um instalado em cada local de ensaio. Devido ao elevado número de sensores utilizados, foram ligados a cada CR10 um multiplicador de canais (AM416 no Local A e o AM32 no Local B). Os valores referentes a qualquer elemento meteorológico foram lidos com o intervalo de 1 minuto e registados os respectivos valores horários e diários, nalguns casos com os valores máximos e mínimos diários. O Quadro 2.4 resume as variáveis medidas, os períodos de medição, o número de sensores utilizados para cada elemento e o tipo de valores registados (médios ou acumulados).

**E l e m e n t o s   m e d i d o s**

Período de medição	Temperatura do solo		Precipitação		Vento		Temperatura do ar		Temperatura do ter. molhado		
	N	V.h	V.d.	V.h	V.d.	V.h	V.d.	V.h	V.d.	V.h	V.d.
(4NOV93 a 16OUT94)	7	Md	Md/M/m	-	-	-	-	-	-	-	-
(16OUT94 a 5ABR95)-	7	Md	Md/M/m	T	T	Md	Md	Md/M/m	Md	Md	Md
(5ABR95 a 14MAI95)	10	Md	Md/M/m	-	-	Md	Md	Md/M/m	Md	Md	Md
(14MAI95 a 22JUN95)	10	Md	Md/M/m	T	T	Md	Md	Md/M/m	Md	Md	Md
(22JUN95 a 27ABR96)	10	Md	Md/M/m	T	T	Md	Md	Md/M/m	Md	Md	Md
(a partir de 27Abr96)	11	Md	Md/M/m	T	T	Md	Md	Md/M/m	Md	Md	Md

(a)

**Quadro 2.4 – Elementos medidos e configuração dos registos para os elementos medidos em (a) Évora e (b) Lisboa/Tapada**

**Legenda:** N - nº de sensores; V.h. – Valores horários; V.d. – Valores diários; Md – Valores médios; M - Valores máximos; m – valores mínimos; T – Valores acumulados

**Temperatura do solo**

Período de medição	Temperatura do solo	
	N	V.h
(26NOV93 a 5OUT94)	4	Md
(5OUT94 a 2Mar95)	13	Md
(a partir de 2Mar95)	13	Md

(b)

### 2.2.1. Temperatura do solo

Em cada um dos solos, Pmg e Cb, a temperatura do solo foi medida em dois perfis com termopares de Cobre-Constantan (Tipo T), instalados à superfície e às profundidades de 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 16 cm e 32 cm. Os dois termopares a cada nível (um de cada perfil) foram ligados em paralelo a uma interface instalada numa caixa de junção ligada ao CR10 por fios de cobre, e, por isso, a temperatura a cada nível é a média dos dois perfis ao nível respectivo (Fig. 2.6). Termopares do mesmo tipo mediram a temperatura das uniões na caixa de junção. A temperatura de referência instalada no CR10 foi medida por um termistor (10TCRT da *Campbell Scientific, Inc.*). A extremidade de medição de todos os termopares foi protegida por uma manga em borracha, um bom isolador eléctrico que permite evitar a introdução de sinais eléctricos espúrios nos circuitos de medição (Rosemberg *et al.*, 1983) e, além disso, protege a soldadura de corrosão acelerada.

Os termopares são sensores de precisão aceitável, com resposta térmica rápida se a massa térmica for pequena, adaptáveis a uma gama apreciável de temperaturas, têm um custo relativamente baixo e são compatíveis com a maior parte dos sistemas de registo e medição ( Fritschen e Gay, 1979; Taylor e Jackson, 1986; Ghildyal e Tripathi, 1987). Quando convenientemente instalados são uma opção viável para muitas experiências em pleno campo (Ham e Senock, 1992). Tendo em conta os erros máximos referentes à medição da temperatura de referência ( $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ ), ao tipo de termopar ( $\pm 0,225^{\circ}\text{C}$ ), à medição da voltagem ( $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ ) e sua conversão em unidades de temperatura ( $\pm 0,001^{\circ}\text{C}$ ), o erro total máximo será inferior a  $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$  (Campbell, 1990).

### 2.2. 2. Humidade do solo

O teor de humidade do solo foi determinado pelo método gravimétrico, com secagem de amostra de solo em estufa a uma temperatura de 100-110°C, até peso constante. Para esta determinação, foram utilizadas sondas manuais, caixas, estufas, exsiccadores e balanças de precisão.

A humidade do solo foi expressa pelo volume de água contido na unidade de volume de solo,  $H_v$ :

$$H_v = H_m \cdot (D_{ap}/D_w) \quad (\text{cm}^3/\text{cm}^3) \quad (2.1)$$

onde a  $D_{ap}$  é a densidade aparente do solo (ou da amostra de solo),  $D_w$  a densidade da água e  $H_m$  o teor de humidade expresso pela massa de água ( $m_w$ ) presente na massa

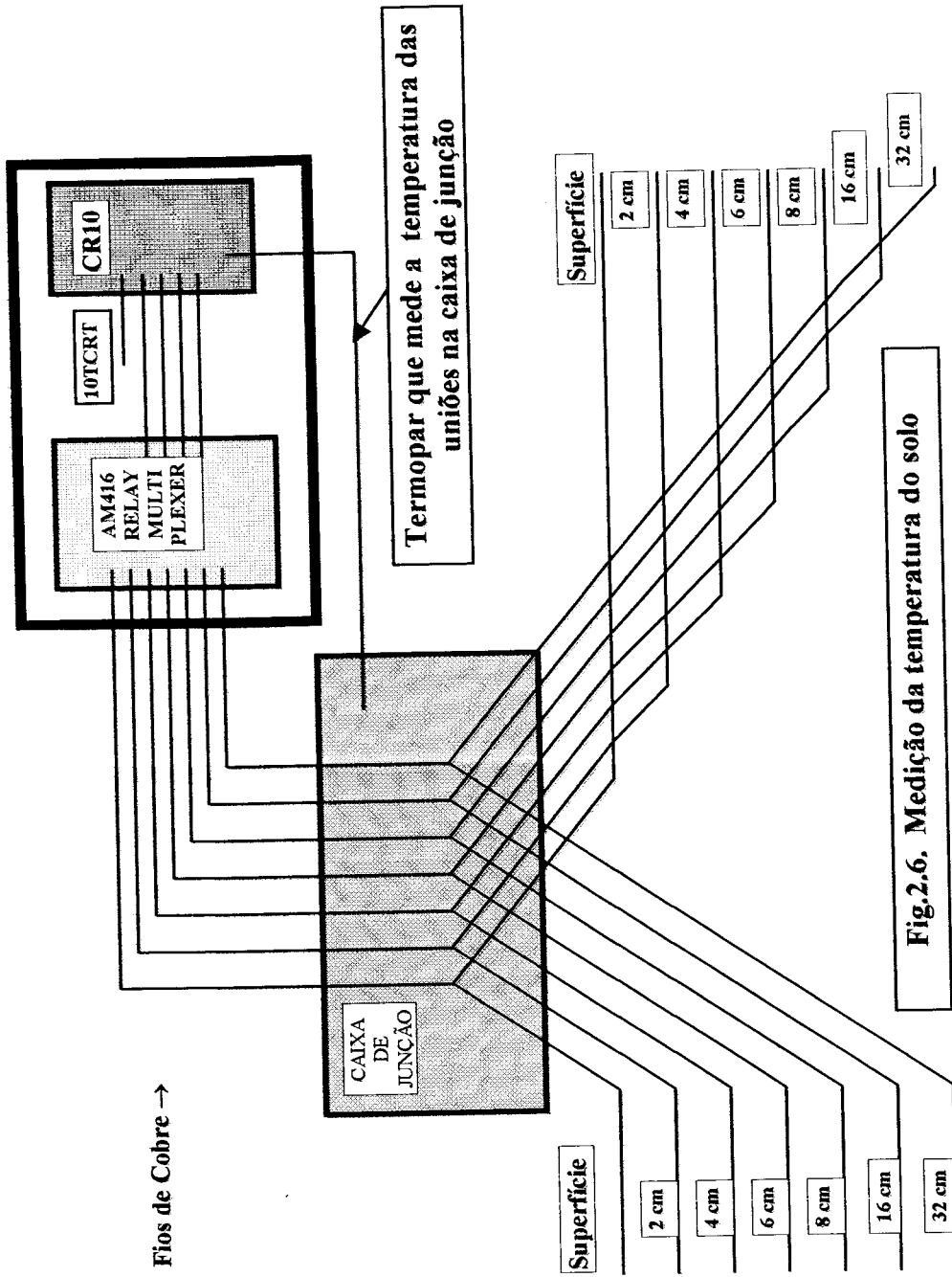


Fig.2.6. Medição da temperatura do solo

unitária de solo seco em estufa ( $m_s$ ):

$$H_m = (m_w/m_s).100 \quad (\%) \quad (2.2)$$

Em cada local foram colhidas três amostras de solo de cada uma de cinco camadas adajacentes, 0-5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 15 cm, 15 a 20 cm, 20 a 25 cm, para determinação da humidade. O teor de humidade do solo em cada camada foi a média aritmética das três amostras respectivas. Na estação mais seca, e em particular no solo Pmg devido à sua natureza, o perfil hídrico medido compreendeu apenas as três primeiras camadas.

A colheita de amostras de solo foi realizada, em regra, todos os três dias. Esta periodicidade foi menor sempre que houve ocorrência intercalar de forte precipitação e maior durante o Verão (recolhas semanais, e por vezes, quinzenais). No solo Pmg, foram feitas determinações entre 5 de Novembro de 1993 e 5 de Junho de 1996; no solo Cb, as amostras foram recolhidas entre 24 de Novembro de 1993 e 26 de Novembro de 1996.

### **2.2.3. Medições meteorológicas**

No local A, precipitação foi medida por um pluviómetro de pratos basculantes, tipo ARG100, da *Campbell Scientific Inc.*, colocado com a base assente no solo. Foram registados os totais horários e diários (Quadro 2.4).

Para medir a temperatura e a humidade do ar no mesmo local foi utilizado um psicrómetro ventilado do tipo H301, da *Vector Instruments*, montado num braço de uma torre meteorológica à altura de 1,2 m. Registaram-se os valores médios horários e diários (Quadro 2.4).

A velocidade do vento foi medida por um anemómetro, tipo A100R, da *Vector Instruments*, montado num braço da torre a uma altura de 2 metros. Foram registados os valores médios horários e diários (Quadro 2.4).

### **2.3. Medições biológicas**

Esta secção trata do equipamento e dos métodos utilizados no estudo de germinação, emergência e estabelecimento de várias culturas em função da temperatura e humidade ambiente. As medições de germinação a várias temperaturas decorreram em

ambiente controlado. As de emergência e estabelecimento a várias temperaturas e humidades do solo decorreram nos locais A e B.

### **2.3.1. Culturas**

#### **2.3.1.1. As espécies estudadas**

Para as experiências sobre germinação e emergência foram estudadas as seguintes espécies:

- fava (*Vicia faba* L.) var. *favel*
- ervilha (*Pisum sativum* L.) var. *ballet*
- tremocilha (*Lupinus luteus* L.) var. *cardiga*
- grão-de-bico (*Cicer arietinum* L.) var. *elvar*
- girassol (*Helianthus annuus* L.) var. *florasol*
- milho (*Zea mays* L.) var. *lorena*
- sorgo (*Sorghum vulgare* L.) var. *oásis*

Para o estudo do desenvolvimento após a emergência (número de folhas e áreas foliares) foram consideradas a fava, a ervilha, o girassol, o milho e o sorgo.

As culturas seleccionadas asseguram diversidade (oleaginosas, proteaginosas, cereais), representatividade dentro das condições semi-áridas mediterrâneas e têm importância económica associada à utilização no consumo humano, animal e misto. Uma, as semeadas normalmente no Outono (ervilha, fava, grão de bico e tremocilha), necessitam de baixas temperaturas nas primeiras fases do ciclo; outras, são culturas semeadas na Primavera, adaptadas a temperaturas elevadas, mais tolerantes (girassol) ou menos tolerantes (milho, sorgo) a baixas temperaturas; algumas (milho, fava) apresentam exigências maiores em água, enquanto outras (grão, girassol, sorgo) resistem a condições de secura. Entre as culturas escolhidas existem também diferenças importantes nas características morfológicas ao nível da folha, em características anatómicas como a localização do meristema apical (acima do solo após emergência das plântulas como nas dicotiledóneas ou abaixo do solo na fase de estabelecimento das culturas como ocorre nas monocotiledóneas), ou dos cotilédones no momento da emergência à superfície (epígea no caso da tremocilha e do girassol e hipógea nas restantes espécies).

#### **2.3.1.2. As sementes utilizadas**

As sementes de ervilha, de fava e de milho provieram da Herdade Experimental da Mitra, Universidade. de Évora, Évora; as de tremocilha, de grão e de sorgo da



Estação Nacional de Melhoramento de Plantas, Elvas; a de girassol, da Herdade de Almocreva, Universidade de Évora, Beja. Os lotes de sementes foram renovados anualmente. As sementes foram conservadas em laboratório a uma temperatura ambiente que variou entre 18 e 22°C.

Algumas características das sementes utilizadas resumem-se no Quadro 2.5. A faculdade germinativa das sementes foi previamente garantida pela origem e comprovada em laboratório através de testes adequados (Miguel, 1983). Antes de serem utilizadas nas várias experiências, as sementes foram inspeccionadas, e eliminadas as que apresentavam quebras de tegumento, perfurações, formas anormais ou outras anomalias; as sementes seleccionadas foram mergulhadas numa solução de hipoclorito de sódio a 1%, de forma a serem eliminados eventuais fungos ou bactérias.

**Quadro 2.5. Características das sementes. *M.a.a.* é a percentagem mínima de germinação agronomicamente aceitável para cada cultura (Miguel, 1983); D.P. – desvio padrão**

Espécie	Variedade	<i>M.a.a.</i> (% de Germinação)	Peso de 100 sementes (g)		Teor de Humidade (%)	
			Média	D.P.	Média	D.P.
<b>Ervilha</b>	<i>Ballet</i>	70	21,1	0,4	11,1	0,1
<b>Tremocilha</b>	<i>Cardiga</i>	80	8,9	0,2	11,7	0,4
<b>Grão-de-bico</b>	<i>Elvar</i>	80	38,9	0,9	9,8	0,1
<b>Fava</b>	<i>Favel</i>	80	84,4	2,7	9,1	0,1
<b>Girassol</b>	<i>Florasol</i>	70	6,0	0,1	6,1	0,4
<b>Milho</b>	<i>Lorena</i>	85	23,2	1,5	11,6	0,4
<b>Sorgo</b>	<i>Oásis</i>	70	3,3	0,1	11,6	0,4

### 2.3.2. Experiências sobre germinação

#### 2.3.2.1. Equipamento utilizado

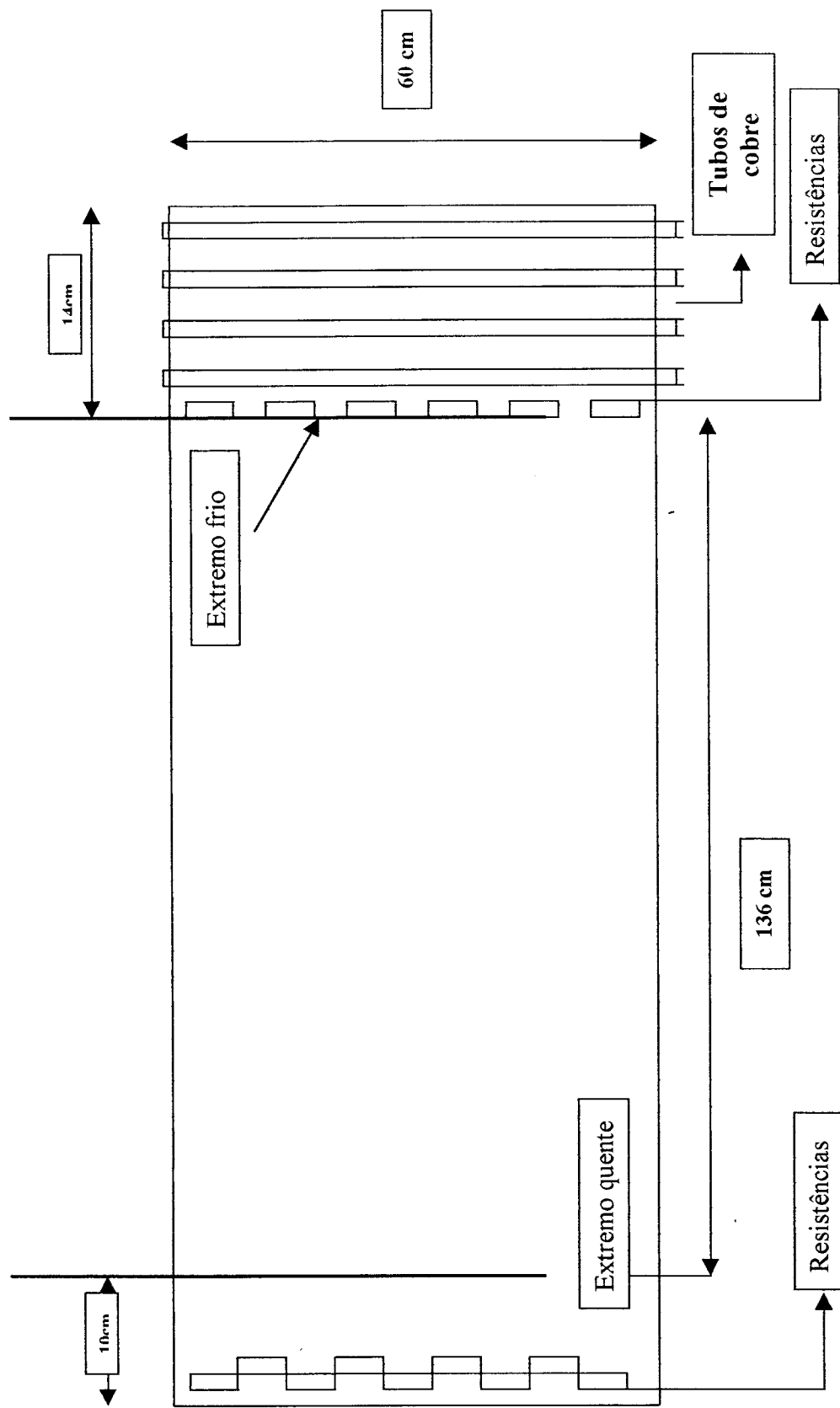
O efeito da temperatura na germinação é frequentemente estudado em estufas de germinação (Stamp, 1987; Martin *et al.*, 1988; Carberry e Campbell, 1989; Brar *et al.*, 1991; Brar e Stewart, 1994). Tais dispositivos apenas permitem avaliar o processo

germinativo ao longo do tempo para uma só temperatura de cada vez, pelo que as experiências tornam-se morosas e onerosas.

Em alternativa, as placas de gradiente térmico são dispositivos de metal com boa condutividade térmica (normalmente de alumínio) ao longo dos quais se estabelece um gradiente térmico quando as extremidades se encontram a temperaturas diferentes. Se forem dispostas sementes ao longo de cada placa, é possível testar o seu comportamento germinativo para várias temperaturas em simultâneo. Vários autores construíram e utilizaram placas deste tipo com diferentes formas e dimensões, tanto para o estudo da germinação de sementes como para o de outras fases de desenvolvimento vegetativo (crescimento de raízes, etc...) (Halldal e French, 1958; Elliot e French, 1959; Larsen, 1965; Barbour e Racine, 1967; Chatterton e Kadish, 1969; Cole, 1972; Larsen *et al.*, 1973; Clegg e Eastin, 1978; Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a,b; Mohamed, 1984; Webb *et al.*, 1987; Ferrão e Abreu, 1996).

#### **Placa de gradiente térmico**

Nestes estudos sobre o efeito da temperatura na germinação foi utilizada uma placa de gradiente térmico construída no Laboratório de Agrometeorologia do Instituto Superior de Agronomia (Ferrão e Abreu, 1996). Em síntese, a placa (Fig. 2.7) é construída em alumínio e é aquecida num extremo e arrefecido no outro. O aquecimento é feito com 9 resistências de 17 W cada, ligadas em série e fixas à face inferior da placa. O extremo frio é arrefecido pela circulação de líquido refrigerante a baixa temperatura (diluição de etilenoglicol em água a 50% V/V) no interior de tubos de cobre, com 1 cm de diâmetro, colados em 4 calhas semi-cilíndricas escavadas na placa. O líquido é bombeado de uma unidade de refrigeração constituída por um banho termostático de precisão (*Barrington W38-ZD* da *Grant Instruments*) e um refrigerador helicoidal (CK2 da *Grant Instruments*) (Fig. 2.8). Para um melhor controlo da temperatura no extremo frio existem ainda 6 resistências de aquecimento em série, idênticas às do extremo quente. As resistências eléctricas e os tubos de refrigeração foram instalados simetricamente em relação ao eixo maior da placa de forma a minimizar gradientes térmicos em secções transversais. Os sistemas de aquecimento e de arrefecimento foram dimensionados para a placa funcionar com uma diferença de temperaturas de 50°C entre os extremos frio e quente, e com o frio a uma temperatura entre 0°C e 10°C. Contudo, não foi possível obter valores inferiores a 3-4°C no extremo frio da placa devido ao congelamento do líquido refrigerante em torno do refrigerador helicoidal e ao aumento



**Fig. 2.7. Superfície inferior da placa de gradiente térmico: dimensões, sistemas de aquecimento e arrefecimento**



Fig. 2.8 – Unidade de refrigeração: banho termostático de precisão Barrington W38-ZD e refrigerador helicoidal CK2 (*Grant Instruments*)

de viscosidade que dificulta a sua circulação na serpentina de cobre (Ferrão e Abreu, 1996).

As dimensões da placa são: 160 cm × 60 cm × 1 cm. A área útil é menor uma vez que é necessário evitar as zonas imediatamente contíguas aos extremos devido às maiores oscilações térmicas que aí ocorrem. Deste modo foram deixadas margens de 10 cm e 14 cm, respectivamente para os extremos quente e frio. Resultou um comprimento efectivo de 136 cm e uma correspondente área útil de 0,816 m<sup>2</sup>.

A placa está termicamente isolada do exterior com placas de esferovite e com lâ de vidro, e assenta numa base de madeira. A cobertura em esferovite é facilmente removível para fazer as contagens de germinação (Fig. 2.9)

#### **Medição e controle da temperatura**

As temperaturas sobre a superfície da placa e no interior das unidades de germinação (discos de Petri), foram medidas com termopares de Cu-CuNi, semelhantes aos referidos na secção 2.1. Foram utilizados 14 termopares, 12 nas unidades de germinação e 2 soldados à placa, um em cada extremo útil.

O controlo e medição das temperaturas foi executado por um acumulador automático de dados CR 10 da *Campbell Scientific* com multiplicador de canais AM32 (Fig.2.10). A temperatura de referência instalada no CR10 foi medida por um termistor. O programa instalado no CR10 compara o valor da temperatura medido pelos termopares nos extremos úteis com o valor pretendido. Se a temperatura medida num dos extremos foi menor que a pretendida, acciona um dispositivo do tipo *relay*, que permite a passagem de corrente de 220V através das resistências colocadas nesse extremo, provocando o aquecimento. Caso a temperatura ultrapasse o valor requerido o sinal de 5V, e consequentemente o *relay* e as resistências, são desactivados.

#### **Unidades de germinação**

Como unidades de germinação foram utilizados discos ou placas de Petri, cobertos, com aproximadamente 9 cm de diâmetro interior e 9,5 cm de diâmetro exterior. Este tipo de material foi utilizado, entre outros, por Fayemi (1957), Simon *et al.* (1976), Garcia-Huidobro *et al.* (1982a,b; 1985), Hsu *et al.* (1984), Smith *et al.* (1989), Dahal *et al.* (1990a,b), Abreu *et al.* (1994), Ferrão (1995). Ao longo da placa foi possível utilizar 60 destas unidades em simultâneo, constituindo 5 filas longitudinais e 12 transversais (Fig. 2.9).

#### **2.3.2.2. Procedimento experimental**

As experiências de germinação foram realizadas entre Fevereiro de 1995 e Maio



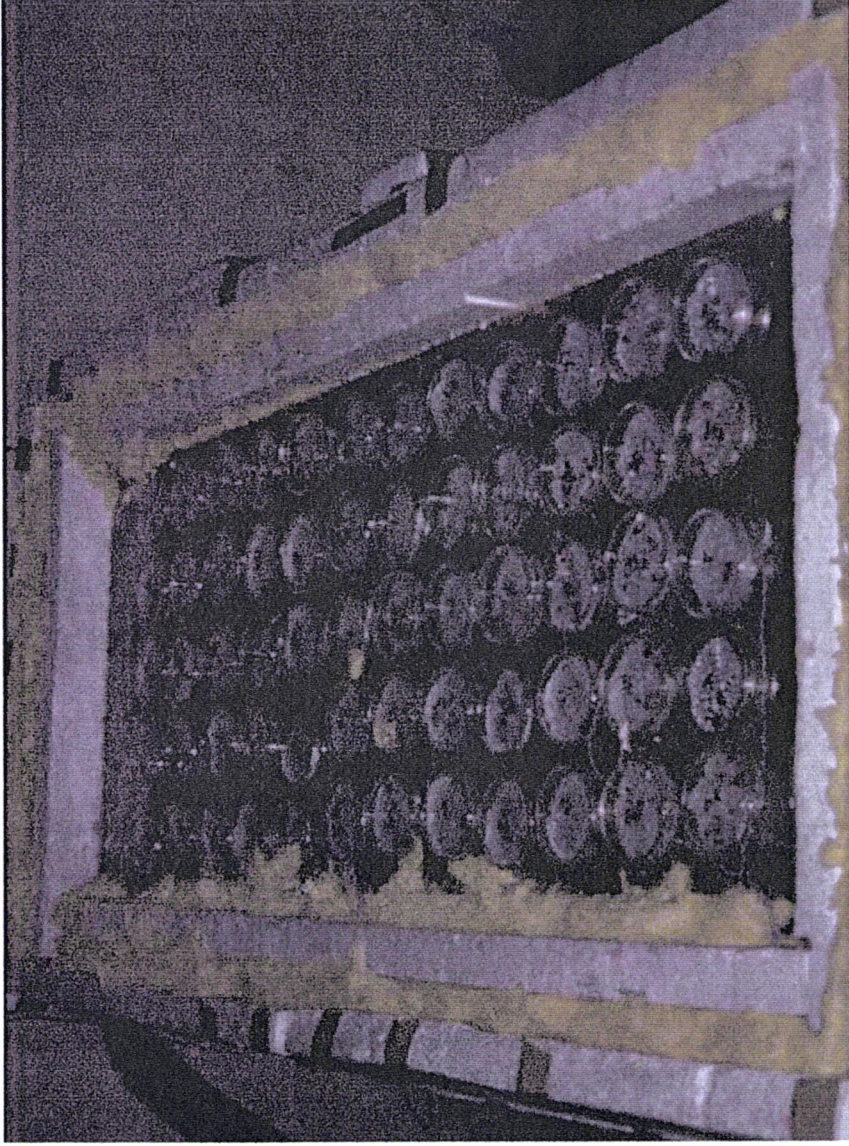
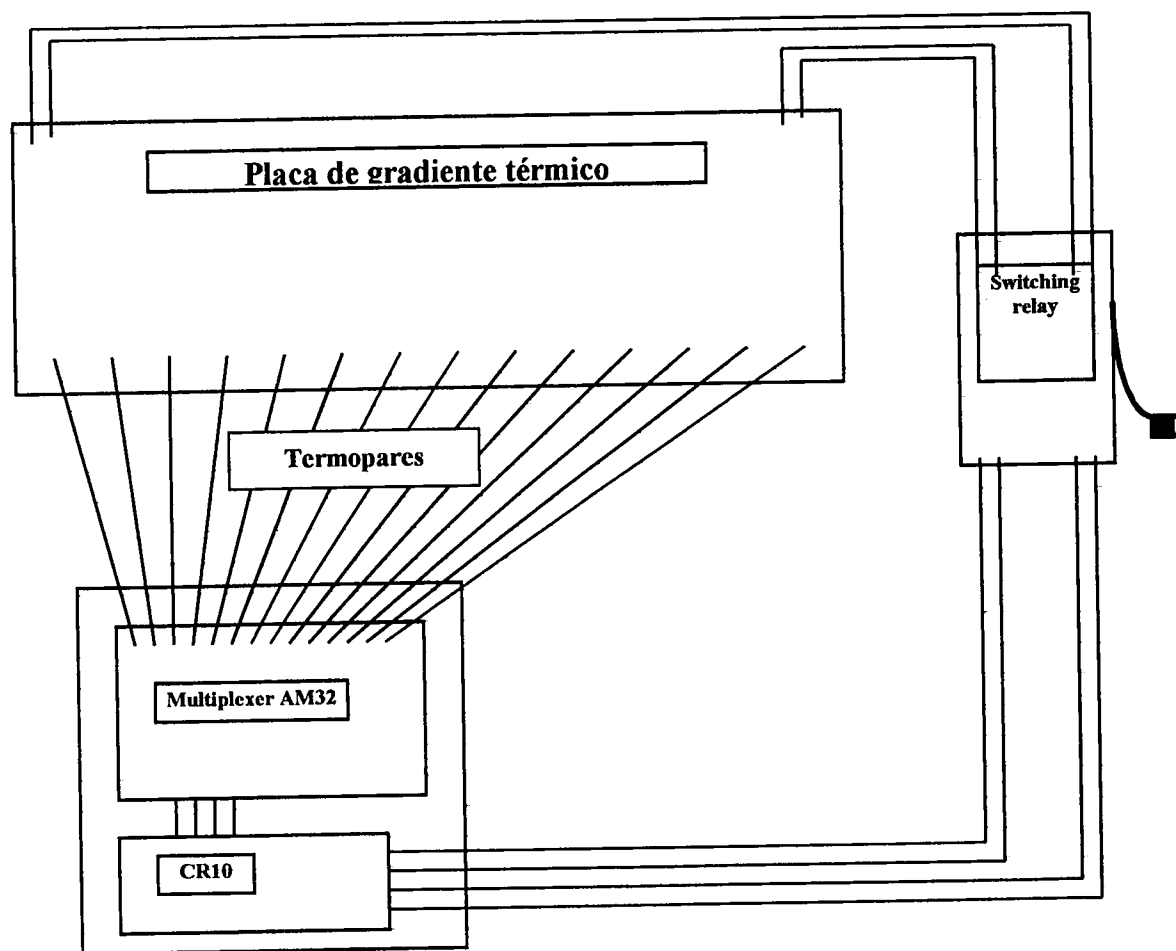


Fig. 2.9 – Placa de gradiente térmico, sem cobertura, com as unidades de germinação (discos de Petri).



**Fig. 2.10. – Diagrama do sistema de medição e controle da temperatura sobre a placa de gradiente térmico**

de 1996 no Laboratório de Agrometeorologia do Instituto Superior de Agronomia. A placa foi utilizada com 5 gamas de temperatura diferentes, definidas a partir das temperaturas pretendidas para os extremos úteis frio e quente (0°C-50°C, 5°C-50°C, 0°C-45°C, 15°C-40°C e 15°C-45°C). Em cada gama pretendia-se obter temperaturas distintas ao longo da placa, nas posições correspondentes às faixas transversais (num máximo de 12).

A gama térmica imposta na 1ª experiência relativa a cada uma das espécies foi escolhida tendo como base o prévio conhecimento do tipo de cultura (Primavera/Verão; Outono/Inverno) Nas restantes experiências utilizaram-se outras gamas para obter respostas a temperaturas diferentes das iniciais para cada cultura e incluíram frequentemente mais que uma espécie em simultâneo. Para a maioria das culturas estudadas, a mesma gama térmica foi usada em mais que uma experiência. O Quadro 2.6 mostra o número de experiências efectuadas para cada espécie, os extremos térmicos impostos em cada uma delas, o número de faixas transversais utilizadas (temperaturas), a duração máxima de cada uma e a respectiva data de início.

O equipamento (refrigerador e *relay*) foi ligado com a antecedência suficiente relativamente ao momento da colocação das sementes nas unidades de germinação de forma a ser possível estabilizar a gama de temperaturas pretendidas. Estas unidades foram forradas internamente com folhas de papel de filtro (*Wathman 40*) embebidas em água destilada. Sempre que necessário, adicionou-se água destilada durante as experiências.

Foram colocadas 20 sementes em cada disco de Petri e dispostos 5 discos de Petri por cada faixa transversal, totalizando 100 sementes a cada temperatura. Em cada faixa foi colocado um termopar num dos cinco discos. A contagem das sementes germinadas realizou-se inicialmente de 4 em 4 horas, evoluindo depois para periodicidades sucessivamente maiores. As sementes germinadas foram retiradas dos discos. O fim de cada experiência foi determinado pela não observação de qualquer semente germinada durante 48 horas a qualquer das temperaturas.

Considerou-se germinada qualquer semente que apresentasse uma radícula de 2 mm de comprimento. Esta dimensão corresponde a uma protusão inequívoca, sem ser confundida com simples entumescimento. Vários autores usaram esta medida, como Covell *et al.* (1986a) com o grão-de-bico, a lentilha (*Lens culinaris* Medic.), a soja (*Glycine max* (L.)Merr) e o feijão-frade (*Vigna unguiculata* L.), Ellis *et al.* (1986b) com



**Quadro 2.6. Características e cronologia das experiências de germinação na placa de gradiente térmico: n° de experiências realizadas para cada cultura, gama térmica imposta ao longo da placa térmica, n° de faixas transversais utilizadas (temperaturas), duração máxima de cada ensaio (em horas) e data de início de cada ensaio. <sup>1</sup> N° de faixas em que houve germinação de sementes**

Cultura	N° de experiências	Gama térmica (°C)	N° de faixas <sup>1</sup>	Duração máxima (h)	Data do início das experiências
Ervilha	4	0-50;15-45;15-40	11	430	11DEZ95;21MAR96;9ABR96;1AGO96
Tremocilha	2	0-50;15-40	12	431	8FEV95;4ABR95
Grão	3	0-50;15-45	13	256	3OUT95;21FEV96;21MAR96
Fava	4	0-50;15-45;15-40	12	524	16NOV95;13FEV96;6MAR96;9ABR96
Girassol	2	0-50;15-40	16	597	2MAR95;4ABR95
Milho	5	0-45;0-50;15-45;15-40	14	311	8JAN96;21FEV96;21MAR96;9ABR96;15ABR96
Sorgo	3	5-50;15-45	14	272	24JAN96;7MAR96;28MAR96

o grão de bico, Ellis *et al.* (1987c) com a fava, Benett-Lartey (1991) com a ervilha, o girassol e o amendoim (*Arachis hypogaea*, L.), Abreu *et al.* (1994) com o trigo (*Triticum aestivum* L.), o milho e o girassol, Ferrão (1995) com o girassol, a tremocilha e o sorgo e Craufurd *et al.* (1996) com o feijão-frade.

As temperaturas ao longo da placa foram medidas de 15 em 15 segundos, executando-se simultaneamente o controle de temperatura, e registadas as respectivas médias horárias e diárias e respectivos desvios-padrão.

### **Fiabilidade da placa**

As temperaturas médias horárias e respectivos desvios-padrão durante as primeiras 48 horas de cinco experiências, uma em cada das cinco gamas de temperatura, foram utilizadas para avaliar o comportamento térmico da placa ao longo das faixas longitudinais e transversais. O Quadro 2.7 apresenta, para esse período, temperaturas médias em cada faixa transversal ao longo da placa, assim como os respectivos desvios-padrão, os valores máximo e mínimo da temperatura média horária e os desvios-padrão horários (médio, máximo e mínimo).

Os valores dos desvios-padrão em qualquer das situações referidas são pequenos e as oscilações térmicas máximas horárias raramente ultrapassam 1,5°C nas faixas intermédias. Portanto, em qualquer gama térmica testada, a placa tem um comportamento estável e reprodutível ao longo do tempo. O desvio padrão médio horário é menor nas temperaturas intermédias que nos extremos o que reflecte a maior oscilação térmica nestes últimos devido ao controlo aí operado.

Para os cinco intervalos térmicos impostos a temperatura varia linearmente ao longo da placa (Fig. 2.11); os valores de  $R^2$  das regressões ajustadas às temperaturas médias durante 48 horas foram iguais ou superiores a 0,99 e são estatisticamente significativos para um nível de probabilidade de 99%. Os gradientes térmicos médios (declives das regressões) variaram entre 0,21°C/cm (15°C-45°C) e 0,35°C/cm (0°C-50°C). Assim, as várias faixas transversais representam temperaturas médias significativamente distintas.

Numa faixa transversal da placa, sensivelmente a meio da placa, foram colocados três termopares distanciados 15 cm uns dos outros. A temperatura média para a faixa foi de 23,1°C. Os valores muito pequenos dos desvios-padrão respectivos permitem considerar indicativo da temperatura de uma faixa transversal o valor obtido num qualquer ponto da mesma (Quadro 2.8).



Intervalo térmico: (0°C-45°C)	Faixas transversais														Ext.Quente
	Ext Frio	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A	Ext.Quente	
Dist.ao EF(cm)	0	5,5	17	30,5	39,5	50,5	63	74	86	97,5	108	118	131	136	
Temp. Média (°C)	0,7	3,0	6,4	10,9	13,5	17,1	20,2	23,4	27,0	30,5	34,5	38,4	42,7	45,1	
DesvPad (°C)	0,06	0,06	0,14	0,16	0,15	0,22	0,21	0,26	0,38	0,33	0,42	0,41	0,58	0,86	
Temp. Máx. (°C)	0,9	3,2	6,7	11,2	13,8	17,5	20,5	23,7	27,4	30,9	35,1	39,3	43,9	45,7	
Temp. Mín. (°C)	0,6	2,9	6,2	10,5	13,1	16,5	19,5	22,5	25,6	29,2	33,2	37,3	41,2	39,5	
D.P.horário															
DP Média (°C)	0,53	0,35	0,34	0,17	0,21	0,29	0,24	0,30	0,39	0,34	0,40	0,35	0,36	0,76	
DP Máx. (°C)	0,61	0,43	0,42	0,51	0,56	0,36	0,31	0,44	0,82	0,99	1,40	0,96	1,46	2,04	
DP Min. (°C)	0,46	0,30	0,29	0,09	0,18	0,24	0,19	0,23	0,27	0,24	0,25	0,25	0,18	0,50	
Intervalo térmico: (5°C-50°C)	Faixas transversais														Ext.Quente
	Ext Frio	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A	Ext.Quente	
Dist.ao EF(cm)	0	7	17	28,5	40,5	50	61	74	85	98	108,5	119	131	136	
Temp. Média (°C)	4,6	6,9	10,3	13,8	16,4	19,9	22,6	26,8	30,2	34,1	38,3	41,7	47,1	50,0	
DesvPad (°C)	0,11	0,14	0,29	0,35	0,28	0,37	0,50	0,65	0,69	0,84	0,68	1,07	0,41	0,32	
Temp. Máx. (°C)	4,9	7,3	10,8	14,5	16,9	20,5	23,3	27,7	31,1	35,4	39,2	42,7	47,6	50,3	
Temp. Mín. (°C)	4,3	6,6	9,7	13,0	15,6	18,9	21,1	24,8	28,1	31,9	36,2	37,9	46,1	48,9	
D.P.horário															
DP Média (°C)	0,45	0,31	0,31	0,18	0,23	0,28	0,27	0,40	0,43	0,49	0,49	0,72	0,56	0,92	
DP Máx. (°C)	0,50	0,42	0,66	0,45	0,41	0,48	0,62	1,16	1,21	1,40	1,66	3,47	1,92	2,10	
DP Min. (°C)	0,41	0,27	0,24	0,14	0,20	0,23	0,19	0,24	0,16	0,24	0,17	0,13	0,22	0,49	

Intervalo térmico: (15°C-45°C)	Faixas transversais														Ext.Quente
	Ext Frio	L	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A	Ext.Quente	
Dist.ao EF(cm)	0	6	17	29	40	50	61	73	86	97	109	119	130	136	
Temp. Média (°C)	16,2	17,1	18,5	20,8	22,5	24,4	26,2	29,6	31,4	34,3	36,6	40,0	43,1	45,4	
DesvPad (°C)	0,12	0,15	0,23	0,32	0,44	0,50	0,61	0,76	0,78	0,76	0,55	0,78	0,35	0,16	
Temp. Máx. (°C)	16,4	17,4	18,8	21,2	23,1	25,1	27,0	30,6	32,4	35,3	37,2	40,9	43,7	45,6	
Temp. Mín. (°C)	15,8	16,6	17,6	19,7	21,2	22,9	24,4	27,6	29,4	32,2	34,8	37,5	42,4	44,8	
D.P.horário															
DP Média (°C)	0,39	0,20	0,26	0,20	0,31	0,19	0,29	0,36	0,48	0,36	0,43	0,49	0,42	0,79	
DP Máx. (°C)	0,44	0,26	0,31	0,31	0,47	0,38	0,58	0,78	1,09	1,07	0,93	5,02	0,90	1,64	
DP Min. (°C)	0,30	0,14	0,17	0,14	0,24	0,14	0,16	0,15	0,30	0,15	0,26	0,15	0,28	0,53	

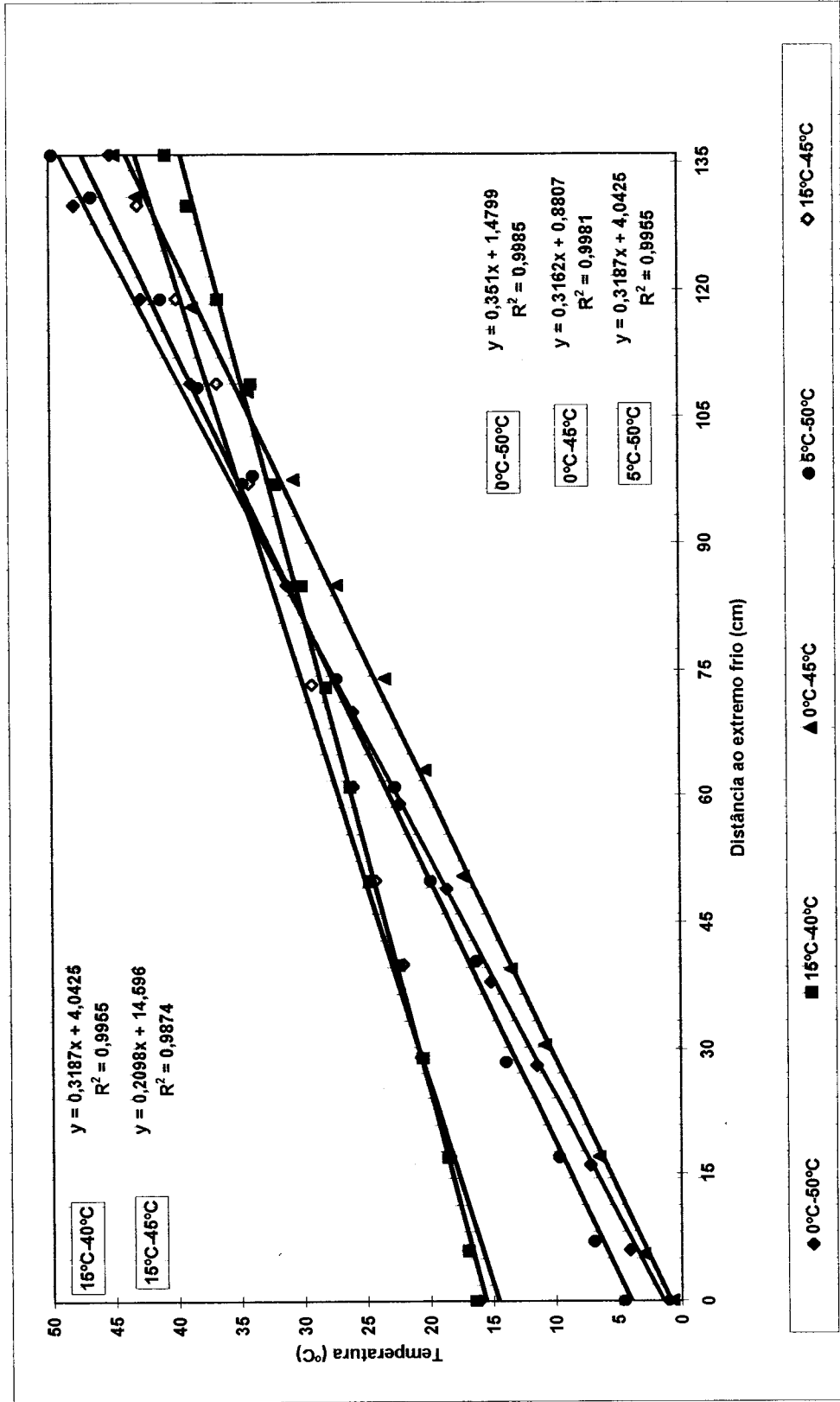


Fig. 2.11. Variação da temperatura ao longo da placa de gradiente térmico para 5 intervalos térmicos (0°C-50°C; 15°C-40°C; 0°C-45°C; 5°C-50°C; 15°C-45°C): equações de regressão linear e respectivos coeficientes de determinação

**Quadro 2.8. Desvios-padrão (°C) da temperatura medida em três pontos (A, B e C) numa faixa transversal da placa de gradiente térmico**

<b>Termopares</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Desvio Padrão</b>	0,11	0,05	0,25
<b>Valor máx. (horário)</b>	0,13	0,06	0,30
<b>Valor mín. (horário)</b>	0,05	0,02	0,11

### **2.3.3. Experiências sobre emergência**

#### **2.3.3.1. Introdução**

As experiências sobre a emergência das sete culturas decorreram numa área contígua à que inclui os perfis de temperatura nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa). As experiências foram iniciadas em Novembro de 1993 em ambos os solos. Prolongaram-se até Junho de 1996 no solo Pmg e até Dezembro de 1996 no solo Cb. O Quadro 2.9 identifica as experiências realizadas em função das respectivas datas de sementeira e das culturas semeadas em cada uma delas. As primeiras experiências foram levadas a cabo na época de sementeira normal para cada uma das culturas. A necessidade de obter resultados para uma vasta gama de temperaturas e teores de humidade do solo, tornou necessário, numa segunda fase, a realização de sementeiras noutras épocas menos favoráveis. Nos dois solos foram excluídas experiências cujo insucesso se ficou a dever a causas como o desaparecimento de sementes devido a ratos, pássaros ou formigas.

#### **2.3.3.2. Sementeiras e contagens**

Em ambos os locais, cada cultura outono-invernal (ervilha, tremocilha, grão e fava) foi semeada em 4 áreas de 1 m<sup>2</sup> cada (4 m<sup>2</sup> no total) enquanto as culturas primaveris (girassol, milho e sorgo) foram semeadas em 4 áreas iguais de 2,5 m<sup>2</sup> (10 m<sup>2</sup> no total); as quatro áreas ocupadas por cada cultura eram contíguas duas a duas (Fig. 2.12 a, b).

A mobilização do solo foi feita com motofresa em ambos os solos antes da 1<sup>a</sup> sementeira após a estação seca e com enxada antes de qualquer outra sementeira. Usou-se o processo de sementeira em linha. Os regos foram abertos com riscadores e as sementes colocadas a 2,5 - 3 cm de profundidade. O Quadro 2.10 refere o número de sementeiras realizadas em cada um dos solos em análise, a densidade de sementeira e o espaço entre linhas adoptado. A densidade adoptada corresponde ao vulgarmente

Quadro 2.9 - Cronologia das experiências para o estudo da emergência e da evolução da área foliar da ervilha (Erv), da tremocilha (Tre), do grão (Gra), da fava (Fav), do girassol (Gir), do milho (Mil) e do sorgo (Sor) nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa)

Nº da experiência	DATA			EXPERIÊNCIAS	
	ANO	DIA	MÊS	EMERGÊNCIA	FOLHAS E ÁREA FOLIAR
1	93	6	11	Erv, Tre, Gra, Fav	
2	93	19	11	Erv, Tre, Gra, Fav	
3	93	3	12	Erv, Tre, Gra, Fav	
4	93	29	12	Erv, Tre, Gra, Fav	
5	94	26	4	Gir, Mil	
6	94	13	5	Gir, Mil	Gir, Mil
7	94	20	5	Gir, Mil	
8	94	25	5	Gir, Mil	
9	94	27	5	Gir, Mil, Sor	Gir, Sor, Mil
10	94	29	5	Gir, Mil	Gir, Mil
11	94	20	10	Erv, Tre, Gra, Fav, Mil	Erv, Fav, Mil
12	94	10	11	Erv, Tre, Gra, Mil	Erv, Fav, Mil
13	94	8	12	Erv, Tre	Erv
14	95	4	1	Erv, Tre, Gra, Fav	Erv, Fav
15	95	24	1	Tre	
16	95	14	4	Erv, Tre, Gra, Fav, Sor	
17	95	8	5	Erv, Tre, Gra, Fav, Gir, Sor	Erv, Gir, Sor
18	95	3	11	Erv, Tre, Gra, Fav, Gir, Mil	Fav
19	96	5	3	Gir	Gir
20	96	27	4	Erv, Gra, Fav, Sor	Erv, Fav, Sor
21	96	28	4	Tre	
22	96	29	4	Gir	Gir
23	96	2	5	Tre, Fav	
24	96	18	5	Erv, Tre, Gra, Sor	Erv, Sor

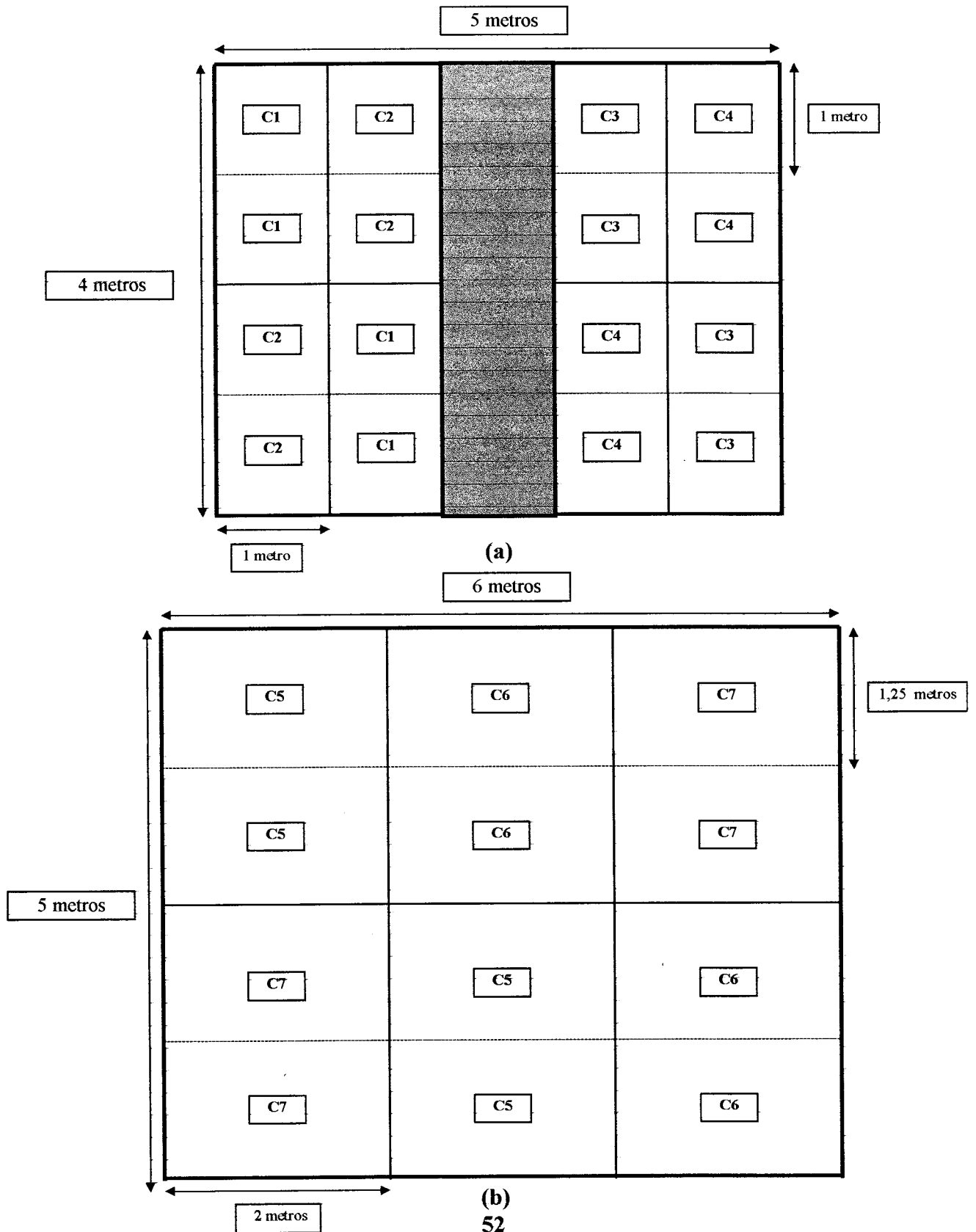
(a)

Nº da experiência	DATA			EXPERIÊNCIAS	
	ANO	DIA	MÊS	EMERGÊNCIA	FOLHAS E ÁREA FOLIAR
1	93	24	11	Erv, Tre	Erv, Fav
2	94	4	1	Erv, Tre, Gra, Fav	
3	94	20	1	Erv, Tre, Gra, Fav	
4	94	24	2	Tre, Gra, Fav	
5	94	28	2	Erv	
6	94	26	5	Mil	
7	94	27	5	Mil	
8	94	30	5	Mil	
9	94	1	6	Mil	
10	94	3	6	Sor	
11	94	13	10	Erv, Tre, Gra, Fav, Mil	Erv, Fav, Mil
12	94	20	10	Erv, Tre, Gra, Fav	Erv, Fav
13	94	21	10	Mil	Mil
14	94	12	11	Mil	
15	94	14	11	Erv, Tre, Gra, Fav	
16	95	19	1	Erv, Tre, Fav, Glr	Fav, Glr
17	95	6	4	Erv, Tre, Gra, Fav	Erv, Fav
18	95	1	5	Glr	Glr
19	95	9	5	Erv	
20	95	9	9	Erv, Tre, Fav, Glr, Mil, Sor	Erv, Glr, Mil, Sor
21	95	28	10	Erv, Tre, Fav	Fav, Glr, Mil, Sor
22	96	4	3	Glr	Glr
23	96	5	3	Mil	Mil
24	96	21	3	Sor	Sor
25	96	3	4	Glr, Sor	Glr, Mil, Sor
26	96	22	4	Fav	Fav, Glr, Mil
27	96	1	5	Fav, Glr, Mil	Glr
28	96	20	5	Glr	Glr, Sor
29	96	15	9	Glr, Sor	Glr, Sor
30	96	26	9	Tre, Gra, Glr, Sor	Glr, Sor
31	96	11	11	Gra, Mil, Sor	Erv, Mil, Sor

(b)



Fig.2.12. Esquema das áreas de sementeira em Évora e em Lisboa: a) culturas de primavera (C1,C2,C3,C4); (b) culturas de outono-inverno (C5,C6,C7).



praticado na região para as culturas em estudo (Carvalho, comunicação pessoal).

Para um mais fácil controle de humidade do solo através da rega no solo Pmg, em Évora, foram utilizados três tabuleiros de alumínio, com uma profundidade de 0,15 m e uma área útil de 1,19 m<sup>2</sup> (1,7m × 0,7 m) cada (Fig. 2.13). O seu volume foi preenchido com solo respeitando a massa volúmica aparente. Os tabuleiros foram semeados com de ervilha, grão e fava na experiência 20 e com ervilha, grão e tremocilha na experiência 24 (Quadro 2.9 a).

A área experimental em Évora teve de ser coberta com redes e arames para evitar a acção de ratos e pássaros e isolada por formicidas para evitar a acção das formigas.

**QUADRO 2.10. Elementos referentes às sementeiras realizadas**

<b>ESPÉCIE</b>	<b>Nº de Sementeiras (Solo Pmg/Solo Cb)</b>	<b>Densidade (Nºsem./m<sup>2</sup>)</b>	<b>Espaço entre linhas (cm)</b>
<b>Ervilha</b>	15 / 13	80	20
<b>Tremocilha</b>	15 / 10	60	20
<b>Grão</b>	13 / 9	60	20
<b>Fava</b>	12 / 13	40	20
<b>Girassol</b>	10 / 8	20	40
<b>Milho</b>	9 / 12	20	40
<b>Sorgo</b>	5 / 8	20	40

Considerou-se uma plântula emergida quando à superfície do solo foram visíveis os cotilédones nas espécies com emergência epígea ou os gomos terminais da jovem planta nas restantes espécies. A partir da emergência das primeiras plântulas, as contagens realizaram-se três vezes por dia evoluindo depois para duas e uma vez por dia à medida que foram atingidos valores percentuais mais elevados de emergência. Cessaram as observações sempre que não foi registada qualquer emergência durante 3 dias consecutivos.

### **2.3.3.3. Dotação de rega**

Para quantificar a emergência em condições hídricas potencialmente não-restritivas e a temperaturas que só ocorrem no período quente e seco, foi necessário regar antes do início de algumas experiências. Noutras experiências, embora se tenham verificado condições hídricas favoráveis à data de sementeira, taxas de evaporação

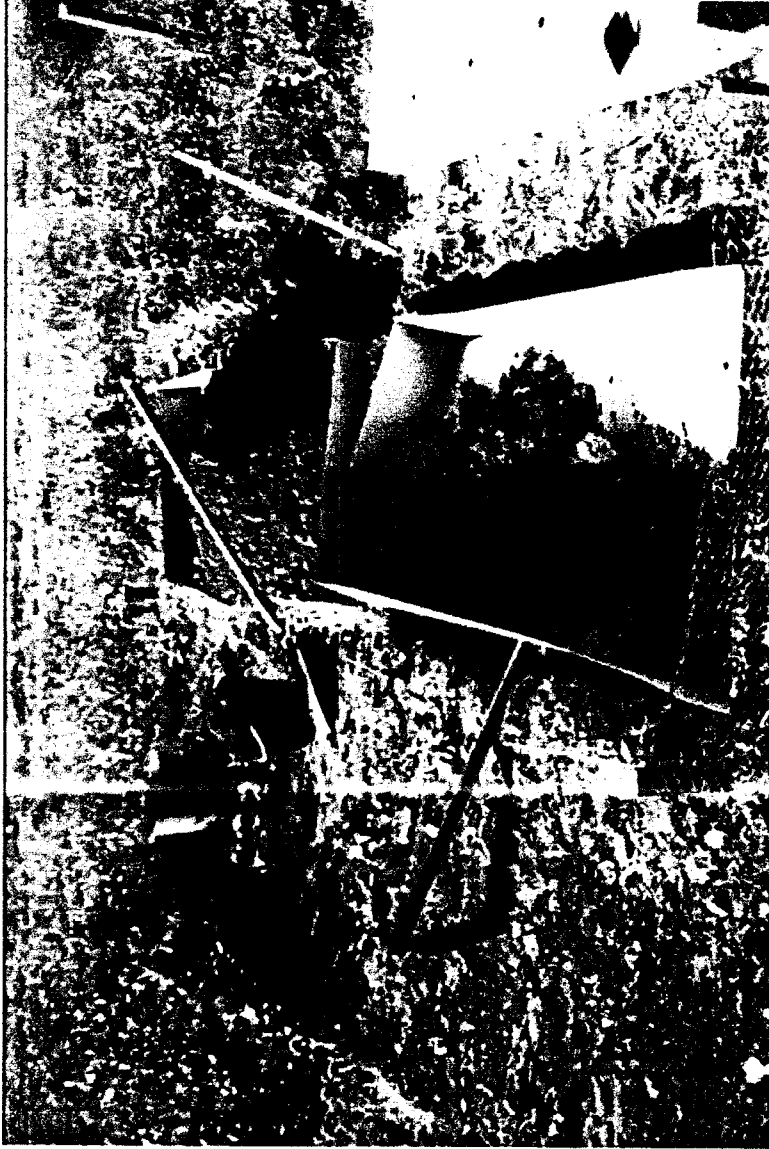


Fig. 2.13 – Tabuleiros de alumínio construídos para as experiências sobre a emergência em Évora, no período seco.

elevadas nos dias posteriores também tornaram a rega necessária. Noutras situações ainda, as condições hídricas desfavoráveis no momento da sementeira ou nos dias subsequentes foram mantidas com o objectivo de estudar o comportamento das culturas nestas situações, isto é, avaliar a influência da humidade do solo na emergência das culturas. O Quadro 2.11 apresenta, para os dois solos, as datas em que foram regadas as áreas de sementeira, a dotação de cada uma das regas efectuadas e as experiências afectadas.

Para regar foram usados regadores com capacidade de 12 litros cada. As dotações de rega foram calculadas com o objectivo de a humidade do solo atingir valores próximos da capacidade de campo na camada mais superficial. Contudo, taxas de evaporação diária relativamente elevadas nem sempre permitiram que estes teores de humidade fossem mantidos, apesar das regas frequentes.

Calculou-se a dotação de rega a partir da expressão (Costa, 1973):

$$DT = H(\%) \times Dap \times Z \quad (2.3)$$

em que DT é a dotação de rega (mm), H representa a variação de humidade no solo (%) pretendida após conhecimento do teor de humidade inicial, Dap a densidade aparente do solo e Z a espessura de solo humedecida (mm).

A dotação de rega permitiu, em qualquer caso, que a camada superficial do solo (20-25 cm em ambos os solos) apresentasse teores de humidade entre 50% da C.U. e a C.C.. Estes limites fundamentam-se em critérios de natureza agronómica (taxa de crescimento em função do défice de água utilizável, capacidade de retenção para a água em função da textura do solo): teores de humidade inferiores a 50% de C.U. são normalmente insuficientes para o desenvolvimento vegetal, enquanto que acima da C.C., as limitações derivam da falta de arejamento do solo (Costa, 1973; Donahue, 1987; Brady, 1990).

#### **2.3.3.4. Medição da temperatura e da humidade do solo.**

Dos perfis térmicos medidos em cada solo (Pmg e Cb) foram utilizadas para a emergência as temperaturas médias, horárias e diárias, e as máximas e mínimas diárias a 2 cm e a 4 cm de profundidade. A média aritmética dos valores de temperatura obtidos a estas profundidades foi tida como a temperatura representativa do ambiente térmico em redor das sementes à profundidade de 2,5-3 cm. Devido à necessidade de uma prévia aplicação de rega nas áreas a semear, foram introduzidos termopares adicionais no solo Cb às profundidades de 2, 4, 8, 16, 32 cm e à superfície, a partir de 11 de Outubro de

**Quadro 2.11 - Dotação de rega: cronologia, quantidades aplicadas e experiências afectadas.**

DATA da REGA			Dotação aplicada (mm)	Experiências afectadas (nº)
ANO	DIA	MÊS		
<b><u>Solo Pmg</u></b>				
95	11	4	12	16,17
95	13	4	9	16,17
95	14	4	3	16,17
95	17	4	4,3	16,17
95	18	4	4,5	16,17
95	20	4	4,5	16,17
95	21	4	4,5	16,17
95	22	4	4,5	16,17
95	7	11	11	18
96	26	4	18	20,21,22
96	24	5	12	24
<b><u>Solo Cb</u></b>				
94	14	10	12	11,12,13
95	4	4	12	17
95	5	4	12	17
95	6	4	3	17
95	7	4	3	17
95	8	4	3	17
95	9	4	3	17
95	12	5	12	19
95	16	5	12	19
95	18	5	12	19
96	24	4	12	26
96	26	4	12	26
96	1	5	12	27
96	20	5	12	28
96	13	9	24	29,30
96	14	9	24	29,30

1994. Pela mesma razão, em 5 de Abril de 1995 foram acrescentados 3 termopares no solo Pmg, dois introduzidos às profundidades de 2 e 4 cm e o outro mantido à superfície. A partir de 27 de Abril de 1996 foram instalados mais dois termopares nas caixas de alumínio atrás referidas, a 2 e a 4 cm de profundidade. Nos perfis térmicos adicionais foi aplicada a mesma dotação de rega que nas áreas semeadas. Os termopares adicionais foram ligados ao sistema automático de colheita e armazenamento de dados (CR10), e os valores de temperatura medidos foram utilizados para os estudos de emergência nas experiências com rega.

Os valores médios do teor de água no solo determinados para os cinco centímetros superficiais foram tidos como representativos das condições hídricas que influenciam directamente a germinação e emergência enquanto que os estimados para os 10 cm superficiais representam as condições hídricas da camada de solo em contacto directo com as plântulas durante o estabelecimento. Nas experiências em que as áreas semeadas foram regadas, em cada determinação de humidade foram recolhidas 3 amostras relativas à mesma espessura de solo em parcelas de solo contíguas, regadas para o efeito com a mesma quantidade de água que as áreas semeadas. O teor de humidade respectivo foi a média aritmética dos valores obtidos para as três amostras. A periodicidade destas medições foi idêntica à seguida em solo não regado.

#### **2.3.4. Estabelecimento**

Admitindo que uma jovem planta se encontra estabelecida quando se torna independente das reservas seminais, e que a produção de folhas fotossinteticamente activas é a via para essa independência, considerou-se arbitrariamente que o estabelecimento corresponde à produção da 5ª folha (ou 3º par de folhas) nas espécies em estudo. Dependendo das condições ambientais mais ou menos favoráveis, o estabelecimento é atingido mais ou menos rapidamente e com áreas foliares mais ou menos desenvolvidas.

Para investigar a influência da temperatura e da humidade do solo na produção de folhas e na área foliar, prolongaram-se algumas experiências sobre a emergência nos dois tipos de solo (Quadro 2.9), mas apenas para a ervilha, a fava, o girassol, o milho e o sorgo. Após a emergência não se regou em circunstância alguma. O ANEXO A identifica as experiências relativas a cada cultura levadas a cabo nos solos Pmg e Cb.

#### 2.3.4.1. Número de folhas e área foliar

As contagens do número de folhas abertas e a evolução da área foliar incidiram sempre sobre as mesmas 10 plantas previamente seleccionadas de forma aleatória. Foram contados os folíolos ou as folhas completamente abertos (Abreu, 1987; Craufurd *et al.*, 1993), de três em três dias a partir do dia em que 50% das 10 plantas seleccionadas apresentaram a primeira folha aberta. Apenas foram consideradas as folhas inseridas no caule principal. O fim das experiências ocorreu quando em 50% das plantas seleccionadas foi possível medir a 5ª folha, ou no caso do girassol, o 3º par de folhas (6 folhas). Situações hídricas e térmicas extremas, não permitiram que em algumas experiências fosse possível atingir o número de folhas referidas.

A área foliar foi determinada de três em três dias, de forma não destrutiva, a partir de medições do comprimento e da largura das folhas das 10 plantas seleccionadas. Este método não-destrutivo é rápido e fácil de executar. Igual procedimento tiveram Cormack e Bate (1975), Schneiter (1978), van Arkel (1978) e Abreu (1987). O comprimento foi medido em linha recta entre as extremidades do limbo. A largura foi medida transversalmente ao longo da porção mais larga do limbo, perpendicular à linha que define o comprimento. Para a ervilha e a fava foi medido apenas o limbo de um dos dois folíolos constituintes de cada folha. Nesta medição apenas foi considerada uma das páginas da folha ou do folíolo.

Para estabelecer a relação entre o comprimento e a largura da folha e a respectiva área foliar, foram colhidas 5 plantas de cada espécie estudada, de 6 em 6 dias. Em laboratório mediram-se o comprimento (L, cm) e a largura (W, cm) das folhas, e as respectivas áreas foliares (A, cm<sup>2</sup>) com dois medidores de área foliar, o modelo C1-25A da CID, Inc, e o modelo LI-3000 da *Lambda Instruments Corporation*. Ambos têm uma resolução de 1 mm<sup>2</sup> e o erro para amostras com área superior a 50 cm<sup>2</sup> é menor que 2%. Com o primeiro foram medidas folhas de girassol e com o segundo, folhas das restantes espécies. Cada folha foi medida três vezes e a sua área representada pelo respectivo valor médio.

Analisaram-se de seguida as relações entre A e L × W, utilizando dois modelos lineares na forma:

$$A = a LW + b \quad (\text{cm}^2) \quad (2.4)$$

$$A = k LW \quad (\text{cm}^2) \quad (2.5)$$

O Quadro 2.12 apresenta as rectas de regressão definidas pelas equações 2.4 e 2.5 e respectivos coeficientes de determinação, para as cinco espécies estudadas. Qualquer

Quadro 2.12. Parâmetros das regressões lineares entre a área (A) e o comprimento (L) e largura (W) da folha ou folíolo, para as espécies indicadas, utilizando os dois tipos de modelos lineares. R<sup>2</sup> é o coeficiente de determinação.

ESPÉCIE	A=aLW+b			A=kLW		
	expressão analítica	r <sup>2</sup>	n° observ.	expressão analítica	r <sup>2</sup>	n° observ.
Ervilha	A=0,6890LW+0,0295	0,97	253	A=0,6988LW	0,97	253
Fava	A=0,6904LW+0,3052	0,97	160	A=0,7109LW	0,97	160
Girassol	A=0,6634LW-0,0854	0,95	429	A=0,6579LW	0,95	429
Milho	A=0,6604LW+0,4876	0,98	74	A=0,6781LW	0,98	74
Sorgo	A=0,6038LW+0,2393	0,91	39	A=0,6691LW	0,89	39



das regressões foi significativamente linear, para  $\alpha = 0,0001$  (Teste F), com valores de  $R^2$  idênticos entre os dois modelos. A equação 2.5 foi preferida relativamente à equação 2.4, por não implicar qualquer decréscimo significativo do nível de correlação e, ao mesmo tempo, diminuir o erro cometido na estimativa de áreas foliares pequenas (Cormark e Bate, 1975). A Fig.2.14 mostra graficamente as regressões lineares estabelecidas pela equação 2.4.. Os valores de k relativos ao girassol são semelhantes aos obtidos por Schneiter (1978); ao invés, Pearce *et al.* (1975), van Arkel (1978), Olasantan (1988) e Bollero *et al.* (1996) obtiveram para folhas de milho valores de k superiores 0,70.

#### **2.3.4.2. Medição da temperatura e da humidade do solo**

Para avaliar a influência da temperatura no desenvolvimento foliar, foi considerada representativa da temperatura na zona do meristema apical do milho e do sorgo (monocotiledóneas) a temperatura referente à profundidade de sementeira (ver secção 3.4) Para as restantes espécies (dicotiledóneas) foi utilizada a temperatura média do ar. Igual procedimento tiveram Fortin *et al.* (1994) e Bollero *et al.* (1996) com o milho, Mohamed *et al.* (1988c) com milho painço e com amendoim e Abreu e Campbell (1997) com o trigo.

Em Lisboa, a temperatura do ar foi obtida na estação meteorológica da Tapada da Ajuda. Em Évora foram utilizados os dados de temperatura do ar da estação automática montada no campo experimental.

Os valores médios do teor de água no solo determinados para os cinco centímetros superficiais foram tidos como representativos das condições hídricas que influenciam directamente o desenvolvimento das pequenas plântulas.

### **2.4. Análise dos resultados**

Esta secção apresenta o procedimento analítico adoptado no tratamento dos resultados das experiências de germinação, emergência e estabelecimento, e no estudo do comportamento térmico dos dois solos. O teste F avalia o nível de significância das regressões lineares estabelecidas. Para comparar modelos de regressão, designadamente para avaliar o significado estatístico das diferenças entre duas regressões simples (Draper e Smith, 1981), foi utilizada a Regressão Múltipla. Para avaliar o significado estatístico das diferenças entre médias de amostras com variâncias desiguais, foram realizados testes de significância t Student.

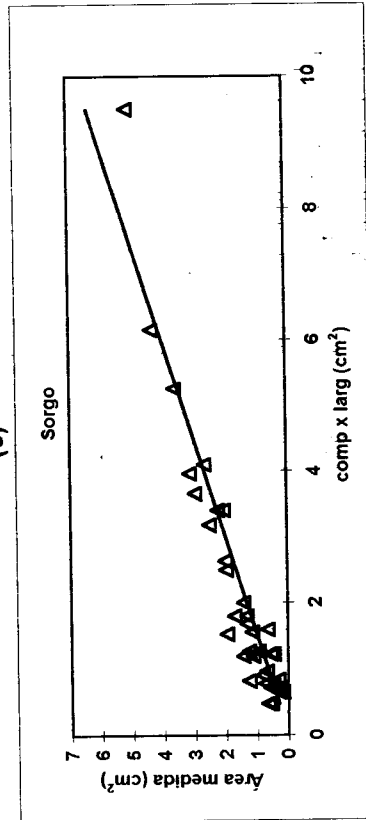
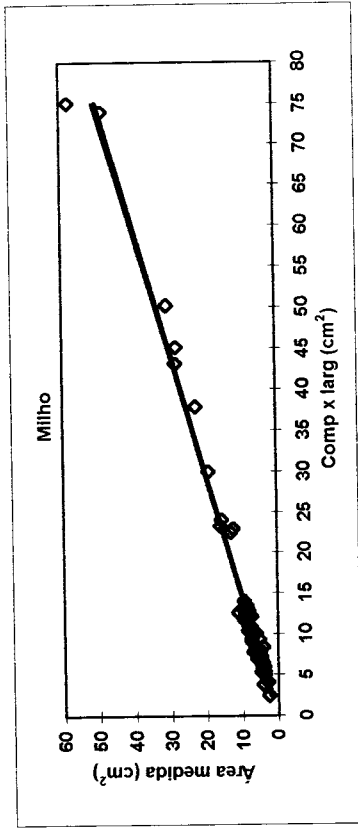
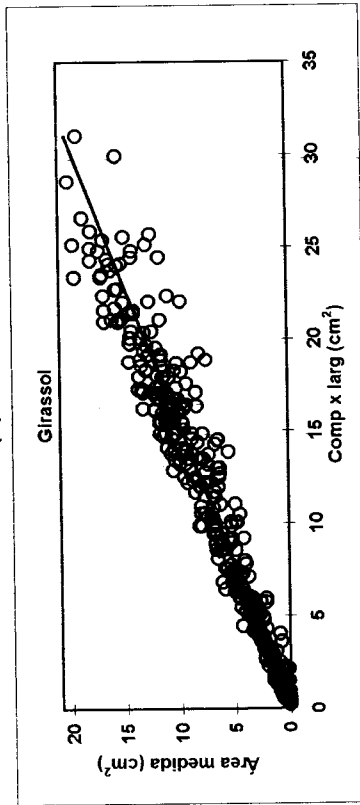
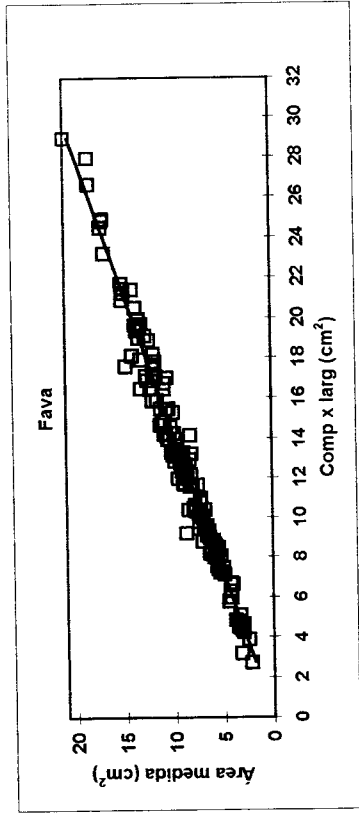
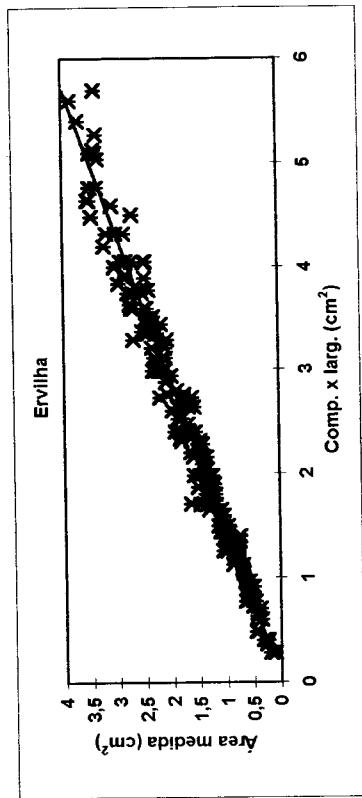


Fig. 2.14. Relação entre a área de uma folha e os respectivos comprimento e largura, para as cinco espécies indicadas. A recta é a respectiva regressão linear, correspondente à equação 2.5.

### 2.4.1. Germinação e emergência

Os resultados sobre a germinação das culturas na placa a qualquer temperatura referem-se a um total de 100 sementes. Os resultados sobre a emergência respeitam às duas áreas contíguas entre si ( $2 \text{ m}^2$  para as culturas outono-invernais e  $5 \text{ m}^2$  para as culturas primaveris) nas quais, em conjunto, foram obtidas percentagens finais de emergência mais elevadas (ver Fig.2.12); desta forma procurou-se minorar efeitos de factores que podem influenciar a quebra à sementeira (uniformidade na técnica de sementeira, ataques de pássaros ou de pequenos mamíferos, etc.). Assim, foram consideradas como total semeado, 160 sementes de ervilha, 120 de tremocilha e de grão, 80 de fava e 100 de girassol, milho e sorgo.

As dimensões da germinação ou da emergência são avaliadas, respectivamente, pela Germinação final e pela Emergência final. A Germinação final ( $G_f$ , em %) a cada temperatura é a fracção de sementes germinadas relativamente ao total de sementes postas a germinar ao longo da correspondente faixa transversal da placa térmica. A Emergência final ( $E_f$ , em %) para cada temperatura média é a fracção de plântulas emergidas relativamente ao total semeado. A variação de  $G_f$  e de  $E_f$  com a temperatura permite delimitar intervalos térmicos ao longo dos quais os seus valores são agronomicamente aceitáveis.

Para temperaturas próximas de  $20^\circ\text{C}$  (culturas outono-invernais) ou entre  $20^\circ\text{C}$  e  $30^\circ\text{C}$  (culturas primaveris)  $G_f$  permite avaliar a capacidade germinativa dos lotes de sementes utilizados (Miguel, 1983). As diferenças entre os valores de  $E_f$  e de  $G_f$  constituem quebras à sementeira associadas, por exemplo, à influência da natureza do substrato (solo), à susceptibilidade das culturas aos patogénicos do solo ou a deformações no desenvolvimento das plântulas pré-emergentes.

O progresso da germinação e da emergência ao longo do tempo, expresso em percentagem do total de sementes utilizadas, constitui a germinação e a emergência acumuladas, das quais  $G_f$  e  $E_f$  são, respectivamente, os valores finais. Contudo, as sementes ou as plântulas de uma amostra germinam ou emergem numa sequência que é independente da temperatura (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a). Por isso, é possível subdividir as amostras em fracções ou do total semeado ou dos totais germinado ou emergido. É preferível exprimir as fracções em função de  $G_f$  ou de  $E_f$  por excluir a influência de sementes não viáveis ou dormentes e de factores “estranhos” que afectam a germinação e emergência (Scott *et al.*, 1984; Abreu e Clark, 1993).

Por interpolação das curvas de germinação e emergência acumuladas, expressas como percentagens de  $G_f$  e  $E_f$ , respectivamente, em função do tempo cronológico foi possível estimar o tempo necessário à germinação da fracção correspondente a 20% da germinação final ( $0,2G_f$ ), da de 50% ( $0,5G_f$ ) e da de 80% ( $0,8G_f$ ) assim como à emergência de 50% da emergência final ( $0,5E_f$ ) e de 80% ( $0,8E_f$ ). Estas fracções foram escolhidas porque:

- 50% é utilizada pela maior parte dos autores (Bierhuizen e Wagenvoort, 1974; Kanemasu *et al.*, 1975; Thompson e Fox, 1976; Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a; Hsu *et al.*, 1984; Hur e Nelson, 1985; Washitani, 1985; Romo e Haferkamp, 1987; Abreu, 1994; Craufurd *et al.*, 1996), provavelmente por estar associada à taxa instantânea máxima de germinação e de emergência;

- 20% e 80% representam fracções limite: 20% permite ultrapassar o menor ajuste inicial da curva sigmoideal de germinação acumulada (Hsu *et al.*, 1984); 80% é uma proporção germinada e emergida considerada satisfatória (Brar e Stewart, 1994), acima dos mínimos agronomicamente aceitáveis (*M.a.a.*) para a maior parte das culturas em estudo (Miguel (1983).

A taxa ou velocidade de um processo ou de uma fase específica de desenvolvimento ( $R$ ) é o inverso da sua duração cronológica ( $t$ , em horas ou em dias). A taxa de germinação,  $R(G)$ , foi calculada para as 3 fracções  $G = 0,2G_f$ ,  $G = 0,5 G_f$  e  $G = 0,8G_f$ . A taxa de emergência das plântulas,  $R(E)$ , foi calculada para as 2 fracções  $E = 0,5E_f$  e  $E = 0,8E_f$ .

As taxas a que decorrem os vários processos do ciclo de desenvolvimento das plantas (germinação, emergência, produção de folhas,...) variam linearmente com a temperatura (James, 1953; Hegarty, 1973; Bierhuizen e Wagenvoort 1974; Monteith, 1977). As relações entre as taxas de germinação,  $R(G)$  e de emergência,  $R(E)$ , das várias fracções e as temperaturas médias ( $T$ , °C) correspondentes às durações ( $t$ ) necessárias à germinação e à emergência das respectivas fracções de germinação ou de emergência foram descritas pelo seguinte sistema de equações (Monteith, 1977; Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a; Mohamed *et al.*, 1988a,b; Ferrão *et al.*, 1996):

$$\begin{aligned} R(G) &= (1/t)(G) = (T - T(G)_{\text{base}}) / \theta(G)_1, & \text{se } T(G)_{\text{base}} \leq T \leq T(G)_{\text{opt}} \\ R(E) &= (1/t)(E) = (T - T(E)_{\text{base}}) / \theta(E)_1, & \text{se } T(E)_{\text{base}} \leq T \leq T(E)_{\text{opt}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$R(G) = (1/t)(G) = (T(G)_{\text{máx}} - T) / \theta(G)_2 \quad \text{se } T(G)_{\text{ópt}} \leq T \leq T(G)_{\text{máx}} \quad (2.7)$$

$$R(E) = (1/t)(E) = (T(E)_{\text{máx}} - T) / \theta(E)_2 \quad \text{se } T(E)_{\text{ópt}} \leq T \leq T(E)_{\text{máx}}$$

$$R(G) = (1/t)(G) = 0 \quad \text{se } T(G)_{\text{máx}} < T < T(G)_{\text{base}} \quad (2.8)$$

$$R(E) = (1/t)(E) = 0 \quad \text{se } T(E)_{\text{máx}} < T < T(E)_{\text{base}}$$

onde  $T(G)_{\text{base}}$  e  $T(E)_{\text{base}}$  são as temperaturas-base,  $T(G)_{\text{máx}}$  e  $T(E)_{\text{máx}}$  as temperaturas máximas,  $T(G)_{\text{ópt}}$  e  $T(E)_{\text{ópt}}$  as temperaturas óptimas (às quais as taxas de germinação ou de emergência são máximas) das fracções G e E;  $\theta(G)_1$  e  $\theta(E)_1$  os tempos térmicos para os intervalos sub-óptimos (entre  $T_{\text{base}}$  e  $T_{\text{ópt}}$ ) e  $\theta(G)_2$ ,  $\theta(E)_2$  os tempos térmicos relativos aos intervalos supra-óptimos (entre  $T_{\text{ópt}}$  e  $T_{\text{máx}}$ ) das respectivas fracções.  $T_{\text{base}}$ ,  $T_{\text{ópt}}$  e  $T_{\text{máx}}$  são as temperaturas cardinais em °C. Abaixo das  $T_{\text{base}}$  ou acima das  $T_{\text{máx}}$  as durações da germinação ou da emergência  $t$  são infinitas. Os tempos térmicos (ou durações térmicas), em unidades de °Cd ou °Ch, representam a temperatura que é necessário acumular (acima  $T_{\text{base}}$  nos intervalos sub-óptimos) ao longo do tempo cronológico para que a germinação ou a emergência ocorram. As  $T_{\text{base}}$  e  $T_{\text{máx}}$  são estimadas a partir das equações (2.6) e (2.7), igualando a zero os valores de R; as  $T_{\text{ópt}}$  foram estimadas a partir da intersecção das rectas definidas pelas equações (2.6) e (2.7).

As equações (2.6) e (2.7) mostram que a evolução da germinação e da emergência dependem da acumulação de temperatura. Por isso, a dispersão da germinação e da emergência foram avaliadas com base na dispersão dos tempos térmicos e não somente na dispersão dos tempos cronológicos (Ellis *et al.*, 1987c).

Para o intervalo sub-óptimo de temperaturas, Jansen (1973) e Covell *et al.* (1986a) para a germinação e Abreu (1987) para a emergência sugeriram que a germinação acumulada e a emergência acumulada são curvas de probabilidade acumulada do tipo Normal de  $\theta$ ; serão curvas normais reduzidas se a germinação acumulada (G) e a emergência acumulada (E) forem expressas como fracções de  $G_f$  e  $E_f$ , respectivamente. A distribuição dos tempos térmicos da germinação para as várias fracções é aproximadamente Normal; para o valor médio ou mais provável do tempo térmico de germinação (ou de emergência), que corresponde a  $G_{0,5}$  (ou  $E_{0,5}$ ), a taxa térmica instantânea de germinação  $dG/d\theta(G)$  ou de emergência  $[dE/d\theta(E)]$  é máxima (quantidade de sementes a germinar ou emergir por unidade de temperatura acumulada

é máxima). Numa situação deste tipo, o desvio-padrão da distribuição de frequências dos tempos térmicos pode ser tomado como uma medida da dispersão da germinação ou emergência.

A análise *probit* (*probit analysis*) foi utilizada para avaliar as curvas de germinação e emergência acumuladas em função da temperatura acumulada e para estimar o desvio-padrão da distribuição de frequências dos tempos térmicos se esta for do tipo Normal. Através da análise *probit* a curva de probabilidade de uma variável (Y) é transformada numa relação linear entre *probit* (Y) e a variável independente X (Finney, 1971). Para temperaturas entre a  $T(G)_{base}$  ou a  $T(E)_{base}$  e a  $T(G)_{opt}$  ou a  $T(E)_{opt}$  de cada cultura (porque as temperaturas ambientais se situam normalmente nesta gama), as curvas acumuladas da germinação e da emergência, foram transformadas em relações lineares entre *probit* (G) [ou *probit* (E)] e os tempos térmicos  $\theta_1$  (G) [ou  $\theta_1$  (E)]:

$$Probit (G) = C + \frac{\theta_1 (G)}{\sigma} \quad (2.9)$$

$$Probit (E) = C + \frac{\theta_1 (E)}{\sigma}$$

onde *probit* (G) [ou *probit* (E)] é o valor da função inversa da Normal reduzida para a probabilidade representada pela fracção G (ou E) ;  $1/\sigma$  é o declive da recta de regressão e  $\sigma$  (°Cd) é o desvio padrão da distribuição de frequências dos tempos térmicos da população considerada; C é o valor de *probit* (G) [ou *probit*(E)] correspondente a um tempo térmico nulo (corresponde, graficamente, à intercepção da recta com o eixo *probit* (G) ou *probit* (E)). Sempre que não for possível o cálculo da  $T_{opt}$  para definir o intervalo sub-óptimo de temperaturas, o limite térmico superior da gama em análise será a temperatura a que corresponde a taxa máxima medida (de germinação ou de emergência). Este procedimento foi também seguido por Covell *et al.* (1986a) e por Ellis *et al.* (1987c) no estudo do comportamento germinativo de várias leguminosas (grão de bico, soja, lentilha e fava).

A equação anterior permite obter o valor do tempo térmico ( $\theta_1$ ) para qualquer fracção germinada (ou emergida), pois

$$\theta_1 (G) = [probit (G)-C]\sigma \quad (2.10)$$

$$\theta_1 (E) = [probit (E)-C]\sigma$$

Se esta equação for substituída em (2.6) obtém-se uma única expressão para a taxa de germinação ou de emergência em função da temperatura, para qualquer fracção de sementes germinada (ou plântulas emergidas):

$$R(G) = 1/t(G) = (T - T_{base})(G) / \{ [probit(G) - C] \sigma \} \quad [T_{base}(G) \leq T \leq T_{opt}(G)] \quad (2.11)$$

$$R(E) = 1/t(E) = (T - T_{base})(E) / \{ [probit(E) - C] \sigma \} \quad [T_{base}(G) \leq T \leq T_{opt}(E)]$$

Os parâmetros do modelo *probit* foram estimados pelo método da máxima verosimilhança. O nível de ajustamento do modelo pode ser avaliado pelo cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ):

$$R^2_{probit} = 1 - [(1/N) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2] / [(1/N) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2] \quad (2.12)$$

onde  $y_i$  representa os valores observados da germinação ou da emergência acumulada,  $\hat{y}$  os valores estimados a partir da análise *probit*,  $\bar{y}$  a média dos valores observados e N o número de contagens efectuado entre a sementeira e a germinação final ( $G_f$ ) ou a emergência final ( $E_f$ ).

Para o estudo da dispersão da germinação, utilizou-se o modelo *probit* do programa STATISTICA (da *StatSoft, Inc.*); para a emergência utilizou-se o modelo *probit* do programa GENSTAT5 (*Laws Agricultural Trust, 1992*). Os valores de G ou de E utilizados foram expressos em função de  $G_f$  e de  $E_f$ . Os tempos térmicos foram estimados a partir da equação (2.6) uma vez conhecida a  $T_{base}$ , representativa da amostra em questão.

A influência do teor de água no solo sobre a emergência das culturas foi avaliada a partir da definição prévia de três gamas de humidade: teores de humidade inferiores a 50% da Capacidade Utilizável (C.U.), teores superiores à Capacidade de Campo (C.C.) e teores intermédios (entre 50% da C.U. e a C.C.).

#### 2.4.2. N° de folhas e área foliar

O estabelecimento de cinco culturas nos solos Pmg e Cb foi estudado com base na produção de folhas (até à 5ª folha ou ao 3º par de folhas, no caso do girassol) e nas respectivas áreas foliares. Calculou-se o tempo cronológico necessário à produção de

cada uma das cinco primeiras folhas, as respectivas taxas de aparecimento ou de produção e do tempo térmico necessário à produção de uma folha (filocrão, do inglês *phyllochron*), em °C dia folha<sup>-1</sup>. Além disso, analisou-se a evolução da área foliar ao longo do tempo cronológico e da temperatura acumulada.

Para o cálculo da temperatura média entre a sementeira e a produção de uma folha de ordem n, ou até à medição da área foliar, considerou-se a temperatura do solo à profundidade de sementeira até à emergência (para 0,5E<sub>f</sub>) e a temperatura do meristema apical entre a emergência e a produção da folha de ordem n (temperatura do ar nas dicotiledóneas e temperatura do solo nas monocotiledóneas)

O tempo necessário à produção de uma folha de ordem n (n entre 1 e 5) corresponde ao período de tempo entre a sementeira e o dia em que tal folha se apresenta aberta em pelo menos 50% das plantas seleccionadas. A taxa de produção de uma folha é o recíproco desse tempo.

A relação entre as taxas de produção de cada uma das cinco primeiras folhas e as respectivas temperaturas médias pode ser descrita através do uso das equações (2.6), (2.7) e (2.8) para qualquer fracção de uma população ou de uma amostra de plantas (Monteith, 1977; Leong e Ong, 1983; Ong 1983; Mohamed *et al.*, 1988b):

$$R(F) = (1/t)(n) = (T - T(F)_{\text{base}}) / \theta(F)_1, \quad \text{se } T(F)_{\text{base}} \leq T \leq T(F)_{\text{ónt}} \quad (2.13)$$

$$R(F) = (1/t)(n) = (T(F)_{\text{máx}} - T) / \theta(F)_2 \quad \text{se } T(F)_{\text{ónt}} \leq T \leq T(F)_{\text{máx}} \quad (2.14)$$

$$R(F) = (1/t)(F) = 0 \quad \text{se } T(F)_{\text{máx}} < T < T(F)_{\text{base}} \quad (2.15)$$

onde  $T(F)_{\text{base}}$ ,  $T(F)_{\text{máx}}$ ,  $T(F)_{\text{ónt}}$  são as temperaturas cardinais para a produção de uma folha de ordem n e  $\theta(F)_1$ ,  $\theta(F)_2$  são os respectivos tempos térmicos necessários à sua produção. Para cada uma das cinco primeiras folhas de cada cultura em estudo foram calculadas as respectivas taxas de produção correspondentes à 50% das plantas seleccionadas.

A influência do teor de água no solo na produção e expansão foliares foi avaliada com base nas mesmas três gamas de humidade em que assentou o estudo da influência do teor de água no solo na emergência.



A área foliar de cada folha de ordem  $n$ , ( $A_n$ ), foi calculada a partir das rectas de calibração obtidas (secção 2.3.4.1). A área foliar total por planta ( $AF$ ), expressa em  $\text{cm}^2$ , é a soma das áreas foliares das  $n$  folhas ( $n = 1$  a  $5$ ):

$$AF = \sum_{n=1}^5 A_n \quad (2.16)$$

### **2.4.3. Comportamento térmico dos solos**

A análise do comportamento térmico dos solos compreende o estudo da variação temporal diária e anual da temperatura a cada profundidade e das características de propagação da onda térmica ao longo do perfil, e também a discussão das causas da variação do campo das temperaturas num solo.

#### **2.4.3.1. Organização dos dados**

O campo de temperaturas do solo depende das transferências energéticas que ocorrem à superfície e das propriedades térmicas do solo (Buchan, 1982; Hillel, 1998). A variação diária e anual da temperatura de uma camada de solo acompanha a variação da radiação líquida à superfície do solo. Em cada um destes ciclos (diário e anual), a temperatura da camada aumenta com o aumento da radiação líquida devido à radiação solar e diminui com a diminuição da radiação líquida na ausência (ou redução) de radiação solar. Por isso, a temperatura da camada reflecte a evolução das condições meteorológicas (Geiger, 1961), nomeadamente da nebulosidade. Por outro lado, as propriedades térmicas do solo (capacidade calorífica volumétrica, condutividade e difusividade térmicas) dependem fundamentalmente do teor de água no solo e do tipo de solo.

A variação da temperatura às várias profundidades do solo e o amortecimento da onda térmica em profundidade foram estudados para ciclos anuais completos e para dias ou conjuntos de dias representativos de diferentes situações de teor de água no solo, insolação astronómica e nebulosidade.

#### **Análise dos dados em função da humidade do solo, da insolação astronómica e do grau de nebulosidade**

Nos dois tipos de solo, o teor de humidade de cada camada de solo foi a média aritmética dos teores relativos aos três perfis hídricos medidos. O teor de água relativo a camadas de espessura múltipla (por ex., 0 a 10 cm, 0 a 15 cm, 0 a 20 cm, 15 a 25 cm ou

0 a 25 cm) foi a média ponderada dos teores relativos às camadas (de 5 cm de espessura) que a constituem.

A influência do teor de água do solo na variação da temperatura ao longo do dia e no amortecimento da onda térmica ao longo do perfil, foi estudada em função do teor médio de humidade e da distribuição de humidade ao longo do perfil. O teor médio de humidade medido nos 25 cm superficiais de cada solo foi classificado em três classes: humidade baixa (Hb), para teores próximos do Coeficiente de Emurchecimento (em qualquer caso inferiores a 50% da Capacidade Utilizável); humidade média (Hm), para teores de humidade próximos de 50% da Capacidade Utilizável (em qualquer caso inferiores à Capacidade de Campo); humidade elevada (He) para teores iguais ou superiores à Capacidade de Campo.

A distribuição dos valores das propriedades térmicas ao longo do perfil, depende da distribuição do teor de água em profundidade. Por isso, foram considerados três tipos de perfis em função da distribuição do teor de água ao longo do perfil: em fase de humedecimento (PH ou perfis H), quando o teor de água no solo decresceu em profundidade; em fase de secagem (PS ou perfis S) quando o teor de água aumentou ao longo do perfil; teor de água uniforme ao longo do perfil (PU ou perfis U), sempre que não foram evidentes gradientes significativos ao longo do perfil (Desvio Padrão  $< 0,0005 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ).

Para o estudo da influência do comprimento do dia (insolação astronómica) no comportamento térmico dos solos, foram definidos três tipos de dias: dias longos (DL ou dias L), próximos do solstício de Junho; dias curtos (DC ou dias C), próximos do solstício de Dezembro e dias médios (DM ou dias M), próximos dos equinócios (Março ou Setembro).

Para analisar a influência da nebulosidade no comportamento térmico dos solos foram definidos 4 dias-tipo relativos a outros tantos níveis de nebulosidade medidos entre o nascer e o pôr-do-sol: dia I (céu limpo ou quase limpo); dia P (céu pouco nublado), dia M (céu muito nublado) e dia N (céu encoberto).

A partir dos dados de humidade do solo e da insolação astronómica, foram definidos nove ciclos diários-tipo (conjuntos de 5 a 10 dias consecutivos ao longo dos quais a humidade do solo e as condições meteorológicas se mantiveram aproximadamente constantes), representativos das combinações possíveis entre três níveis de humidade do solo (Hb, Hm e He) e três níveis de insolação astronómica (C, M e L). A nebulosidade média para oito dos nove dias-tipo definidos em cada solo foi

cerca de quatro oitavos enquanto que para o dia L-Hb foi de cerca de dois oitavos. O Quadro 2.13 apresenta os símbolos que definem os 9 dias-tipo assim como os períodos a que se referem, os teores médios de humidade para cada período e respectivo desvio-padrão.

Em qualquer dos dias representativos de quatro níveis de nebulosidade (I, P, M e N) o teor de água no solo é médio (Hm) e o comprimento do dia (insolação astronómica) é de aproximadamente 12 horas (DM) (Quadro 2.14). Em Évora (solo Pmg) os dias considerados apresentaram os seguintes níveis de nebulosidade, de acordo com os valores (em oitavos de céu coberto) registados, respectivamente, às 6h, 12h e 18h: 1-1-2 (dia I); 2-4-2 (dia P); 5-3-7 (dia M); 7-7-7 (dia N). No solo Cb, os dias considerados apresentaram os seguintes níveis de insolação real: 0% (dia N); 36% (dia M); 50% (dia P); 76% (dia I).

Por fim, foram estudados 3 ciclos anuais completos: 1994 no solo Cb e 1995 nos solos Pmg e Cb.

#### **Medição da temperatura à superfície do solo**

A temperatura à superfície do solo é uma condição fronteira fundamental em modelos de interação entre a atmosfera e o solo (Katul e Parlange, 1993). Esta interface dinâmica é influenciada por processos, variáveis no tempo e no espaço, que ocorrem no solo e no ar imediatamente acima (Ham e Senock, 1992). Por isso se torna difícil instalar e manter um sensor em equilíbrio térmico com a superfície sem alteração da sua própria temperatura. A junção de medição dos termopares quando colocada à superfície do solo é sujeita frequentemente a aquecimento ou arrefecimento por radiação, convecção ou condução, traduzindo-se numa fonte de erro importante (Otter, 1968; Fritschen e Gay, 1979; Taylor e Jackson, 1986). Por exemplo, a meio do dia Fuchs e Tanner (1967a,b) mediram a partir de termopares colocados à superfície, valores de temperatura 2 a 4°C superiores aos registados por termómetros infravermelhos. O fraco contacto térmico do termopar com o solo é outra fonte importante de erro (Taylor e Jackson, 1986; Ham e Senock, 1992), assim como o aquecimento ou arrefecimento do sensor devido ao vento (Stringer, 1972).

Por estas razões, foram analisados separadamente dois perfis térmicos:

**Perfil Completo (PT1).** Engloba, para qualquer solo, as medições dos sensores colocados à superfície e às profundidades de 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 16 cm e 32 cm.

**Perfil Parcial (PT2).** Relativamente a PT1, exclui as medições referentes à superfície do solo, pelo que é composto por 6 profundidades.

**QUADRO 2. 13. Conjuntos de dias representativos de 9 combinações entre três níveis de humidade do solo e três níveis de insolação astronómica e respectivos teores de humidade:**

C- Dia curto; M- Dia médio; L- Dia longo; Hb - Humidade baixa; Hm; Humidade média; He- Humidade elevada; D.P. - Desvio Padrão ao longo do perfil médio de humidade para o período indicado

Solo	Dia	Ano	Período	Teor de água no solo		
				Média (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	D.P.	Nº de Medições no período
Pmg	C-Hb	1995	3 a 8 Nov	0,09	0,004	2
	C-Hm	1994	23 a 28 Nov	0,18	0,030	3
	C-He	1995	16 a 25 Dez	0,29 \	0,004	3
	M-Hb	1995	18 a 25 Set	0,09	0,028	2
	M-Hm	1995	16 a 20 Mar	0,19	0,029	2
	M-He	1996	12 a 18 Mar	0,26	0,020	2
	L-Hb	1994	17 a 26 Jun	0,10	0,856	3
	L-Hm	1994	27Mai a 1Jun	0,19	0,026	3
	L-He	1994	15 a 24Mai	0,27	0,017	3
Cb	C-Hb	1995	9 a 16 Jan	0,39	0,067	3
	C-Hm	1994	20 a 27 Dez	0,42	0,031	2
	C-He	1995	18 a 27 Dez	0,49	0,005	3
	M-Hb	1995	19 a 26 Set	0,29	0,031	4
	M-Hm	1996	18 a 24 Mar	0,46	0,061	3
	M-He	1996	7 a 15 Mar	0,52	0,022	3
	L-Hb	1996	27 Jun a 6 Jul	0,21	0,130	3
	L-Hm	1996	21 a 25 Mai	0,40	0,060	4
	L-He	1996	15 a 20Mai	0,45	0,021	2

**QUADRO 2.14.** Dias representativos de quatro níveis de nebulosidade (em oitavos de céu coberto) ou de insolação real (em %) e respectivos teores médios de humidade do solo em Évora (Solo Pmg) e Lisboa (Solo Cb)

Local	Data			Nebulosidade			Dia Tipo	Teor de água no solo	
	Ano	Mês	Dia	6h	12h	18h		Média	DP
	(oitavos)						(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )		
Évora	1996	Mar	29	1	1	2	I	0,19	0,020
	1995	Mar	18	2	4	2	P	0,18	0,016
	1996	Mar	22	5	3	7	M	0,21	0,015
	1996	Mar	31	7	7	7	N	0,20	0,021

Local	Data			Insolação Real (%)	Dia Tipo	Teor de água no solo	
	Ano	Mês	Dia			Média	DP
							(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )
Lisboa	1996	Mar	28	76	I	0,37	0,030
	1996	Mar	25	50	P	0,46	0,029
	1996	Mar	20	36	M	0,46	0,028
	1996	Mar	15	0	N	0,49	0,028

#### 2.4.3.2. Metodologia (Teoria)

A variação diária e anual da temperatura à superfície acompanha as variações da irradiância solar, pelo que tem um carácter periódico (van Wijk, 1963; Lettau, 1964). A condutividade e difusividade térmicas do solo limitam o alcance da onda térmica em profundidade e retardam a sua propagação (Monteith, 1975; Buchan, 1982; Hillel, 1998). Por isso, a amplitude térmica decresce com a profundidade e os extremos térmicos ocorrem com atraso crescente.

#### Variação da temperatura do solo

A aplicação da análise harmónica ao estudo da temperatura do solo pretende reproduzir o carácter periódico que caracteriza a variação diária e anual da temperatura do solo, sendo por isso um instrumento importante na simulação deste parâmetro. A representação da variação harmónica da temperatura do solo tem sido analisada em numerosos trabalhos, recorrendo quer a harmónicas simples, quer à conjugação de várias harmónicas (séries de funções seno e cosseno - séries de Fourier). A representação sinusoidal simples (1ª harmónica de Fourier) é de execução muito fácil pela simplicidade dos cálculos e pelo pequeno número de determinações a realizar e foi ensaiada, entre outros, por Flucker (1958), de Vries e Philip (1986), Jansson (1991), Andrade *et al.* (1993) e Streck *et al.*, (1996). Exemplos de aplicação da séries de Fourier para simular a oscilação diária da temperatura do solo encontram-se nos trabalhos de Ghuman e Lal (1982) para duas profundidades e sob diferentes coberturas do solo, de Horton e Wierenga (1983) para perfis irrigados e não irrigados e sob cultura de cereais, de Gupta *et al.* (1984) ao avaliarem a influência da mobilização superficial do solo e dos resíduos na variação térmica diária até 30 cm de profundidade. Carson (1963), Kalma (1971), Krishman e Kushwaha (1972), Hayhoe *et al.* (1987), Bootsma (1989), Figueiredo e Gonçalves (1991) e Andrade e Abreu (em publicação) simularam a variação anual da temperatura em diferentes climas e latitudes.

Em ambos os solos, as variações da temperatura foram simuladas através do desenvolvimento de séries de Fourier. A forma geral destas séries, que representa a variação periódica da temperatura ao longo do tempo,  $T(t)$ , num ciclo diário ou anual, a uma profundidade qualquer do solo é:

$$T(t) = T_{\text{méd}} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (2.17)$$

onde  $T_{\text{méd}}$  é a temperatura média para o ciclo considerado,  $n$  o número de ordem da harmónica ( $n=1$  é a primeira harmónica, considerada como a representação sinusoidal

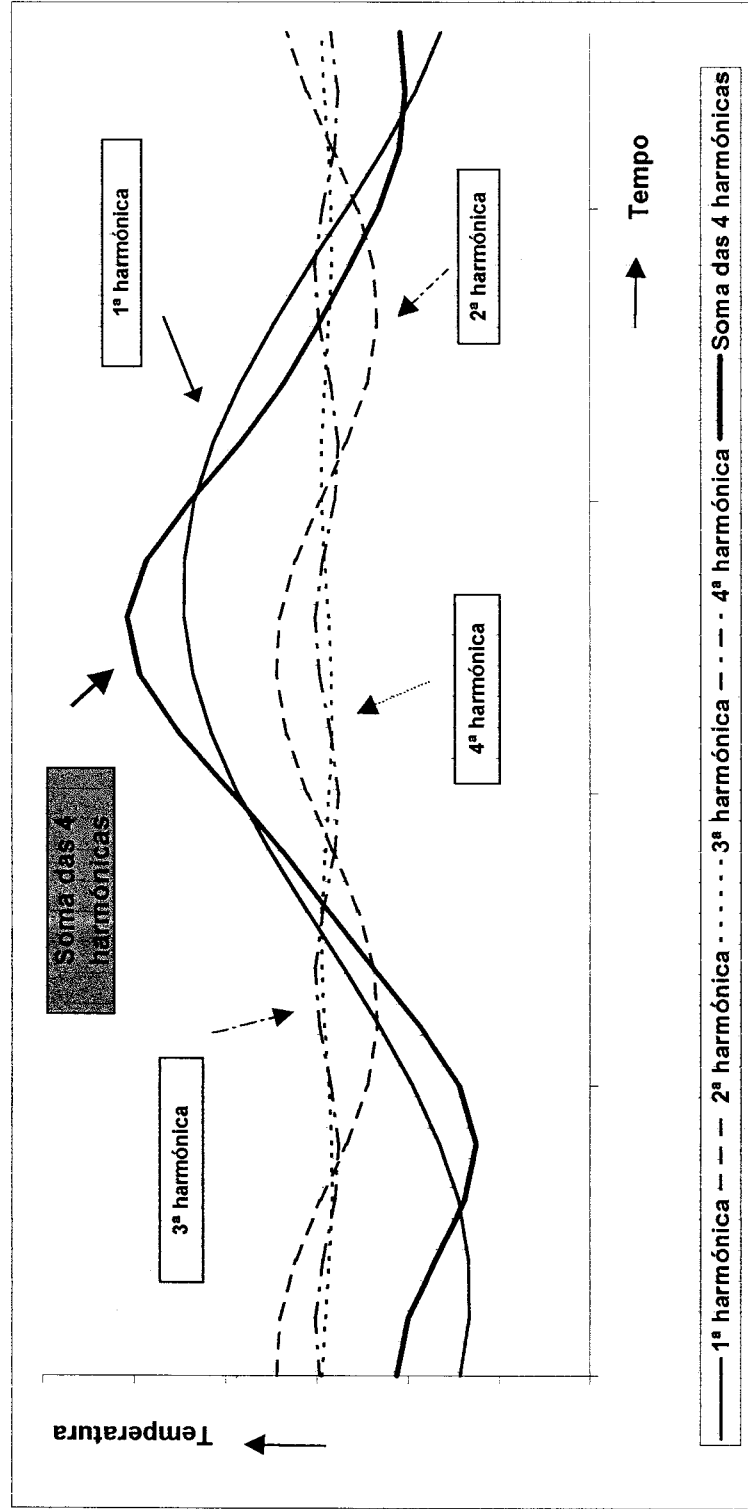


Fig. 2.15. Sobreposição de 4 harmônicas com diferentes frequências e amplitudes

simples),  $A_n$  e  $B_n$  as semi-amplitudes dos vários termos da série e  $\omega$  a frequência angular da oscilação térmica dada por  $2\pi/P$  onde  $P$  é o período do ciclo considerado (24 horas para o dia e 365 dias para o ano).

A equação (2.17) também pode ser expressa como:

$$T(t) = T_{\text{méd}} + \sum_{n=1}^{\infty} [C_n \text{sen}(n\omega t + \phi_n)] \quad (2.18)$$

onde  $C_n$  é a semi-amplitude ( $T_{\text{máx}} - T_{\text{méd}}$  ou  $T_{\text{méd}} - T_{\text{mín}}$ ) da harmónica  $n$ , dada por

$$C_n = (A_n^2 + B_n^2)^{1/2} \quad (2.19)$$

e  $\phi_n$  o respectivo ângulo de fase:

$$\phi_n = \tan^{-1}(A_n/B_n) \quad (2.20)$$

O número  $n$  de harmónicas necessário para uma boa descrição do curso da temperatura (diário ou anual) corresponde a uma forma da equação (2.18) – sobreposição das  $n$  harmónicas – capaz de explicar uma percentagem elevada da variância dos valores observados. A sobreposição das quatro primeiras harmónicas da equação 2.17 ou 2.18 está arbitrariamente representada na Fig. 2.15.

A percentagem de variância explicada por cada uma das três primeiras harmónicas é dada por:

$$\% \text{Variância} = \frac{(C_n^2/2)}{S_T^2} \times 100 \quad (2.21)$$

e para a 4ª harmónica é

$$\% \text{Variância} = \frac{(C_n^2)}{S_T^2} \times 100 \quad (2.22)$$

onde  $S_T^2$  é a variância em torno de  $T_{\text{méd}}$  das séries de valores de temperatura medidos no ciclo considerado (Panofsky e Brier, 1958).

#### **Amortecimento da onda térmica**

A penetração em profundidade da onda térmica por condução no interior do solo é amortecida, porque uma certa quantidade de calor é absorvida pelos seus constituintes ao longo do trajecto de propagação de energia. Em consequência, as amplitudes decrescem e os extremos térmicos atrasam-se.

Considere-se uma camada homogénea e isotrópica de solo, isto é, cujas propriedades térmicas se mantêm constantes em profundidade, sem fontes nem sumidouros internos de energia de forma a que a temperatura a qualquer



profundidade ( $z$ ) e instante  $t$ ,  $T(z,t)$  oscile em torno de um valor médio  $T_{\text{méd}}$  único e independente de  $z$ , tal que, se  $\lim_{z \rightarrow \infty} T(z,t) = T_{\text{méd}}$ , e a variação térmica à superfície ( $z=0$ )

(condição-fronteira superior) for descrita por

$$T(0,t) = T_{\text{méd}} + \sum_{n=1}^{\infty} [C_{0,n} \cdot \text{sen}(n\omega t + \phi_{0,n})] \quad (2.23)$$

a solução da 2ª equação de condução de calor (eq. 1.7) assume a seguinte forma geral:

$$T(z,t) = T_{\text{méd}} + \sum_{n=1}^{\infty} [C_{z,n} \text{sen}(n\omega t + \phi_{z,n} - zn^{1/2}/D_1)] \quad (2.24)$$

$C_{z,n}$  é a semi-amplitude para a profundidade  $z$  e harmónica  $n$  dada por

$$C_{z,n} = C_{0,n} \exp(-z n^{1/2}/D_1) \quad (2.25)$$

ou

$$C_{z,n} = C_{0,n} \exp(-z/D_n),$$

onde  $C_{0,n}$  é a semi-amplitude da harmónica  $n$  à superfície,  $D_1$  é a profundidade de amortecimento da harmónica fundamental (1ª harmónica), dada por

$$D_1 = (2\alpha/\omega)^{1/2} \quad (2.26)$$

e  $D_n$  a profundidade de amortecimento da harmónica  $n$ .

$\phi_{z,n}$  é o ângulo de fase para a profundidade  $z$  e harmónica  $n$  e que é dado por

$$\phi_{z,n} = \phi_{0,n} - z n^{1/2}/D_1 \quad (2.27)$$

ou

$$\phi_{z,n} = \phi_{0,n} - z/D_n$$

onde  $\phi_{0,n}$  é o ângulo de fase à superfície para a harmónica  $n$ ,  $\alpha$  é a difusividade térmica do solo. Esta representação harmónica da variação da temperatura assume que a amplitude térmica do ciclo, diário ou anual, decresce exponencialmente com o aumento da profundidade (equação 2.25) e que o atraso da onda térmica aumenta linearmente com a profundidade (equação 2.27).

A onda térmica é amortecida mais rapidamente (a profundidades mais reduzidas) à medida que aumenta o número de ordem  $n$  das harmónicas. Se as equações (2.25) ou as equações (2.27) forem combinadas entre si, para as condições definidas para a equação 2.24 (perfil uniforme) a relação entre a profundidade de amortecimento de qualquer harmónica e a relativa à harmónica fundamental virá:

$$D_n = D_1/n^{1/2} \quad (2.28)$$

A profundidade de amortecimento ( $D$ ) é uma característica física de cada tipo de solo, pois está intimamente ligada à difusividade térmica, e governa a profundidade de penetração das “ondas térmicas”. Por exemplo, para a 1ª harmónica,  $D_1$  é a profundidade em que a amplitude da onda é de cerca de 0,37 vezes a amplitude à superfície. À profundidade  $z = 3D_1$  a flutuação de temperatura da 1ª harmónica é cerca de 5% da verificada à superfície sendo por isso tomada como a profundidade efectiva de penetração (Peixoto e Oort, 1992). À profundidade  $z = \pi D_1$ , a onda térmica está exactamente fora de fase com a onda à superfície, ou seja, quando a temperatura superficial atinge um máximo, a temperatura é mínima àquela profundidade.

A estimativa de  $D$  para qualquer harmónica pode ser feita a partir das equações de amplitude ou de fase (2.25 e 2.27), ou a partir do conhecimento da difusividade térmica, medida (Van Wijk e Derksen, 1966; Bristow, 1998) ou calculada (Carson, 1963; Wierenga *et al.*, 1969; Seemann, 1979; Asrar e Kanemasu, 1983; Horton *et al.*, 1983; Nassar e Horton, 1990).

A estimativa da profundidade de amortecimento a partir das equações (2.25) e (2.27) assenta na invariância das propriedades térmicas em toda a extensão do perfil do solo. Contudo, em solos reais, as propriedades térmicas não são constantes ao longo do perfil nem ao longo do tempo. A difusividade térmica depende das características morfológicas, texturais e estruturais do perfil e, sobretudo do seu teor em humidade (Nakshsbandi e Kohnke, 1974; de Vries, 1975; Monteith e Unsworth, 1990). A heterogeneidade do perfil é maior em solos nus e na camada mais superficial (Wierenga *et al.*, 1969; Horton *et al.*, 1983), principalmente em áreas irrigadas (Mathias e Warrick, 1987) e em solos de regiões semi-áridas onde a camada superior do solo seca rapidamente (Passerat de Silans *et al.*, 1996). A teoria da transferência de calor em solos não-uniformes desenvolvida por Lettau (1954) foi usada, entre outros, por Nassar e Horton (1989, 1990). Estes autores estimaram a difusividade térmica como uma média ponderada das difusividades relativas a cada harmónica, calculadas a partir das respectivas equações de amplitude e de fase, tendo em conta a contribuição relativa de cada harmónica para a variância total ( $S_T^2$ ).

As profundidades de amortecimento ( $D$ ) dos dois tipos de solos foram estimadas para os 13 dias-tipo e para os três ciclos anuais atrás definidos. Por isso,  $D$  foi analisada em função do teor de humidade do solo, da insolação astronómica e da nebulosidade. Os valores de  $D$  foram obtidos a partir das amplitudes térmicas medidas às várias profundidades e a partir das amplitudes térmicas ( $C_{z,n}$ ) e dos ângulos de fase ( $\phi_{z,n}$ )

estimados através da análise harmónica. Se forem aplicados logaritmos aos dois termos da equação (2.25),  $D$  é o inverso do declive da relação linear entre os logaritmos das amplitudes e  $z$ . Para o cálculo de  $D$  a partir dos ângulos de fase foi usada a equação (2.27).

### 3. ESTABELECIMENTO: RESULTADOS

#### 3.1. Germinação

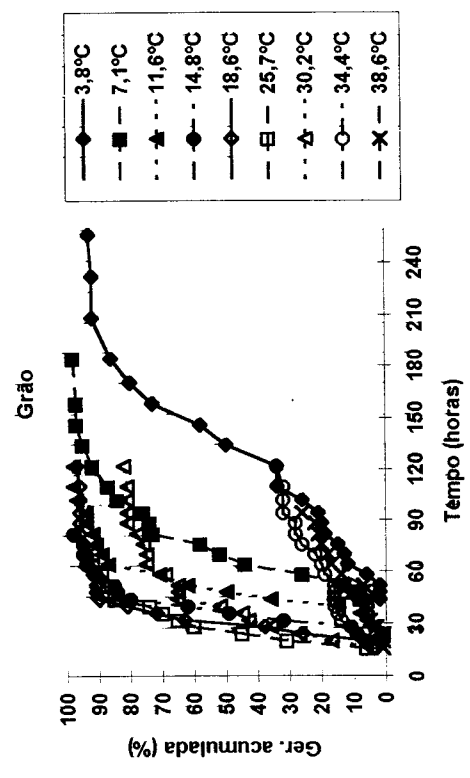
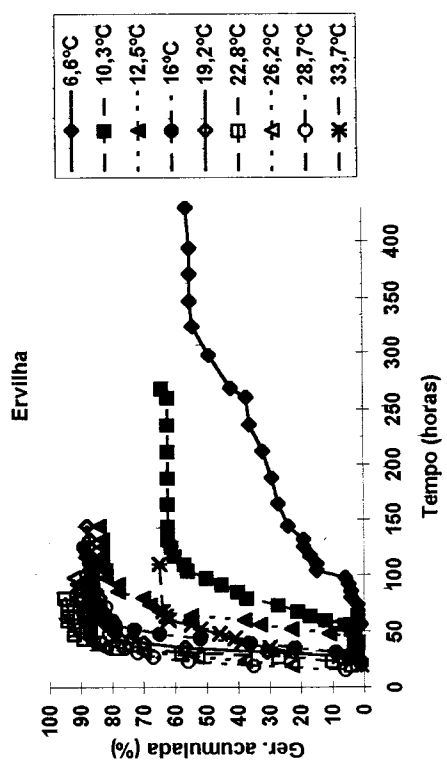
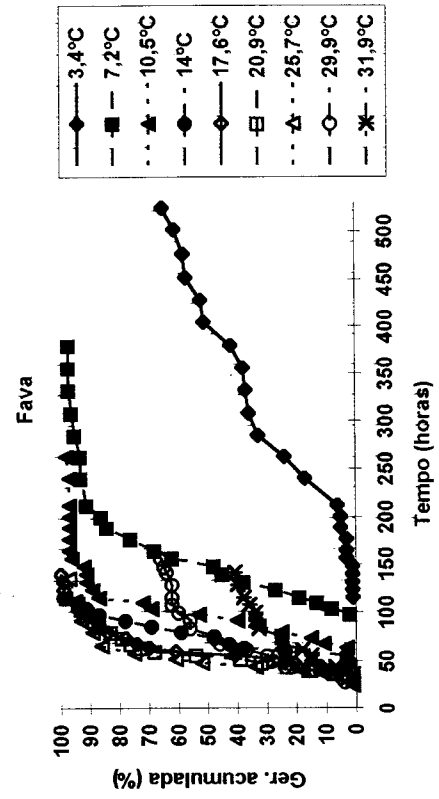
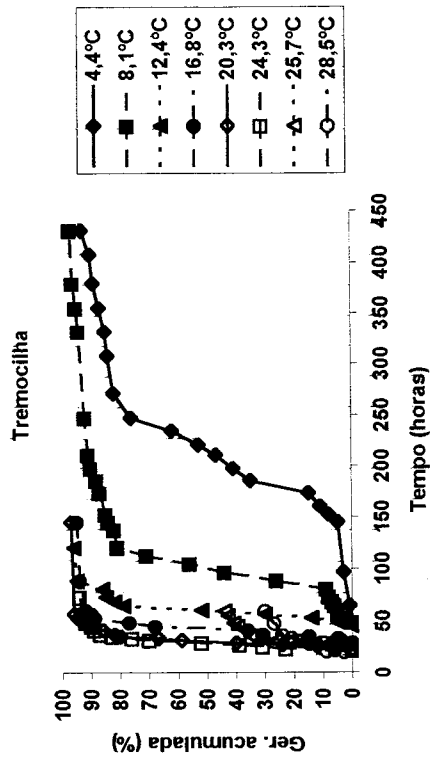
Apresentam-se aqui os resultados de medições da germinação a temperaturas constantes e controladas, na placa de gradiente térmico.

A **dimensão** das populações germinadas é avaliada através da germinação final. Para os intervalos sub-ótimo e supra-ótimo de temperatura foram estimados os tempos térmicos e as temperaturas cardinais a partir das regressões lineares estabelecidas entre as **taxas** (ou velocidades, em horas<sup>-1</sup> ou dias<sup>-1</sup>) medidas para 20%, 50% e 80% da germinação final e a temperatura. A **dispersão** da germinação de uma amostra de sementes é avaliada a partir da germinação acumulada em função do tempo térmico.

##### 3.1.1. Germinação acumulada

A Fig. 3.1 apresenta a germinação acumulada (expressa em percentagem de sementes utilizadas) das sete culturas em estudo para diferentes temperaturas. Germinaram sementes de ervilha entre 6,6°C e 33,7°C, de tremocilha entre 4,4°C e 28,5°C, de grão entre 3,8°C e 38,6°C, de fava entre 3,4°C e 31,9°C, de girassol entre 3,3°C e 39,3°C, de milho entre 11,1°C e 40,1°C e de sorgo entre 10°C e 42°C.

Em cada amostra as sementes não germinaram em simultâneo. As curvas de germinação acumulada em função do tempo cronológico têm uma forma aproximadamente sigmoideal. Consequentemente, para uma gama térmica mais ou menos extensa, a germinação da população de sementes é mais lenta numa primeira fase, mais rápida nas fracções intermédias (mais sementes germinadas por unidade de tempo) e de novo mais lenta para o conjunto das últimas sementes germinadas até o valor da germinação acumulada igualar a germinação final ( $G_f$ ). Estes resultados confirmam os obtidos por vários autores para diferentes culturas: alfalfa (Larsen, 1965), soja (Pollock, 1972), *Veronica arvensis* L. (Janssen, 1973), *Setaria lutescens* (Weigel) Hubbard e *Amaranthus retroflexus* (Schimpf *et al.*, 1977), milho painço (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a; Mohamed *et al.*, 1988a), cana de açúcar (Gummerson, 1986), amendoim (Mohamed *et al.*, 1988a), tomate (Dahal *et al.*, 1990a), alface, alfalfa e nabo (Hageseth e Cody, 1993) ou cultivares de colza (Marshall e Squire, 1996).



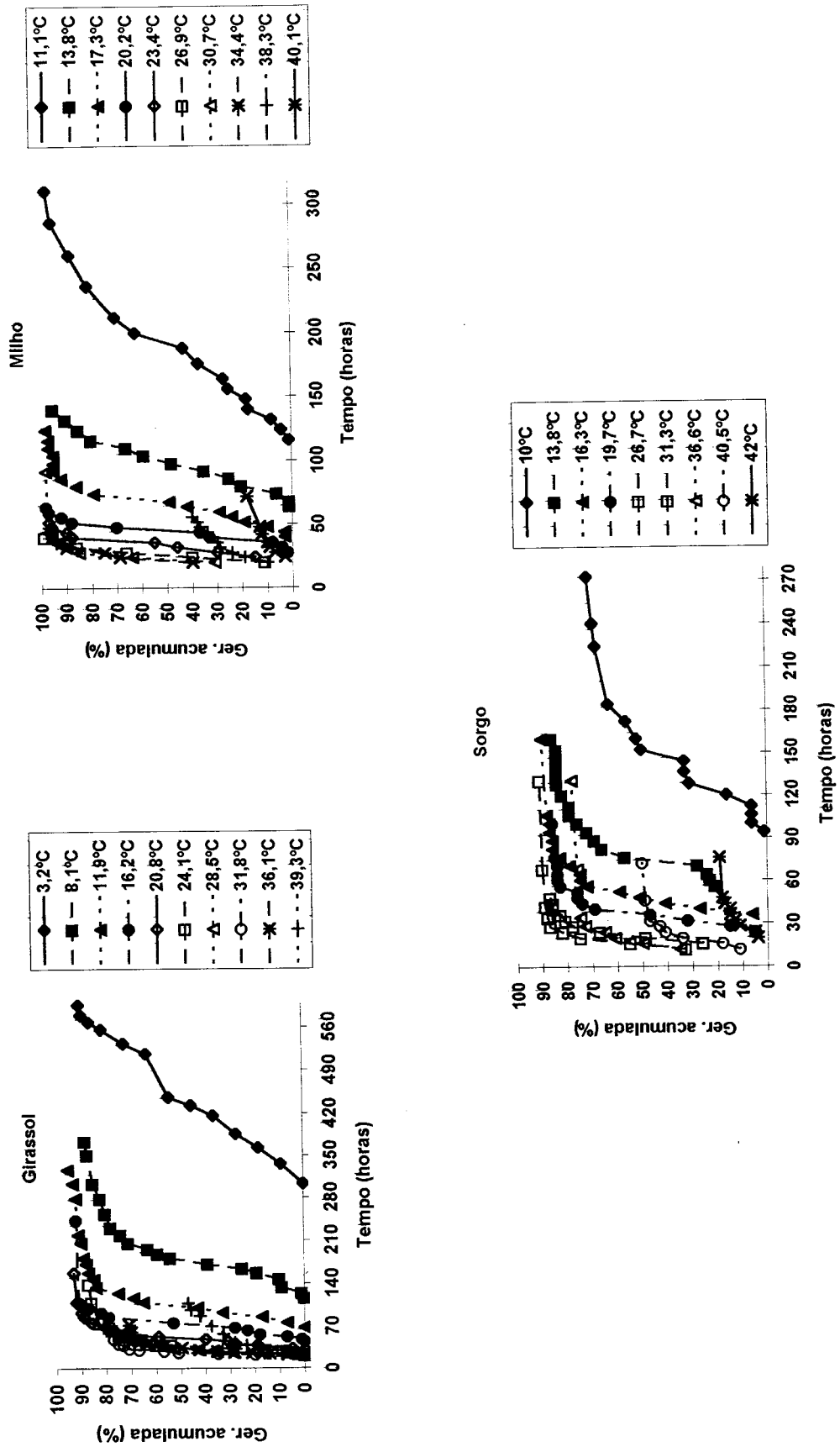


Fig. 3.1. Curvas de Germinação acumulada em função do tempo cronológico, a várias temperaturas, para as espécies indicadas.

O atraso na germinação das primeiras sementes foi crescente à medida que a temperatura diminuiu, sobretudo na gama de temperaturas mais baixas; na gama de temperaturas mais elevadas as diferenças entre os tempos de germinação das primeiras sementes foram pequenas e, não raras vezes, os tempos de germinação aumentaram ligeiramente à medida que a temperatura se aproximou da correspondente ao extremo quente da placa térmica. Por exemplo, para que tivessem germinado 10% das primeiras sementes de fava foram necessárias 214 h a 3,4°C, 57 h a 14°C, 32 h a 25,7°C e 40 h a 31,9°C; para o girassol foram necessárias 336 h a 3,2°C, 52 h a 16,2°C, 20 h a 31,9°C e 24 h a 39,3°C.

Foram pequenas as diferenças no tempo gasto entre a germinação das primeiras e a germinação das últimas sementes a temperaturas superiores a cerca de 16-17°C nas culturas outono-invernais, a cerca de 20°C no girassol e de 23°C no milho e no sorgo. Para temperaturas mais baixas a duração da germinação ao longo da amostra germinada aumentou à medida que a temperatura diminuiu.

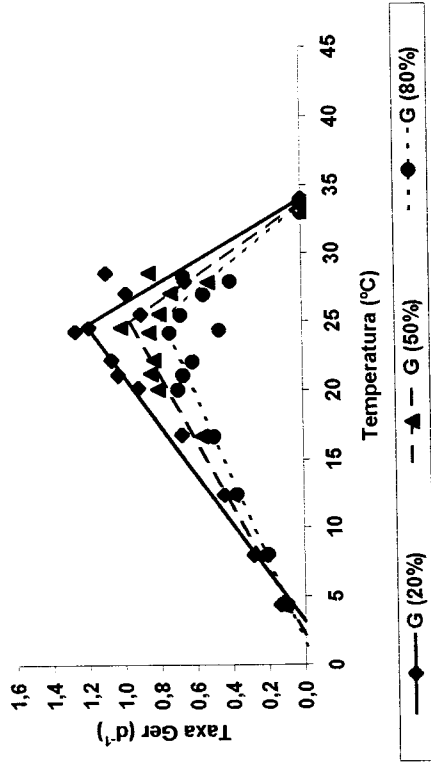
A germinação final ( $G_f$ ) foi menor às temperaturas mais elevadas. A evolução da percentagem de sementes germinadas parece ter sido abruptamente interrompida, designadamente na fase em que a população germina mais depressa (entre cerca de 20 e de 80% de germinação acumulada). A exposição das sementes a temperaturas cada vez mais elevadas origina aumentos substanciais nas taxas de respiração e inibição do metabolismo das sementes (Singh e Dhaliwal, 1972) e provoca, a partir de um dado valor de temperatura, danos cuja reversibilidade depende da sua duração (Bennet-Lartey, 1991; Garcia-Huidobro *et al.*, 1985c) e que se traduzem num número decrescente de indivíduos germinados, com consequências agronómicas evidentes.

### **3.1.2. Taxas de germinação, temperaturas cardinais e tempos térmicos**

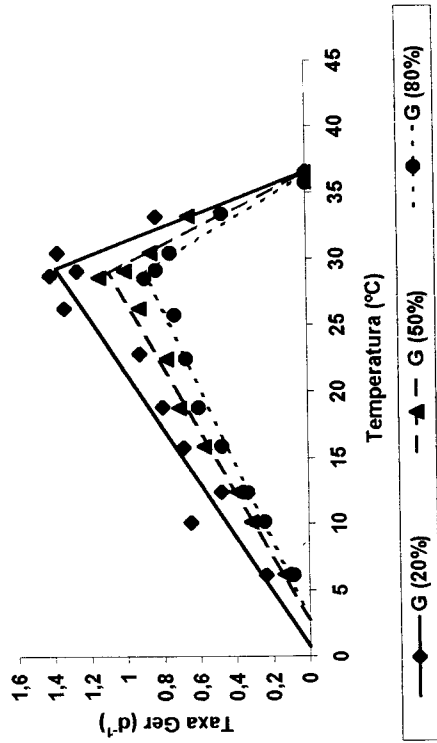
#### **3.1.2.1. Taxa de germinação vs. temperatura**

Para as fracções de germinação  $0,2G_f$ ,  $0,5G_f$  e  $0,8G_f$  relativas a cada uma das culturas foram utilizadas as equações 2.6 e 2.7 para analisar a taxa de germinação em função da temperatura (Fig. 3.2). A variação da taxa de germinação com a temperatura definiu duas gamas térmicas distintas: numa, a taxa aumentou com a temperatura (intervalo sub-óptimo medido) e noutra, a taxa diminuiu com o aumento da temperatura (intervalo supra-óptimo medido). Entre as culturas outono-invernais, o grão e a ervilha apresentaram as taxas de germinação mais elevadas (valores máximos entre  $1,4 d^{-1}$  e  $1,5$

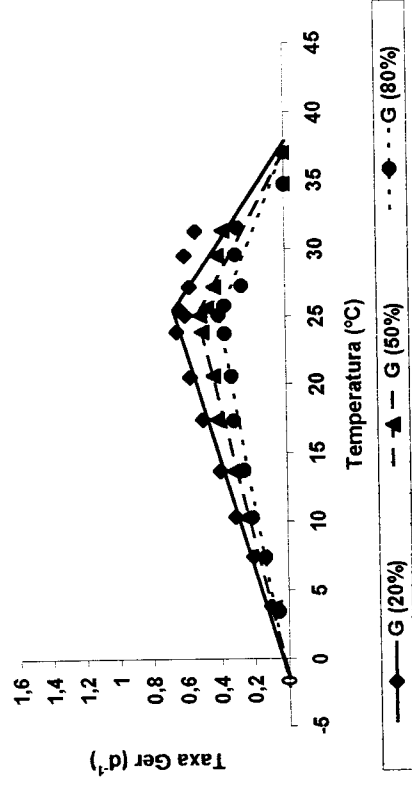
Tremocilha



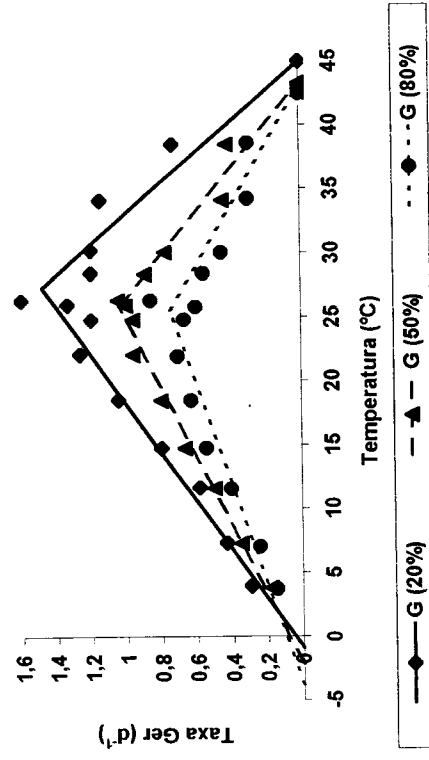
Ervilha



Fava



Grão





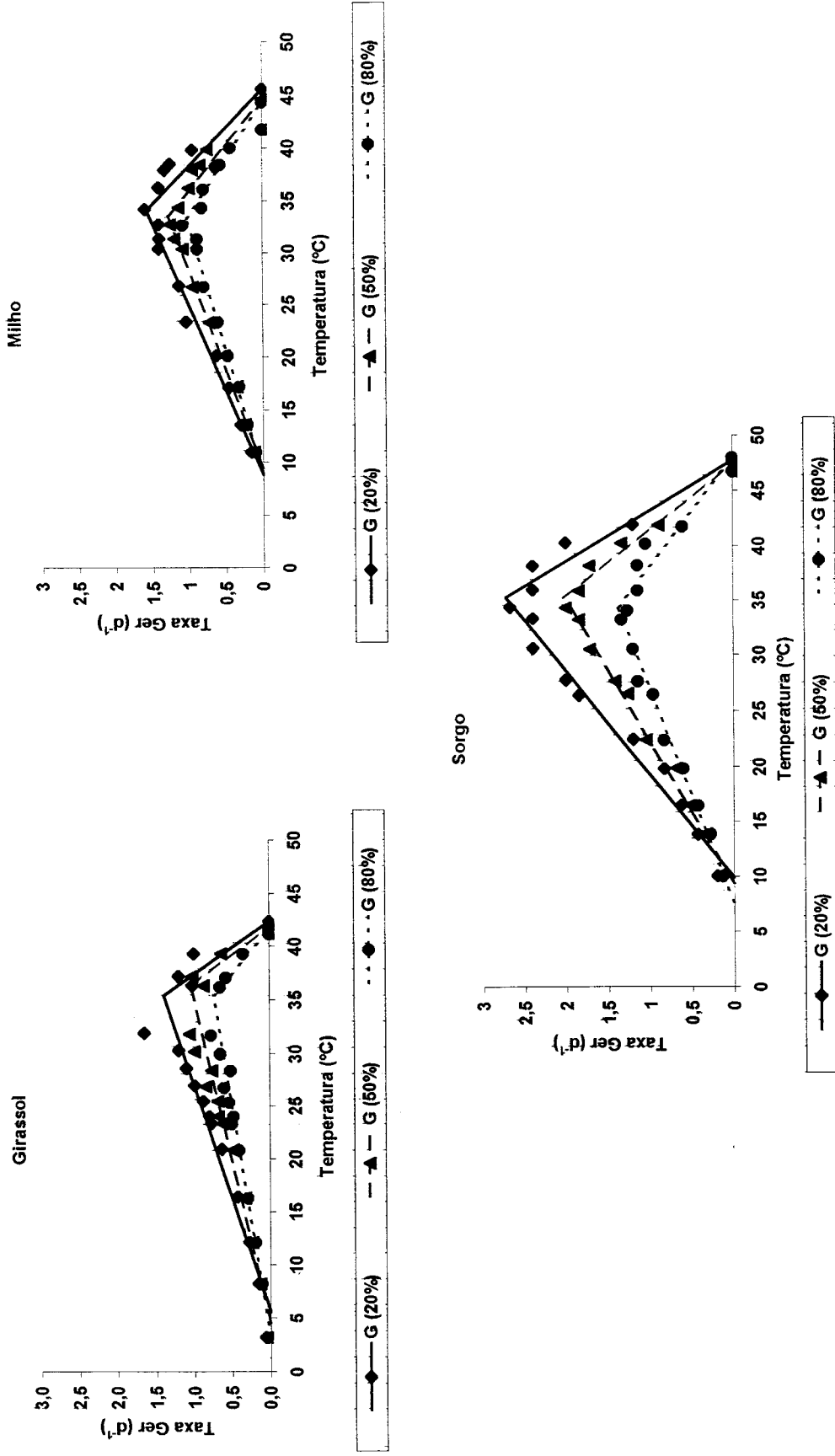


Fig. 3.2. Taxas de Germinação para as fracções germinadas 0,2G<sub>r</sub>, 0,5G<sub>r</sub> e 0,8G<sub>r</sub>, em função da temperatura média na placa de gradiente térmico, para as espécies indicadas.

d<sup>-1</sup>) e a fava as menores taxas (valor máximo foi cerca de 0,7 d<sup>-1</sup>); entre as culturas primaveris o sorgo germinou mais rapidamente (taxa máxima foi cerca de 2,7 d<sup>-1</sup>) e o girassol mais lentamente (taxa máxima é cerca de 1,4 d<sup>-1</sup>). As temperaturas correspondentes às taxas máximas de germinação registadas rondaram os 35°C entre as culturas primaveris, os 25°C para a tremocilha, o grão e a fava e os 29°C para a ervilha.

Para cada uma das gamas térmicas referidas foram estabelecidas regressões lineares entre as taxas de germinação relativas a 0,2G<sub>f</sub>, 0,5G<sub>f</sub> e 0,8G<sub>f</sub> e as temperaturas correspondentes. Os resultados são apresentados no Quadro 3.1 e mostram que a taxa de germinação de qualquer das culturas estudadas variou linearmente com a temperatura tanto no intervalo sub-óptimo como no intervalo supra-óptimo. Os valores de R<sup>2</sup> das regressões foram muito elevados e significativos para um nível de probabilidade de 95% (exceptuam-se as regressões correspondentes às fracções 0,2G<sub>f</sub> do girassol e a 0,2G<sub>f</sub> e 0,5G<sub>f</sub> da tremocilha para o intervalo supra-óptimo, significativas para um nível de 90%) (ANEXO B). Os valores de R<sup>2</sup> foram maiores no intervalo sub-óptimo que no intervalo supra-óptimo.

A linearidade obtida para o intervalo sub-óptimo confirma os resultados obtidos nos trabalhos de Hegarty (1973), Bierhuizen e Wagenvoort (1974), Gallagher (1979), Garcia-Huidobro *et al.* (1982a), Ong, (1983), Leong e Ong (1983), Warrigton e Kanemasu (1983), Washitani, (1985), Mohamed *et al.* (1988a,b), Fyfield e Gregory (1989), Carberry e Campbell (1989) Dahal *et al.* (1990a), Slafer e Savin, (1991), Abreu *et al.*, (1994), Craufurd *et al.* (1996) e Vigil *et al.* (1997) para várias culturas (ou variedades) agrícolas ou de Washitani e Saeki (1986) e Pritchard e Manger (1990) para várias espécies florestais. Para o intervalo supra-óptimo os resultados confirmam os obtidos por Thompson *et al.* (1979) para várias espécies, por Mayer e Poljakoff-Mayber (1975) para a aveia (*Avena sativa* L.), por Garcia-Huidobro *et al.* (1982a) para o milho painço, por Covell *et al.* (1986a) para vários legumes e por Craufurd *et al.* (1996) para o feijão frade (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.

### 3.1.2.2. Temperaturas cardinais

A partir das equações 2.6 e 2.7 foram calculadas as temperaturas cardinais para cada espécie e fracção germinada, que estão apresentadas no Quadro 3.1. Os valores da temperatura-base (T<sub>base</sub>) foram mais elevados nas culturas de Primavera-Verão que nas de Outono-Inverno: entre as primeiras, o girassol é a mais tolerante às temperaturas mais baixas; entre as segundas, o grão e a fava são mais tolerantes a temperaturas mais

**Quadro 3.1. Taxas de germinação vs. temperatura: temperaturas cardinais, intervalos térmicos, tempos térmicos, níveis de correlação e nº de pontos regredidos. As regressões foram significativas para um nível de probabilidade de 95%, excepto três regressões referentes ao intervalo supra-óptimo que foram significativas para um nível de probabilidade de 90%**

Culturas	Fracção Germinada (%)	Temperaturas cardinais			Intervalo térmico		Tempo térmico		Coeficiente de determinação		Número de observações	
		T <sub>basal</sub>	T <sub>opt</sub>	T <sub>máx</sub>	Sub-ópt °C	Supra-ópt °C	θ <sub>1</sub> °Cd	θ <sub>2</sub> °Cd	R <sup>2</sup> <sub>1</sub>	R <sup>2</sup> <sub>2</sub>	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>
Ervilha	20	0,7	29,4	36,6	28,7	7,2	20,8	5,3	0,92	0,91	8	5
	50	2,8	29	36,5	26,2	7,5	24	6,9	0,98	0,94	8	5
	80	2,9	28,9	36,4	26	7,5	29,3	8,4	0,99	0,96	8	5
Tremocilha	20	3,2	24,7	34	21,4	9,3	18	7,7	0,98	0,69*	9	5
	50	2,2	24,9	33,8	22,7	9,7	23,7	9,2	0,98	0,76*	9	5
	80	1,4	25,1	33,6	24,2	8,2	30,5	11	0,97	0,85	9	5
Grão	20	-0,9	27,4	45	28,3	17,6	19,1	11,9	0,96	0,89	9	6
	50	-2,1	25,9	43,3	28	17,4	26,9	16,9	0,98	0,96	9	6
	80	-3,8	25,6	43	29,4	17,4	39,2	23,2	0,88	0,87	9	6
Fava	20	-1,5	25,5	37,9	27	12,4	40	18,6	0,97	0,69	8	6
	50	-1,4	25,2	37	26,6	11,8	49,7	22,2	0,98	0,81	8	6
	80	-2,2	25	37	27,2	12	67,4	29,7	0,97	0,97	8	6
Girassol	20	4,3	35,5	42,8	28,8	9,2	23,7	5,6	0,97	0,71*	13	5
	50	4,4	35,4	42,2	29,4	10,4	28,9	6,4	0,96	0,84	13	5
	80	3,2	35	41,8	30,5	9,5	41,5	8,8	0,96	0,95	13	5
Milho	20	8,8	34,1	45,6	25,3	11,5	16	7,3	0,98	0,65	9	7
	50	9,5	33,6	44,6	24,1	11	18,6	8,6	0,99	0,79	9	7
	80	8,9	33,3	44,4	24,4	11,1	23,4	9,6	0,99	0,91	9	7
Sorgo	20	9,9	35,3	47,7	25,4	12,4	9,3	4,6	0,98	0,92	10	6
	50	9,4	35,2	47,3	25,8	12,1	12,8	6	0,99	0,96	10	6
	80	7,7	34,4	48	26,7	13,6	19,4	9,8	0,98	0,88	10	6

baixas que a ervilha e a tremocilha. Para 50% de sementes germinadas os valores de  $T_{base}$  entre as culturas primaveris variaram entre 4,6°C (girassol) e 9,5°C (milho) e nas outono-invernais variaram entre -2,1°C (grão) e 2,8°C (ervilha). Os valores de  $T_{base}$  para as restantes culturas foram de 9,4°C para o sorgo, de -1,4°C para a fava e de 1,9°C para a tremocilha. Estes valores de  $T_{base}$  são compatíveis com os obtidos por Bierhuizen e Wagenvoort (1974) para a ervilha (3,2°C) e para a fava (0,4°C), ou por Bierhuizen (1973) para o milho (8-10°C); Ellis *et al.* (1986b) obtiveram valores menores para a fava (-3,0°C) e maiores para o grão ( $T_{base}$  entre -0,5°C e 0,5°C); Abreu *et al.* (1994) obtiveram valores de  $T_{base}$  menores para o girassol (1,5°C) e para o milho (6,9°C), tal como Itabari *et al.* (1993) e Lawlor *et al.* (1990), respectivamente para o milho (6,1°C) e para o sorgo (entre 5,3 e 9,1°C consoante os genótipos usados). Em qualquer trabalho citado as temperaturas impostas foram também constantes ao longo das experiências. No entanto, a não especificação da variedade utilizada na maior parte dos trabalhos consultados dificulta a comparação e a discussão das diferenças encontradas.

Os valores estimados para a temperatura-base variaram entre as três fracções germinadas. A variação foi entre 2°C e 3°C na ervilha, grão, girassol e sorgo; foi inferior a 1°C na fava e no milho e foi de 1,8°C na tremocilha. Entre 20% e 80% de sementes germinadas as  $T_{base}$  estimadas aumentaram para a ervilha e diminuíram para a tremocilha, o grão, a fava, o girassol e o sorgo; para o milho aumentaram entre 20% e 50% e diminuíram entre 50% e 80% de sementes germinadas. Para avaliar a significância estatística da variação de  $T_{base}$  ao longo da população foram estimados os intervalos de confiança para 95% de probabilidade dos valores de  $T_{base}$  referentes às várias fracções germinadas (Quadro 3.2). Verificou-se que os valores de  $T_{base}$  obtidos para qualquer cultura não são significativamente diferentes entre as fracções germinadas que foram consideradas. A hipótese de uma temperatura-base independente da fracção germinada foi também confirmada por Garcia-Huidobro *et al.* (1982a) no estudo do milho painço, por Ong (1983) no estudo do milho painço, por Washitani (1985) para *Geranium carolinianum* L., por Gummerson (1986) para a cana de açúcar e por Covell *et al.* (1986a), Ellis *et al.* (1986b) e Ellis *et al.*, (1987c) para o grão de bico, a fava e outras leguminosas.

As culturas de Primavera/Verão apresentaram as temperaturas óptimas mais elevadas. Para 0,5G<sub>f</sub> variaram entre 33,6°C (milho) e 35,4°C (girassol), enquanto que entre as culturas outono-invernais a ervilha apresentou o valor mais elevado (29°C) e as restantes apresentaram valores da ordem dos 25°C-26°C (Quadro 3.1). Os valores de

$T_{opt}$  obtidos para o milho são semelhantes aos apresentados por Bierhuizen (1973) e por Itabari *et al.* (1993), respectivamente 32-35°C e 33,6°C, mas superiores em cerca de 3-4°C aos apresentados por Warrington e Kanemasu (1983); os obtidos para a ervilha são comparáveis com os apresentados por Bierhuizen (1973) enquanto que os obtidos para o grão são inferiores em cerca de 6-7°C aos apresentados por Covell *et al.* (1986a). A variação da  $T_{opt}$  entre as várias fracções germinadas foi pequena, apenas ultrapassando 1°C no grão (1,8°C entre  $G_{0,2}$  e  $G_{0,8}$ ).

**QUADRO 3. 2. Intervalos de Confiança para  $T_{base}$  (°C) em cada cultura (95% de Confiança)**

Cultura	Fracção (% de $G_f$ )		
	20	50	80
<b>Ervilha</b>	(-2,9;7,0)	(1,0;5,0)	(1,1;5,1)
<b>Tremocilha</b>	(1,5;5,7)	(-0,01;4,5)	(-0,9;4,6)
<b>Grão</b>	(-3,7;3,5)	(-4,1;0,5)	(-7,8;5,4)
<b>Fava</b>	(-3,9;1,9)	(-3,4;1,2)	(-5,0;1,7)
<b>Girassol</b>	(3,3;10,7)	(2,6;8,1)	(1,2;6,6)
<b>Milho</b>	(7,1;11,1)	(8,4;10,8)	(7,4;10,9)
<b>Sorgo</b>	(8,3;12,2)	(8,2;11,0)	(6,0;9,9)

Para 0,5 $G_f$ , as temperaturas máximas estimadas para as culturas de Primavera-Verão variaram entre 42,2°C (girassol) e 47,3°C (sorgo); entre as culturas outono-invernais, o grão é a espécie mais tolerante a altas temperaturas ( $T_{máx} = 43,3°C$ ) e a tremocilha a menos tolerante ( $T_{máx} = 33,8°C$ ); as  $T_{máx}$  estimadas para a ervilha e a fava foram, respectivamente, de 36,5°C e 37°C (Quadro 3.1). A  $T_{máx}$  para a ervilha é superior em cerca de 1,5°C à referida por Bierhuizen (1973) assim como a  $T_{máx}$  estimada para o milho (44,6°C) relativamente à obtida por Itabari *et al.* (1993) e à gama referida por Bierhuizen (1973), respectivamente 42,9°C e 40-44°C; ao invés, a  $T_{máx}$  estimada para o grão é claramente inferior ao intervalo térmico referido por Covell *et al.* (1986a) (entre 48°C e 60,8°C). A variação da temperatura máxima entre as várias fracções germinadas de cada uma das culturas foi, tal como para a  $T_{opt}$ , também diminuta: foi apenas superior a 1°C para o milho e para o grão. Os resultados sugerem que a  $T_{máx}$  não varia ao longo de uma população de sementes. Esta hipótese também é compatível com os resultados

obtidos por Garcia-Huidobro (1982a); ao invés, contradiz os obtidos por Covell *et al.* (1986a), que estimaram valores da  $T_{m\acute{a}x}$  significativamente diferentes ao longo das populações de sementes de grão de bico, soja e lentilha.

A invariância das temperaturas cardinais permite considerar as amostras como homogêneas (Monteith, 1977; Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a,b; Covell *et al.*, 1986a; Ellis *et al.*, 1986b e 1987c; Mohamed *et al.*, 1988a,b; Abreu *et al.*, 1994), i.e., sem polimorfismo somático (Mayer e Poljakoff-Mayber, 1975) resultante, por exemplo, de diferentes graus de dormência entre as sementes utilizadas (Thompson e Fox, 1976). Por esta razão, é possível considerar que a temperatura cardinal da população é o valor médio das temperaturas cardinais estimadas para as várias fracções analisadas (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a).

Em todas as espécies, a amplitude do intervalo térmico sub-ótimo ( $T_{\acute{o}pt} - T_{base}$ ) é substancialmente maior que a do intervalo supra-ótimo ( $T_{m\acute{a}x} - T_{\acute{o}pt}$ ), como mostra o Quadro 3.1. Nas culturas outono-invernais a amplitude dos intervalos térmicos sub-ótimos estimados variou entre cerca de 23°C para a tremocilha e 28°C para o grão; nas culturas primaveris variou entre 24°C para o milho e 29°C para o girassol. A amplitude do intervalo térmico supra-ótimo foi da ordem dos 17°C para o grão; para as restantes culturas variou entre 8°C para a ervilha e 12°C para o sorgo. A razão entre as amplitudes do intervalo sub-ótimo e do intervalo supra-ótimo foi de 1,6 para o grão e 3,5 para a ervilha; para as restantes culturas variou entre 2,1 no sorgo e 2,8 no girassol.

### 3.1.2.3. Tempos térmicos

A linearidade entre taxa de germinação e temperatura nos intervalos sub-ótimo e supra-ótimo para 0,2 $G_f$ , 0,5 $G_f$  e 0,8 $G_f$  suporta a hipótese, descrita nas equações 2.6 e 2.7, de um tempo térmico constante para cada intervalo e cada fracção germinada. Contudo, os tempos térmicos,  $\theta_1$  ou  $\theta_2$ , foram diferentes entre as culturas estudadas (Quadro 3.1). Na gama sub-ótima de temperaturas e para 50% de sementes germinadas, a fava apresentou o valor de  $\theta_1$  mais elevado (49,7°Cd) entre as culturas outono-invernais e a tremocilha o mais baixo (23,7 °Cd); entre as culturas primaveris  $\theta_1$  variou entre 12,8°Cd no sorgo e 28,9°C no girassol; a ervilha, a tremocilha, o grão e o girassol apresentaram valores muito aproximados (entre 24°Cd e 28,6°Cd) enquanto o  $\theta_1$  para o milho foi de 18,6 °Cd. No intervalo supra-ótimo de temperaturas e para igual fracção germinada (0,5 $G_f$ ),  $\theta_2$  variou entre 6,9°Cd (ervilha) e 22,2 °Cd (fava) nas culturas outono-invernais e entre 6°Cd (sorgo) e 8,6°Cd (milho) nas culturas primaveris.

Para cada cultura, a evolução da germinação de uma amostra de sementes depende da temperatura acumulada. Os valores de  $\theta_1$  e  $\theta_2$  aumentaram entre  $0,2G_f$  e  $0,8G_f$ , (Quadro 3.1): os menores aumentos de  $\theta_1$  foram obtidos para a ervilha ( $8,5^\circ\text{Cd}$ ), o milho ( $7,4^\circ\text{Cd}$ ), o sorgo ( $10,1^\circ\text{Cd}$ ) e a tremocilha ( $12,5^\circ\text{Cd}$ ) e os maiores para o girassol ( $17,8^\circ\text{Cd}$ ), o grão ( $20,1^\circ\text{Cd}$ ) e a fava ( $27^\circ\text{Cd}$ );  $\theta_2$  variou cerca de  $11^\circ\text{Cd}$  para o grão e a fava,  $5,2^\circ\text{Cd}$  para o sorgo, cerca de  $3,0^\circ\text{Cd}$  para a ervilha, a tremocilha e o girassol e  $2,3^\circ\text{Cd}$  para o milho. Estes resultados contrariam a hipótese de um  $\theta_2$  invariante ao longo de uma população, defendida por Covell *et al.* (1986a) para quatro leguminosas, entre as quais o grão de bico. Verificou-se ainda que o aumento do tempo térmico ao longo da população não foi linear. Entre 50% e 80% de sementes germinadas o tempo térmico para o intervalo sub-ótimo ( $\theta_1$ ) aumentou mais que entre 20% e 50% das sementes germinadas. Também no intervalo supra-ótimo da maioria das culturas (excepto a do milho),  $\theta_2$  variou mais entre  $0,5G_f$  e  $0,8G_f$  que entre  $0,2G_f$  e  $0,5G_f$ , mas as amplitudes destas diferenças foram sempre menores que as correspondentes estimadas no intervalo sub-ótimo.

### 3.1.3. Dispersão da germinação

A germinação acumulada em função do tempo térmico foi analisada através de uma curva normal de probabilidade acumulada, para estimar a dispersão da germinação como o desvio-padrão da distribuição de frequências dos tempos térmicos de germinação ao longo das várias fracções germinadas. Para isso, as fracções germinadas foram expressas como percentagem da germinação final e os correspondentes tempos térmicos foram estimados a partir da equação (2.6) para o intervalo sub-ótimo de temperaturas. Uma vez provada a homogeneidade das amostras de sementes (ver secção anterior), considerou-se como temperatura-base representativa de cada cultura o valor médio das temperaturas-base estimadas para as três fracções consideradas (20%, 50% e 80%).

A relação entre a germinação acumulada e o tempo térmico foi estabelecida para as sete culturas e apresenta-se na Fig. 3.3 para quatro delas (ervilha, fava, girassol e sorgo). Como o progresso da germinação acumulada ao longo do tempo térmico parece seguir uma curva idêntica à curva normal de probabilidade acumulada, utilizou-se a análise *probit* (equação 2.9) para analisar estas relações. Contudo, para avaliar a sensibilidade da simulação *probit* às temperaturas próximas da temperatura-base

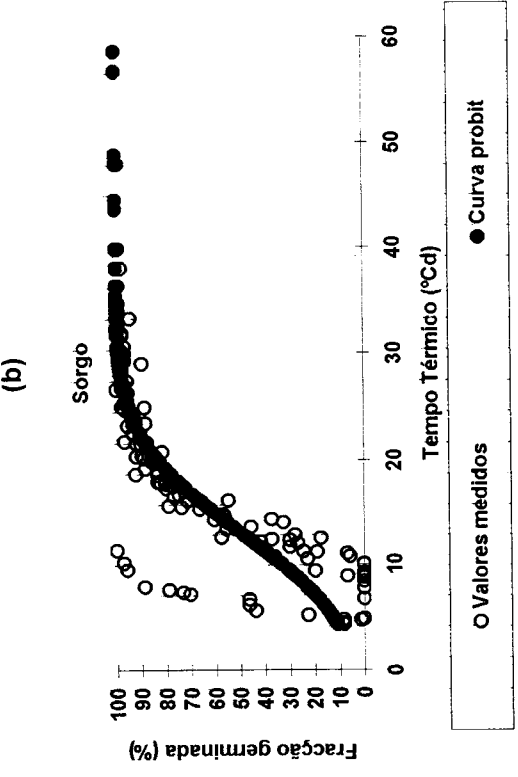
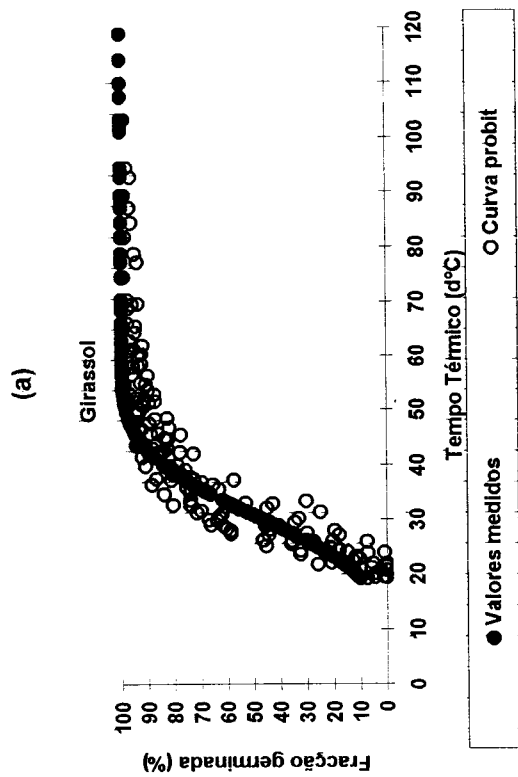
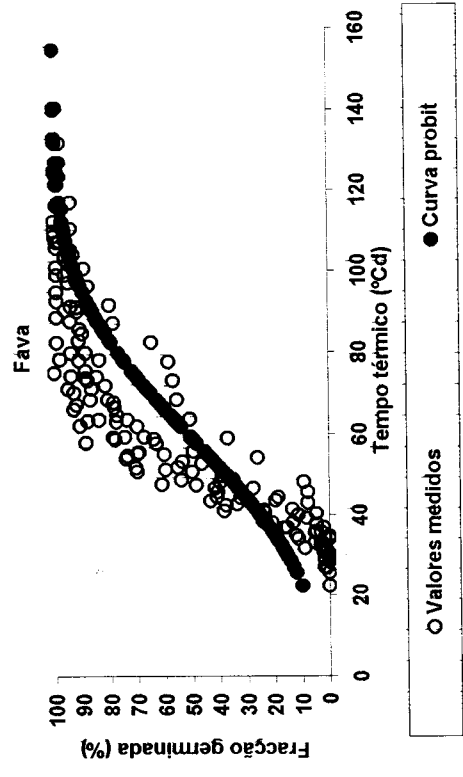
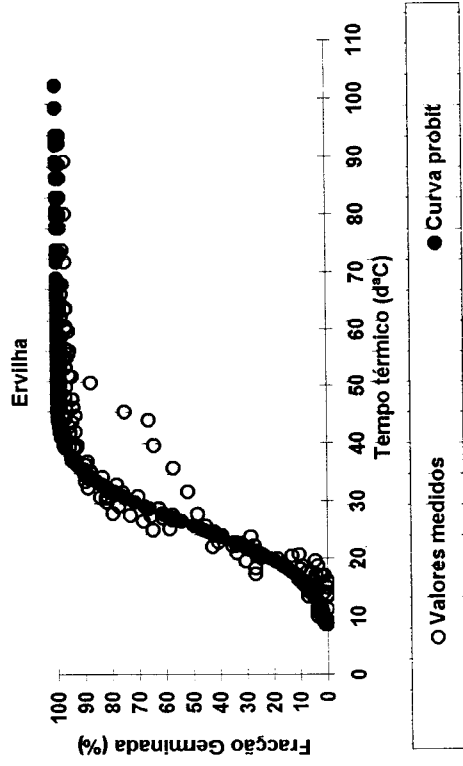


Fig. 3.3. Relação entre a germinação acumulada (expressa como fracção da germinação final) e o tempo térmico para quatro culturas, no intervalo térmico sub-óptimo: (a) ervilha ( $T_{b,média} = 2,1^{\circ}\text{C}$ ); (b) grão ( $T_{b,média} = -2,3^{\circ}\text{C}$ ); (c) girassol ( $T_{b,média} = 4,5^{\circ}\text{C}$ ); (d) sorgo ( $T_{b,média} = 9,0^{\circ}\text{C}$ )



(Covell *et al.*, 1986a), os dados não incluíram germinações ocorridas na faixa mais próxima do extremo frio de duas das culturas, uma outono-invernal (tremocilha) e outra primaveril (girassol); para as restantes culturas, todas as faixas transversais correspondentes ao intervalo sub-ótimo de temperaturas foram consideradas.

Para as sete culturas, o Quadro 3.3 mostra os valores dos parâmetros estimados pela análise *probit*, nomeadamente o desvio-padrão ( $\sigma$ ) da distribuição dos tempos térmicos em torno do valor mais provável e a constante de intercepção (C) da regressão linear entre *probit*(G) e o tempo térmico, além dos respectivos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O nível de significância estatística de qualquer das regressões foi de 0,1%. Estes resultados confirmam a hipótese testada de que a germinação acumulada ao longo do tempo térmico segue uma curva Normal Cumulativa, pelo que a distribuição dos tempos térmicos de germinação é aproximadamente Normal. Covell *et al.* (1986a),

**QUADRO 3. 3. Parâmetros da relação entre *probit*(G) e o tempo térmico: C- Valor da constante de intercepção;  $\sigma$  - desvio padrão da distribuição de frequências do tempo térmico;  $R^2$ - Coeficiente de determinação; Nível de significância estatística: 0,1%**

**\* Não incluem as germinações ocorridas na faixa mais próxima do extremo frio**

ESPÉCIE	C	$\sigma$	$R^2$
ERVILHA	-2,34	11,8	0,91
TREMOCILHA*	-3,67	6,4	0,95
GRÃO	-2,11	14,9	0,96
FAVA	-2,08	28,5	0,72
GIRASSOL*	-3,37	9,1	0,97
MILHO	-2,24	9,0	0,89
SORGO	-0,76	15,6	0,59

Ellis *et al.* (1986b) e Ellis *et al.* (1987c) obtiveram resultados semelhantes para o grão, a fava e outras leguminosas.

A dispersão da germinação em torno dos tempos térmicos mais prováveis foi maior na fava ( $\sigma = 28,5^{\circ}\text{Cd}$  para um  $\theta_1 = 49,7^{\circ}\text{Cd}$ ), no sorgo ( $\sigma = 15,6^{\circ}\text{Cd}$  para um  $\theta_1 = 12,8^{\circ}\text{Cd}$ ), no grão ( $\sigma = 14,9^{\circ}\text{Cd}$  para um  $\theta_1 = 26,9^{\circ}\text{Cd}$ ) e na ervilha ( $\sigma = 11,8^{\circ}\text{Cd}$  para um  $\theta_1 = 24^{\circ}\text{Cd}$ ). A germinação da tremocilha foi a menos dispersa ( $\sigma = 6,4^{\circ}\text{Cd}$ ) em torno do valor do tempo térmico mais provável ( $23,7^{\circ}\text{Cd}$ ) enquanto que a dispersão da germinação de sementes de girassol e de milho foi semelhante ( $\sigma = 9,0^{\circ}\text{Cd}$  para  $\theta_1 = 28,9^{\circ}\text{Cd}$  no caso do girassol e  $\sigma = 9,1^{\circ}\text{Cd}$  para  $\theta_1 = 18,6^{\circ}\text{Cd}$  no caso do milho).

A distribuição dos resíduos (diferenças entre os valores medidos e os correspondentes valores estimados) não parece ser aleatória. Os valores estimados a partir da análise *probit* foram sistematicamente diferentes dos valores medidos para pequenos tempos térmicos (Fig. 3.3), o que coincide com as temperaturas médias mais baixas a que foram testadas as sementes ( $3,7^{\circ}\text{C}$  para a fava,  $6,2^{\circ}\text{C}$  para a ervilha e  $10,1^{\circ}\text{C}$  para o sorgo); o mesmo não se passa com o girassol, onde não foram incluídos os dados de germinação à temperatura mais baixa. Os valores de  $R^2$  das equações *probit* foram inferiores para as culturas que apresentaram germinações finais inferiores aos *m.a.a.* nas faixas mais próximas do extremo frio da placa (ervilha, fava e sorgo) e tanto menores quanto menor foi a diferença entre a temperatura mais baixa a que foi testado o comportamento de cada cultura e a respectiva  $T_{\text{base}}$  média estimada (entre cerca de  $6^{\circ}\text{C}$  para o grão ou para a tremocilha e cerca de  $0,5^{\circ}\text{C}$  para o sorgo). Estes resultados questionam a linearidade entre taxa de germinação e temperatura para valores próximos da  $T_{\text{base}}$ , e sugerem que, para cada cultura, há uma temperatura acima da qual a qualidade do ajustamento entre a germinação acumulada e o modelo *probit* permanece elevada (maiores valores de  $R^2$ ) e não influencia a dispersão dos tempos térmicos em torno do seu valor mais provável. Segundo Hsu *et al.* (1984) e Marshall e Squire (1996) o ajuste do modelo linear entre taxa e temperatura é menor a temperaturas baixas, porque subestima as taxas de germinação observadas (aumenta a duração do processo germinativo), tornando menos rigoroso qualquer modelo que dependa de uma temperatura-base comum; segundo Covell *et al.* (1986a), em estudos com o grão-de-bico, o menor ajuste deve-se a uma maior sensibilidade do período de germinação a pequenas variações de temperaturas próximas da  $T_{\text{base}}$ ; além disso, os erros de medição, assumem maior relevância nesta gama térmica (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a).

A partir dos valores da  $T_{\text{base}}$  obtidos através da equação 2.6 e dos valores de  $\sigma$  e de  $C$  obtidos pela análise *probit* (equação 2.9) é possível estimar a taxa de germinação

em função da temperatura e da fracção germinada (equação 2.11), para as várias espécies, no intervalo térmico sub-óptimo. Por exemplo, a taxa de germinação da ervilha virá estimada a partir da equação  $R(G) = (T-2,1)/[probit(G)+2,34]$  11,8.

#### 3.1.4. Germinação final e temperatura

A Fig. 3.4 mostra a variação da percentagem final de sementes germinadas ( $G_f$ ) em função da temperatura. Para qualquer das culturas, a germinação final permaneceu elevada e independente da temperatura numa gama mais ou menos extensa de temperaturas: foram atingidas percentagens acima dos *valores mínimos de germinação agronomicamente aceitáveis (m.a.a.)* (ver Quadro 2.1) entre 12°C e 30°C para a ervilha, 4 e 25°C para a tremocilha, 4 e 32°C para o grão, 15 e 36°C para a fava, 3 e 33°C para o girassol, 10 e 38°C para o milho e 12 e 39°C para o sorgo. A temperaturas mais elevadas, a  $G_f$  decresceu abruptamente: por exemplo, entre  $G_f$  superiores aos *m.a.a.* e a ausência total de germinação bastaram aumentos de temperatura entre 2,1°C (milho) e 6,6°C (grão).

Este comportamento é comparável aos resultados apresentados por Thompson (1970) para diversas espécies, por Garcia-Huidobro *et al.* (1982a) para o milho painço, por Mohamed *et al.* (1988a) para o amendoim, por Brar *et al.* (1991) para várias leguminosas forrageiras, por Evers (1991) para várias cultivares de trevo, por Wilson *et al.* (1992) para várias cultivares de *Brassica spp.* e por Brar e Stewart (1994) para várias cultivares de sorgo. Por outro lado, não confirmam a existência de um valor único de temperatura para a germinação máxima proposta por Ellis *et al.* (1986b) para o grão, nem a de uma relação linear entre a  $G_f$  e a temperatura obtida por Mosjidis (1990) para sementes de *Lespedeza cuneata* (Dumont de Courset)G.Don.

O decréscimo de  $G_f$  ao longo do intervalo supra-óptimo de cada uma das culturas foi lento para temperaturas próximas da  $T_{opt}$  e brusco para temperaturas mais elevadas (Fig. 3.4). Seja  $T'_m$  a temperatura mais elevada a que  $G_f$  é igual aos *m.a.a.* Para estimar  $T'_m$  foram ajustadas funções polinomiais do tipo  $G_f = aT^2 + bT + c$  à variação da percentagem final de germinação em função da temperatura para o intervalo supra-óptimo definido no Quadro 3.1. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 3.4. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos foram elevados e significativos para uma probabilidade de 95%, excepto o valor de  $R^2$  obtido para a tremocilha que é significativo para um nível de 90%. Os valores de  $R^2$  foram superiores a 0,90 para cinco culturas (ervilha, grão, fava, milho e sorgo) e inferiores para a tremocilha e o girassol

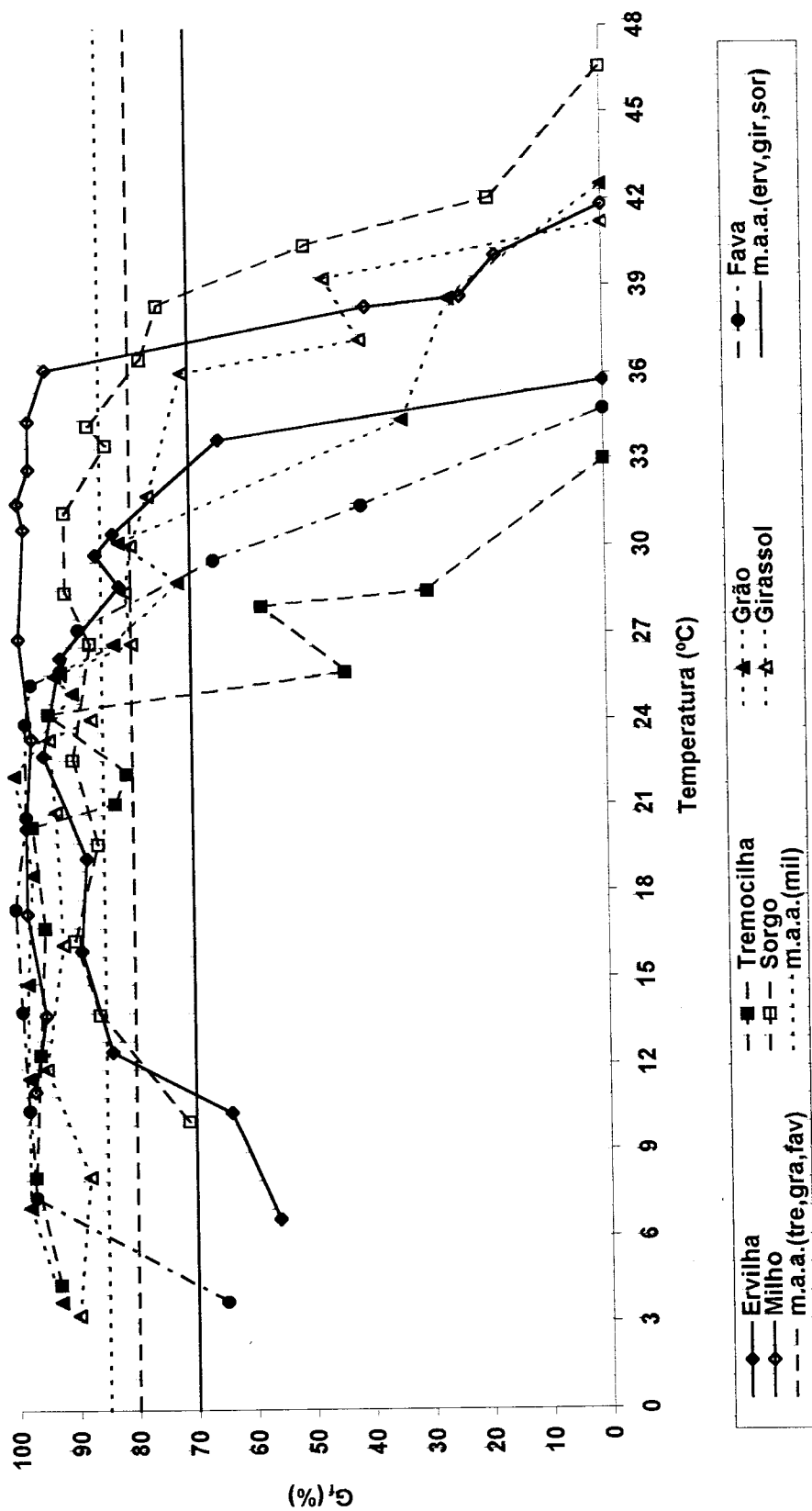


Fig. 3.4. Germinação final ( $G_f$ ) da ervilha, da tremocilha, do grão, da fava, do girassol, do milho e do sorgo, em função da temperatura.  
M.a.a. - mínimos de germinação agronomicamente aceitáveis

(0,81 e 0,87, respectivamente). Os valores estimados de  $T'_m$  foram superiores à  $T_{\text{ópt}}$  para o grão (mais 2°C), para a fava (mais 2,7°C), para o sorgo (mais 2,3°C) e para a ervilha (mais 4,1°C) e foram idênticos à  $T_{\text{ópt}}$  para o girassol (mais 0,1°C), para a tremocilha e para o milho.

**Quadro 3.4. Regressão polinomial entre a germinação final ( $G_f$ ) e a temperatura (T) para o intervalo supra-óptimo de cada uma das culturas.  $T'_m$  - Temperatura máxima a que ainda ocorrem os *m.a.a.***

Cultura	Função polinomial	R <sup>2</sup>	T' <sub>m</sub> (°C)
Ervilha	$G_f = -3,27T^2 + 200,27T - 2975,8$	0,98	33,1
Tremocilha	$G_f = 0,43T^2 - 33,95T + 655,19$	0,81	24,5
Grão	$G_f = -0,01T^2 - 4,61T - 218,28$	0,94	27,9
Fava	$G_f = -0,55T^2 + 22,33T - 119$	0,99	27,9
Milho	$G_f = -0,56T^2 + 29,24T - 250,82$	0,91	32,8
Sorgo	$G_f = -0,099T^2 + 0,19T + 201,65$	0,93	37,5
Girassol	$G_f = -0,96T^2 + 62,62T - 941,78$	0,87	35,3

Definindo para o extremo frio uma temperatura  $T'_b$  semelhante à  $T'_m$  no extremo quente (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a), a Fig 3.4 confirma a existência de  $T'_b$  para a ervilha e a fava e de  $T'_m$  (Quadro 3.4) para todas as culturas. Estas temperaturas delimitam um intervalo térmico contido entre  $T_{\text{base}}$  e  $T_{\text{máx}}$  ( $T_{\text{base}} < T'_b < T'_m < T_{\text{máx}}$ ), dentro do qual as percentagens de sementes germinadas permanecem elevadas e praticamente independentes da temperatura.

### 3.2. Parâmetros ambientais durante o estabelecimento no campo

Apresenta-se neste parágrafo a variação da temperatura do ar, precipitação, evapotranspiração potencial (Método de Penman) e teor de água no solo ao longo do período em que decorreram as experiências de campo, em Évora e em Lisboa.

#### 3.2.1. Temperatura do ar

A Fig. 3.5 mostra o curso das temperaturas do ar (média, máximas e mínimas mensais) durante o período experimental. As temperaturas médias mensais nos anos de

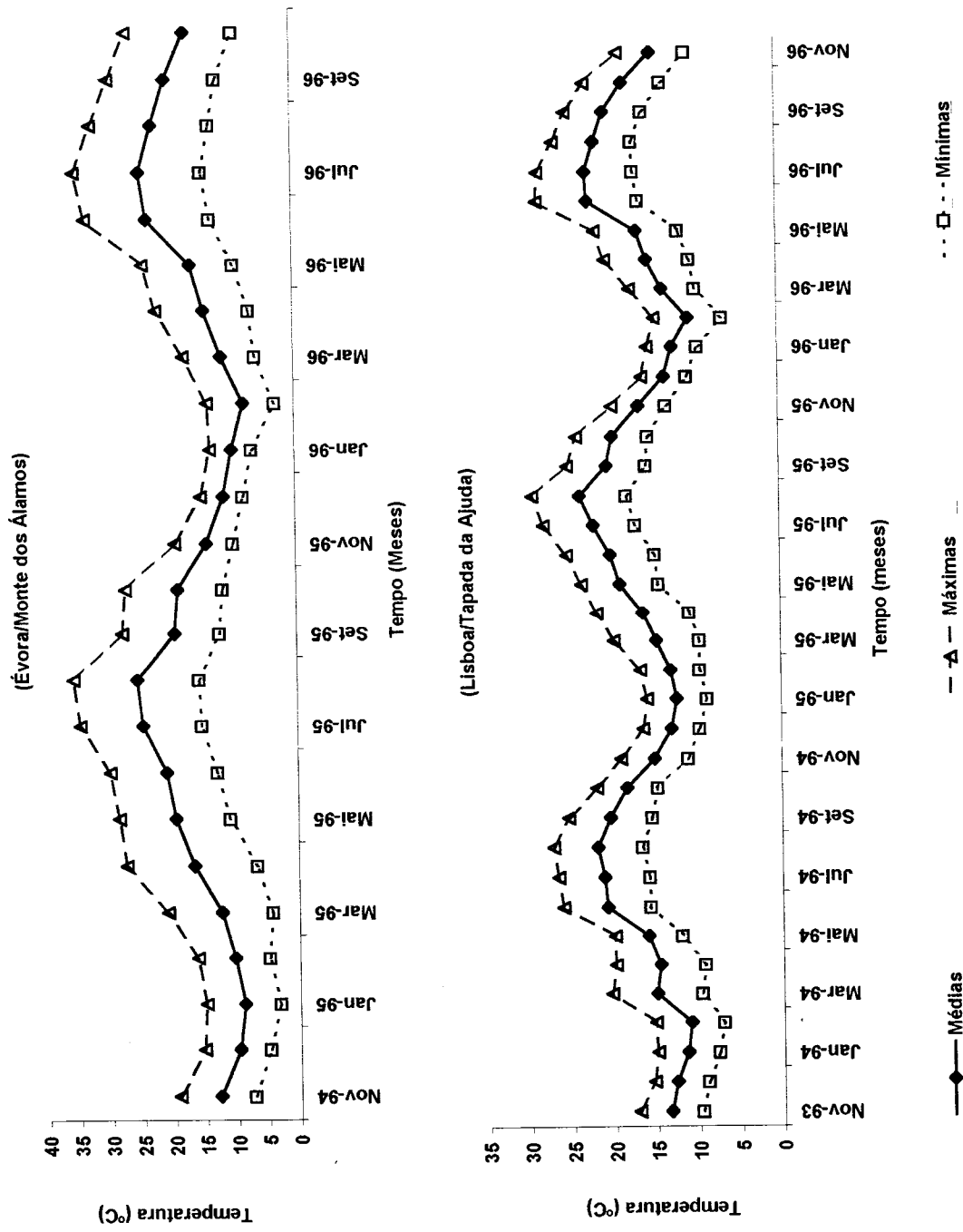


Fig. 3.5. Temperaturas médias, máximas e mínimas do ar em Évora/Monte dos Álamos (Novembro de 1994 a Outubro de 1996) e Lisboa/Tapada da Ajuda (Novembro de 1993 a Novembro de 1996)

1994 e 1996 foram muito semelhantes às do ano médio. Em ambos os locais o ano de 1995 foi mais quente que os anos de 1994 e 1996: a sua média anual (17°C e 17,7°C, respectivamente em Évora e Lisboa) foi superior à do Ano Médio em 1,5°C em Évora e em 1,3°C em Lisboa. Em Évora, as médias mensais das mínimas foram inferiores a 5°C entre Dezembro de 1994 e Março de 95 (e entre Dezembro e Fevereiro no ano médio), enquanto que em Lisboa as médias mensais das mínimas foram sempre superiores a 7,0°C, tal como no ano médio. As médias mensais das temperaturas máximas em Évora foram superiores a 25°C entre Abril e Outubro de 1995 e entre Junho e Outubro de 1996 (entre Junho e Setembro no ano médio); em Lisboa ultrapassaram 25°C entre Junho e Setembro de 1994, 1995 e 1996, tal como no ano médio.

Em Évora, a temperatura máxima excedeu 25°C em 198 dias do ano de 1995 (aproximadamente o dobro da média – 106 dias) e em apenas 6 dias as temperaturas foram negativas (Fig. 3.6). Entre Janeiro e Outubro de 1996 o número de dias foram, respectivamente, 166 e 19. Em Lisboa registaram-se temperaturas máximas superiores a 25°C em 96, 120 e 105 dias respectivamente nos anos de 1994, 1995 e 1996, sendo o valor normal de 103 dias; não ocorreram temperaturas mínimas inferiores a 0°C.

Durante o período experimental, nas épocas normais de sementeira das culturas outono-invernais e primaveris as temperaturas mínimas mensais foram superiores aos valores normais, proporcionando condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal na fase de estabelecimento das culturas: de Março a Maio de 1995 as diferenças entre as mínimas medidas e os correspondentes valores normais variaram entre 1 e 3°C em Évora e em Lisboa; entre Outubro e Dezembro de 1994 as mínimas ultrapassaram os valores normais 1-2°C em Évora e, no mesmo período em 1995, foram superiores aos valores normais em 3-4°C nos dois locais. Por outro lado, as máximas foram demasiado elevadas quando comparadas com o ano médio, sobretudo em Évora entre Abril e Agosto de 95 (as diferenças variaram entre 2,5°C e 8°C), podendo prejudicar o desenvolvimento das culturas mais susceptíveis às temperaturas elevadas.

### **3.2.2. Precipitação e Evapotranspiração**

Em ambos os locais, a precipitação foi inferior à média anual em 1994 (menos 146 mm e 154 mm, respectivamente em Évora e Lisboa; em 1995 foi semelhante à média anual em Évora e inferior em 62 mm em Lisboa. A precipitação acumulada entre Janeiro e Setembro de 1996 foi de 528 mm em Évora; em Lisboa foi de 814 mm entre Janeiro e Novembro de 1996.

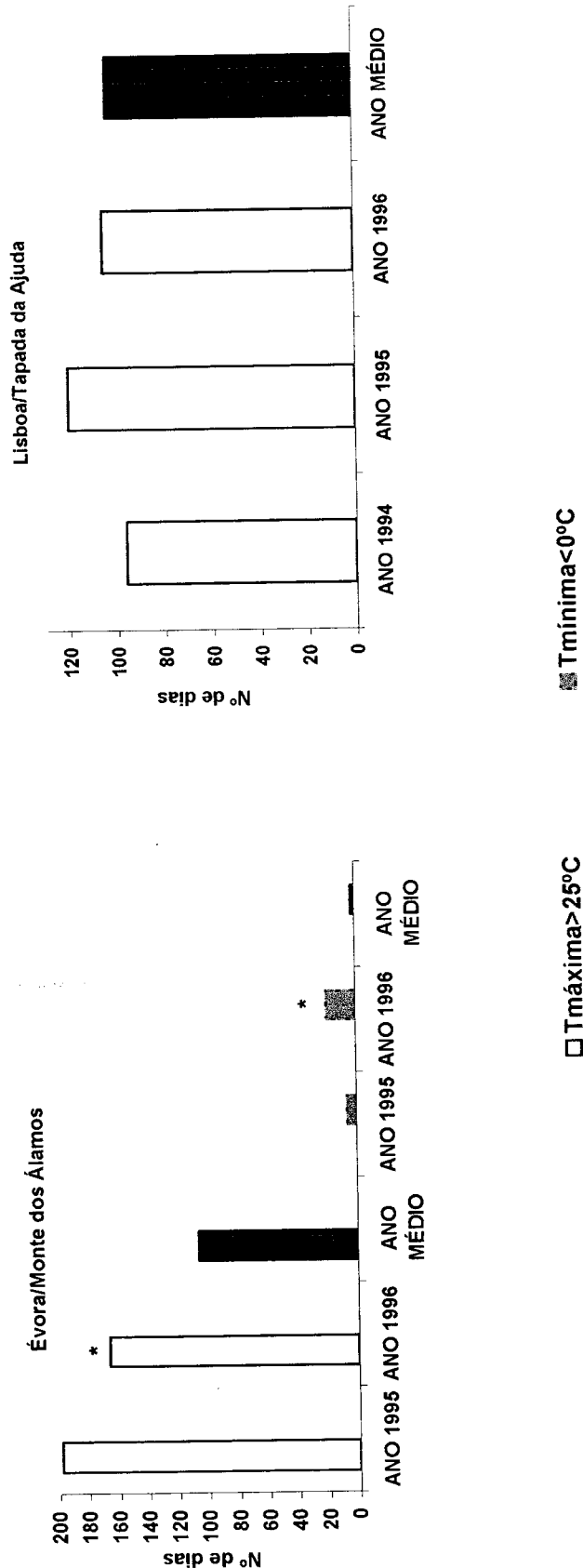


Fig. 3.6. Nº de dias em que a temperatura máxima ( $T_{\text{máx}}$ ) foi superior a  $25^{\circ}\text{C}$  e a temperatura mínima ( $T_{\text{mín}}$ ) foi inferior a  $0^{\circ}\text{C}$  durante o período experimental e no ano médio em Évora e Lisboa: \*os valores referem-se ao período de Janeiro a Outubro de 1996.



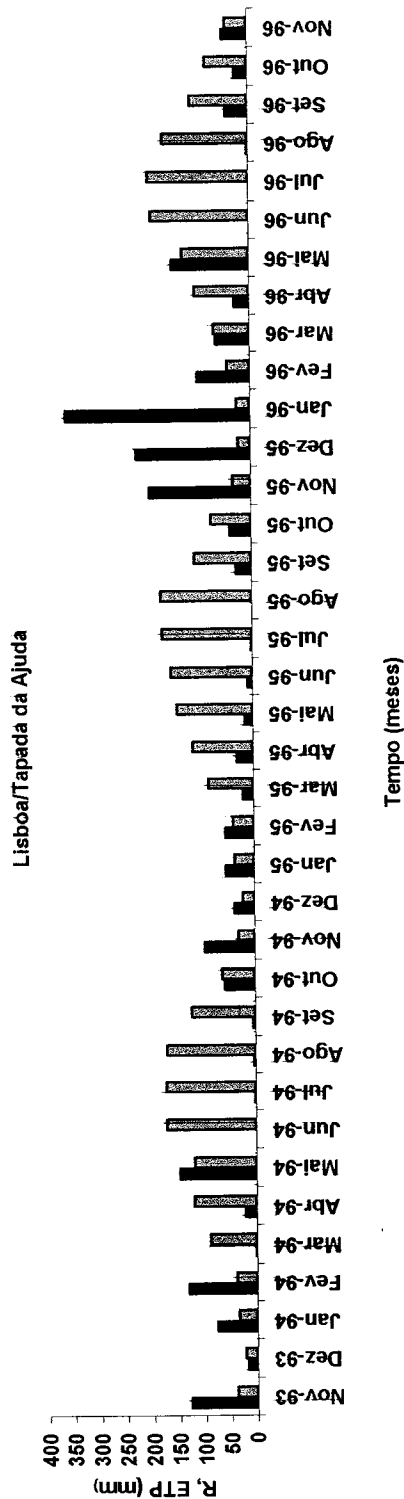
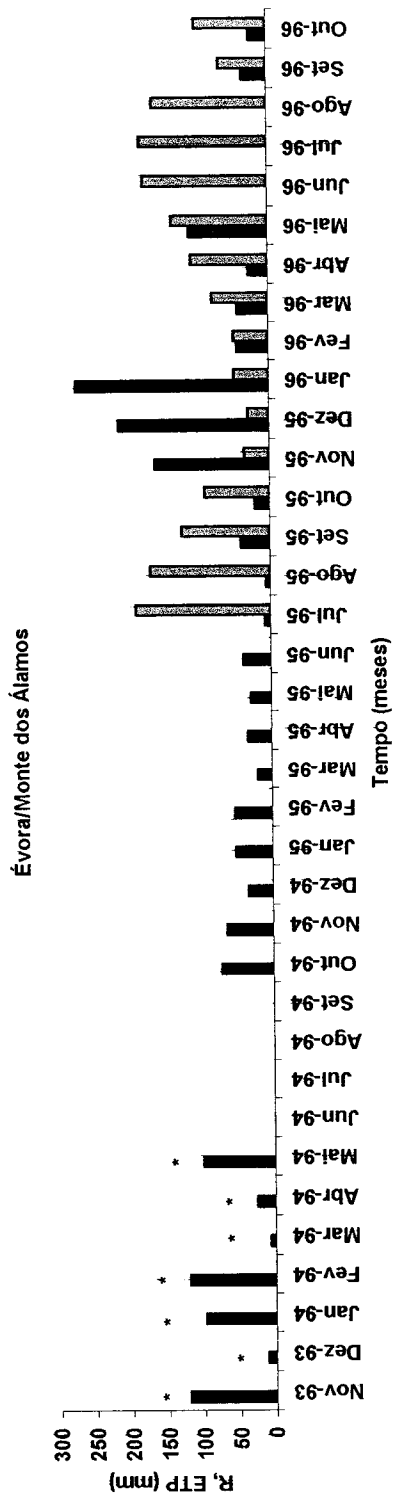
A Fig. 3.7 mostra o curso da Precipitação (R) e da Evapotranspiração Potencial estimada pelo método de Penmam (FAO, 1979) nos dois locais ao longo do período em que decorreram as experiências. Em Évora, foi somente possível estimar a Evapotranspiração Potencial a partir de Julho de 1995 (ver Materiais e Métodos). Nos dois locais, o curso da precipitação é característico de climas do tipo mediterrâneo: evolução mais ou menos irregular das precipitações mensais ao longo do ano e uma elevada percentagem da precipitação anual concentrada em poucos meses do semestre frio. Tanto em Évora como em Lisboa, registaram-se valores de precipitação bastante elevados em Maio de 1994 e de 1996 e entre Novembro de 1995 e Janeiro de 1996; ao invés, destacam-se os fracos valores de precipitação registados em Março e em Abril dos 3 anos em ambos os locais.

Sob o ponto de vista climático, foram meses secos ( $R_{\text{mensal}} < ETP_{\text{mensal}}$ ) em Lisboa os de Dezembro de 1993, Março e Abril de 1994 e de 1996 e os períodos entre Junho e Outubro de 1994 e de 1996 e entre Março e Outubro de 1995 (8 meses consecutivos). Para o período em que foi possível estimar a ETP no Local A, foram secos os meses de Abril e Maio de 1996 e os períodos entre Julho e Outubro de 1995 e entre Junho e Outubro de 1996. Do ponto de vista agrometeorológico, foram húmidos ( $R_{\text{mensal}} > 0,5ETP_{\text{mensal}}$ ) os meses em que normalmente se semeiam as culturas outono-invernais; na época normal de sementeira das culturas de Primavera-Verão, em ambos os locais foram húmidos os meses de Maio de 1994 e 1996 e de Março de 1996.

A Fig 3.8 apresenta o número de dias em que a precipitação em Évora e Lisboa foi superior a 10 mm no período experimental e no ano médio. De uma forma geral, verifica-se que a precipitação é mais intensa nos meses com maior quantidade de precipitação: as maiores intensidades diárias ocorreram entre Novembro de 1995 e Janeiro de 1996, e nos meses de Maio de 1994 e 1996, em que as precipitações foram anormalmente intensas (por exemplo, em Lisboa a precipitação em apenas 5 dias de Maio de 1994 foi cerca de 73% do total mensal e em 5 dias de Maio de 1996 foi cerca de 88% do total mensal).

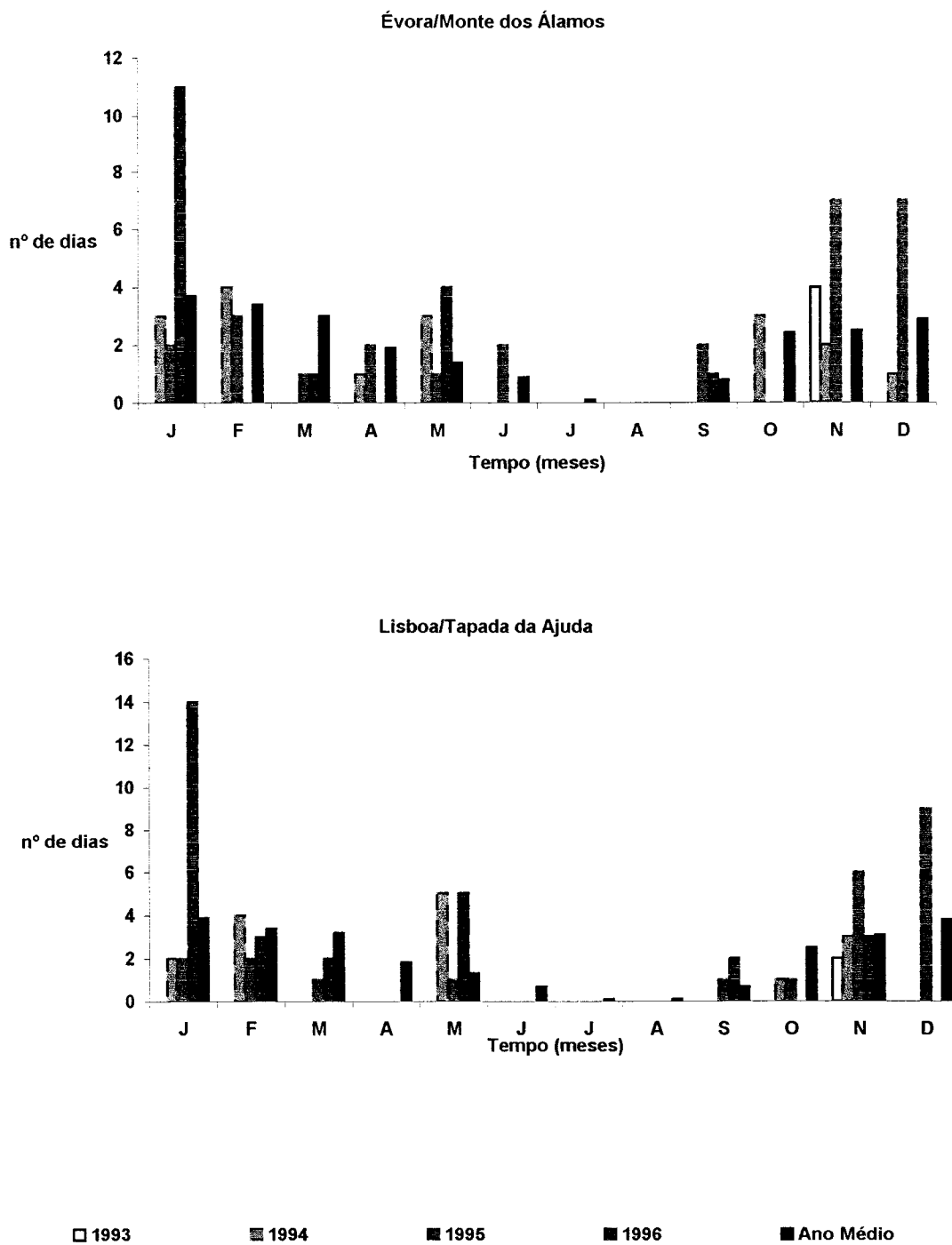
### **3.2.3. Água no solo**

A variação temporal do teor de humidade nos horizontes Ap1 e Ap2 (ver Materiais e Métodos) dos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa), durante o período



■ Precipitação (R)      ▨ Evapotranspiração potencial (ETP, Penman)

**Fig. 3.7. Precipitação e Evapotranspiração Potencial mensais durante o período experimental em Évora/Monte dos Álamos e Lisboa/Tapada da Ajuda. \* precipitações obtidas a partir da Estação Meteorológica de Évora. Apenas foi possível estimar os valores da ETP em Évora a partir de Julho de 1995**



**Fig. 3.8. Número de dias em que a Precipitação foi superior a 10 mm durante o período experimental, no Ano Médio, em Évora/Monte dos Álamos e Lisboa/Tapada da Ajuda**

experimental, é apresentada nas Figuras 3.9 e 3.10. Em cada solo foram considerados teores médios de humidade relativos a 4 camadas: 0-5 cm, 0-10 cm, 0-20 cm e 20-25 cm no solo Pmg e 0-5 cm, 0-10 cm, 0-15 cm e 15-25 cm no solo Cb. Os teores de humidade das camadas 0-10 cm, 0-15 cm, 15-25 e 0-20 cm são as médias aritméticas dos teores de humidade medidos nas sub-camadas com 5 cm de espessura em que foram sub-divididas para análise (ver Materiais e Métodos).

Os teores de humidade do solo acompanharam o curso da precipitação e evapotranspiração, sendo mais elevados na estação mais fria e menores durante os meses mais quentes. Entre Junho e Setembro de 94, 95 e 96, os horizontes Ap1 e Ap2 apresentaram valores de humidade abaixo do Coeficiente de Emurchecimento (C.E.) tanto no solo Pmg (Fig. 3.9) como no solo Cb (Fig. 3.10). Entre meses de Novembro e Março dos três anos hidrológicos amostrados, foram registados regularmente teores de humidade superiores à Capacidade de Campo no horizonte Ap1 de ambos os solos. Na Primavera e no Outono as variações de humidade foram maiores que no Verão e no Inverno: não raras vezes, os teores de humidade alternaram rapidamente entre valores abaixo de C.E. e acima de C.C..

Ao longo do ano, em ambos os solos o teor de água variou menos em profundidade (horizonte Ap2) que na camada mais superficial (horizonte Ap1), provavelmente porque a distância relativamente à superfície de evaporação e a capacidade de retenção para a água são maiores em Ap2 que em Ap1. Contudo, a variação de humidade no horizonte Ap2 é ainda apreciável (por exemplo, durante o ano de 1994 o teor de água do solo variou entre 0,03 e 0,34 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> no solo Pmg e entre 0,12 e 0,50 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> no solo Cb), limitando por isso o funcionamento do solo como reservatório de água eficaz ao longo do ciclo vegetativo das culturas anuais na zona mediterrânea (Costa, 1973; Ghildyal e Tripathi, 1987).

Durante a maior parte de cada ano, o teor de água é mais elevado no horizonte Ap2 que no horizonte Ap1, mas a seguir a fortes chuvadas, sobretudo no Outono e nos meses de Maio, o horizonte Ap1 apresentou teores de humidade mais elevados que o horizonte Ap2. Esta variação, consequência do regime de precipitação característico de climas mediterrâneos e da evolução da evapotranspiração potencial, mostra que ambos os perfis se encontram mais frequentemente em fase de secagem (Perfis S) que em fase de humedecimento (perfis H), isto é, que há condições para o predomínio ao longo do ano de movimentos de água ascendentes sobre os descendentes. As diferenças entre os teores de humidade em Ap2 e Ap1 foram, em valor absoluto, maiores no solo Cb que

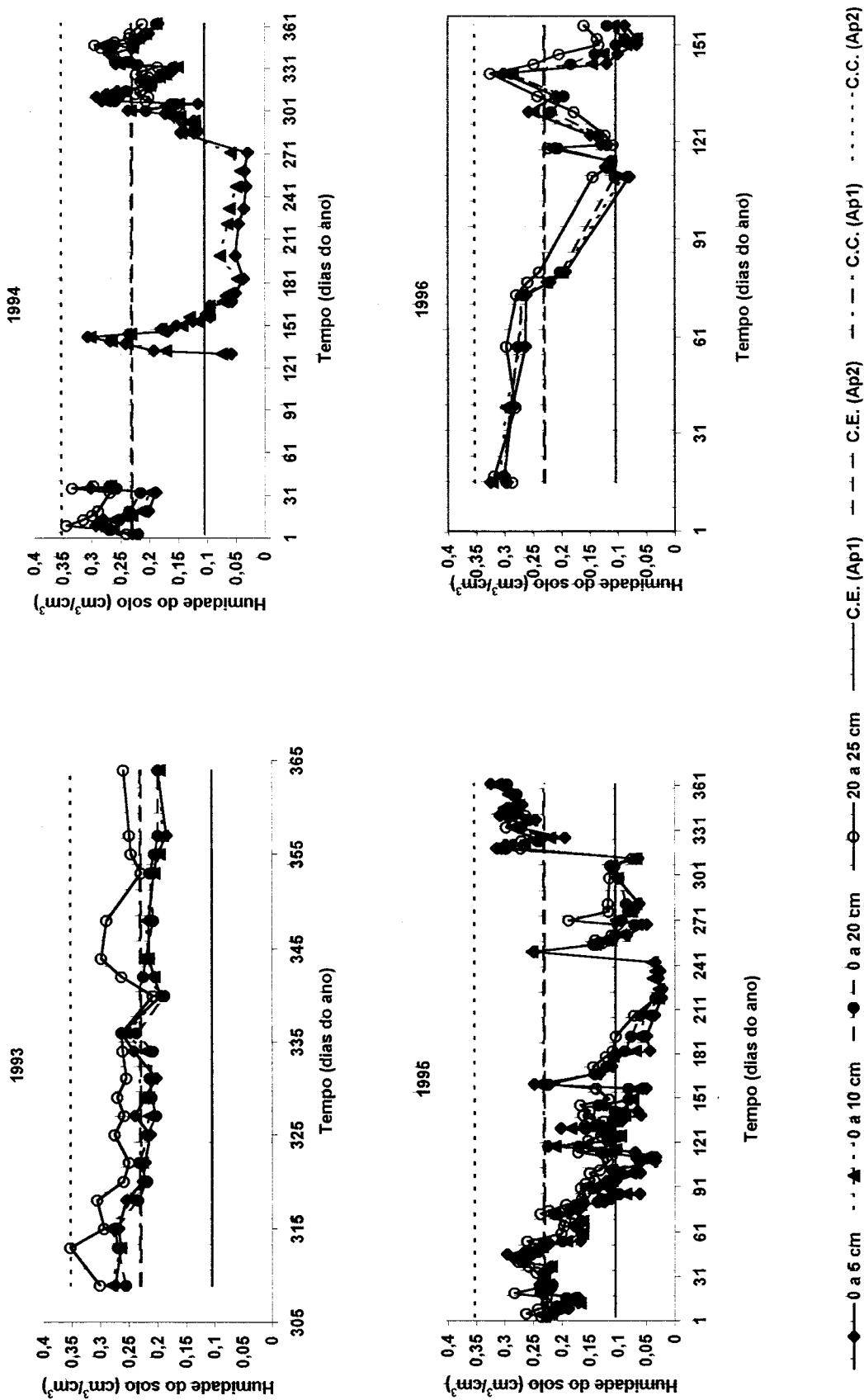
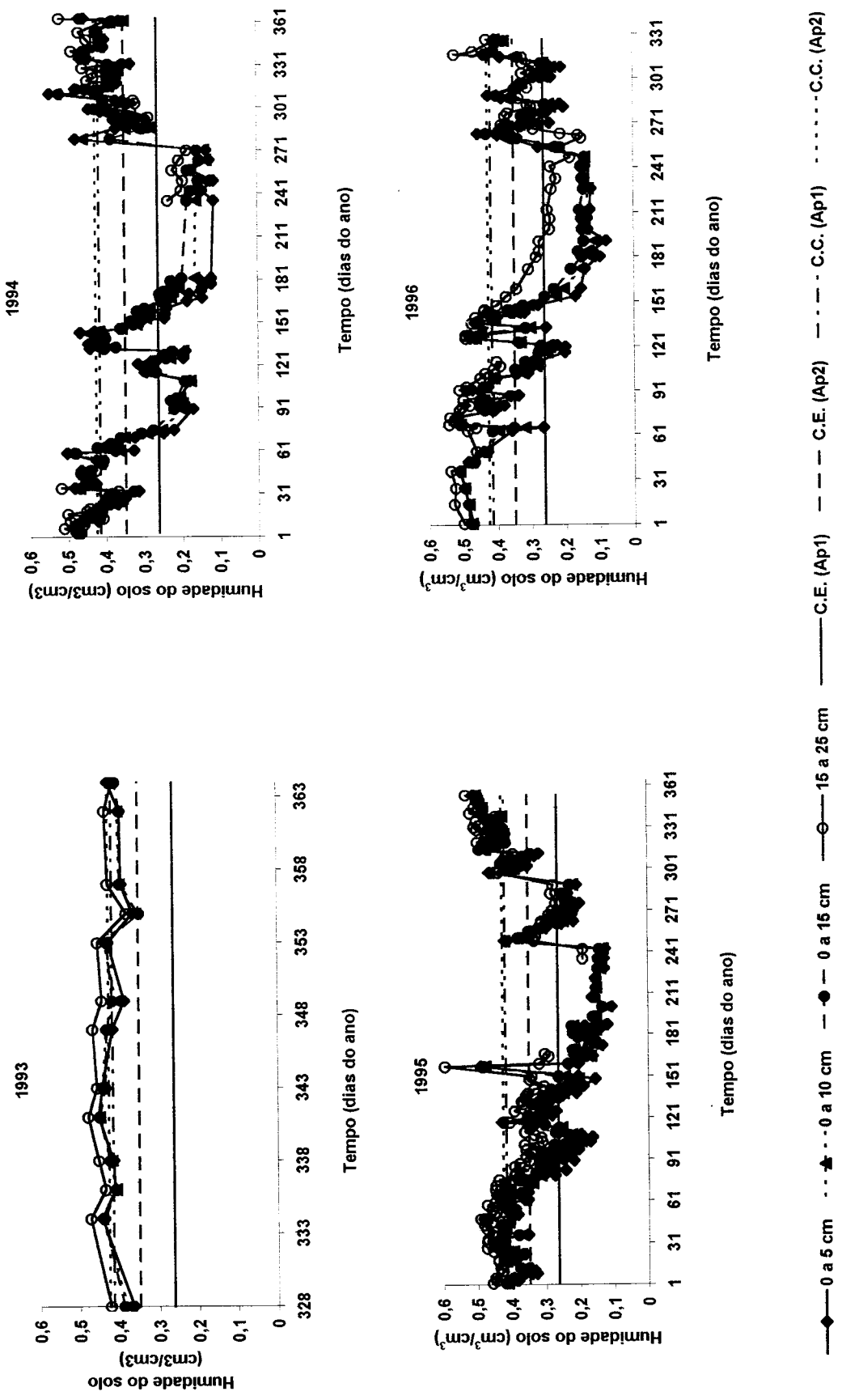


Fig. 3.9. Teor médio de água no solo Pmg (Evora) entre 0-5 cm, 0-10 cm, 0-20 cm e 20-25 cm de profundidade, ao longo dos anos indicados. Ap1 e Ap2 - Horizontes A disturbados por mobilizações ou outras práticas agrícolas; C.E. - Coeficiente de emurchecimento; C.C.- Capacidade de campo.



**Fig. 3.10. Teor médio de água no solo Cb (Lisboa) entre 0-5 cm, 0-10 cm, 0-15 cm e 20-25 cm de profundidade, ao longo dos anos indicados. Ap1 e Ap2 - Horizontes A disturbados por mobilizações ou outras práticas agrícolas; C.E. - Coeficiente de emurchecimento; C.C.- Capacidade de campo.**

no solo Pmg e, no solo Cb, foram maiores durante o período mais seco (Junho a Setembro).

De uma forma geral, os teores de humidade relativos à camada de 0-5 cm e à de 0-10 cm são semelhantes entre si ao longo dos períodos estudados nos dois solos. Contudo, em fases de rápida secagem da camada mais superficial do solo são visíveis (por exemplo, finais de Maio de 1995 e 1996 e de Novembro de 1995 no solo Pmg ou finais de Abril de 1995 e 1996 e em Outubro de 1995 no solo Cb, além do período estival em ambos os locais) as diferenças entre os teores de humidade das duas camadas (Figuras 3.9 e 3.10). Este comportamento é importante por poder ocorrer em períodos críticos do ciclo vegetativo das plantas (germinação e emergência, aparecimento das primeiras folhas,...), sobretudo as primaveris.

### 3.3. Emergência

Apresentam-se aqui os resultados das medições de emergência em ambos os locais (Évora, solo Pmg e Lisboa, solo Cb), e analisa-se a sua variação com a temperatura e o teor de humidade do solo.

A **dimensão** das populações emergidas à superfície dos solos Pmg e Cb é avaliada através da emergência final. Para as várias temperaturas medidas nos dois solos foram estabelecidas relações lineares entre as **taxas** (ou velocidades, em hora<sup>-1</sup> ou dia<sup>-1</sup>) medidas para 50% e 80% da germinação final e a correspondente temperatura média e foram calculados os tempos térmicos de emergência e as temperaturas cardinais para cada uma das culturas em estudo. A **dispersão** da emergência de uma amostra de sementes nos solos Pmg e Cb é avaliada a partir de curvas de emergência acumulada em função do tempo térmico.

Estes parâmetros foram avaliados para os teores médios de humidade medidos nos dois solos entre a sementeira e a emergência da última plântula de cada cultura. Além disso, a influência do teor de água do solo na emergência das culturas foi também analisada a partir da relação entre o tempo térmico correspondente a 50% da emergência final e o teor médio de humidade do solo durante o período de germinação (estimado para cada temperatura média). É nesta fase inicial do ciclo, em particular na fase de embebição, que a humidade é um factor determinante (Mayer e Poljakoff-Mayber, 1975).

### 3.3.1. Emergência acumulada

A Fig. 3.11 mostra a emergência acumulada (expressa em percentagem das sementes utilizadas) nos solos Pmg e Cb, para duas culturas outono-invernais (ervilha e tremocilha) e para duas culturas primaveris (milho e sorgo), como exemplo das demais. As curvas correspondem a várias temperaturas médias representativas da gama térmica ambiental nas condições mediterrâneas. As temperaturas referem-se aos períodos entre a sementeira e o momento estimado para 50% da emergência final. Nalgumas experiências a temperaturas médias elevadas, o teor médio de humidade do solo medido entre a sementeira e a emergência final foi inferior a 50% da Capacidade Utilizável do respectivo solo.

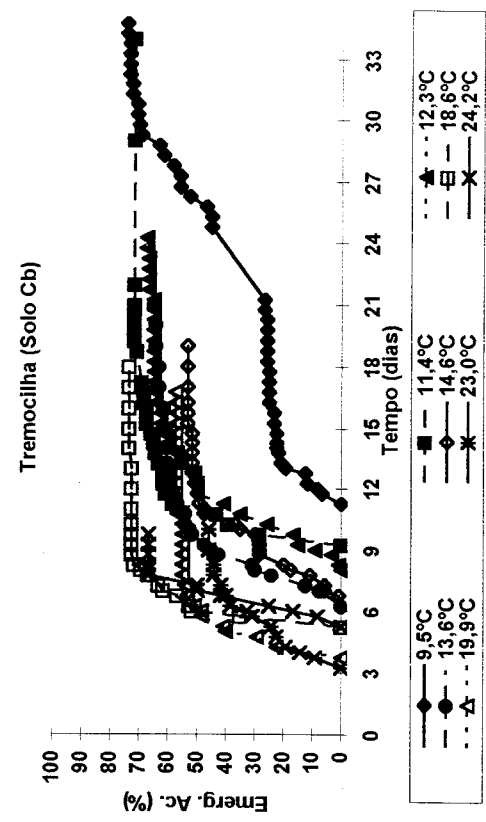
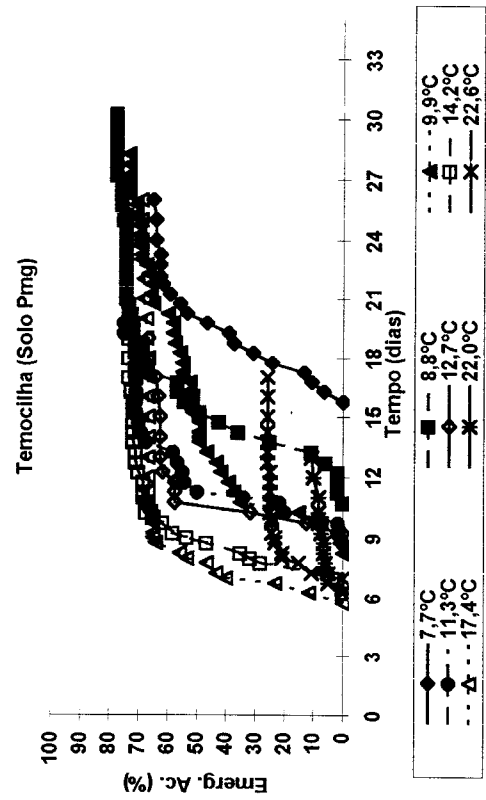
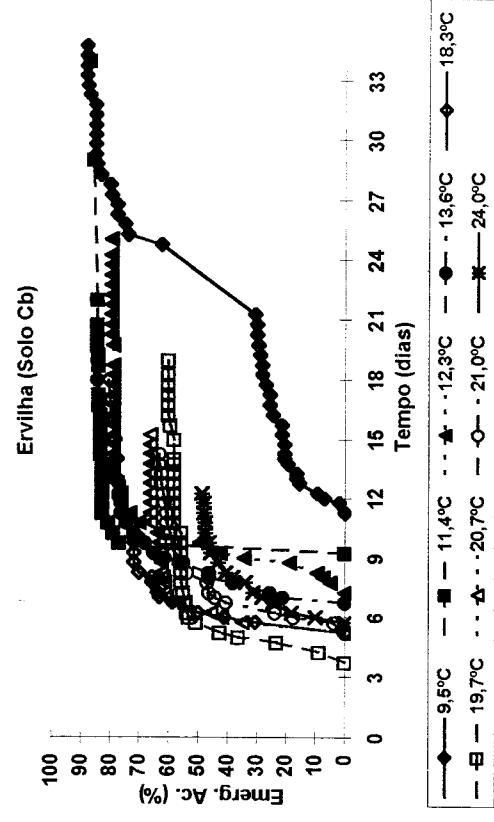
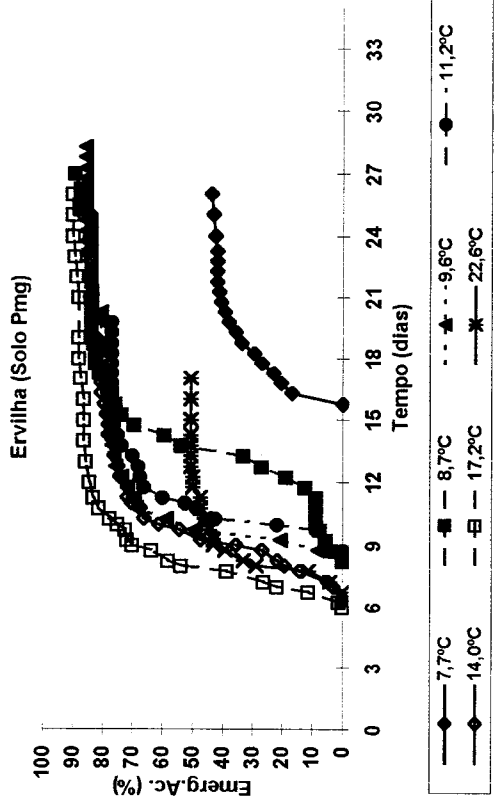
Nos dois solos e para qualquer das culturas apresentadas, os aspectos fundamentais que caracterizam as curvas são semelhantes aos apontados para as curvas de germinação: a forma aproximadamente sigmoideal, o que implica velocidades instantâneas de emergência maiores nos percentis intermédios; o atraso crescente na emergência das primeiras plântulas à medida que a temperatura média diminui; o aumento da duração da emergência ao longo de cada amostra à medida que a temperatura média diminui. Resultados similares foram obtidos, por exemplo, no estudo da emergência do amendoim (Leong e Ong, 1983; Abreu, 1987), da soja (Muendel, 1986), do grão (Auld *et al.*, 1988), do trigo (Gan *et al.*, 1992) ou da erva-dos-prados (Yamamoto *et al.*, 1997).

### 3.3.2. Taxas de emergência, temperaturas cardinais e tempos térmicos

#### 3.3.2.1. Variação da taxa de emergência em função da temperatura e da humidade do solo

A Fig 3.12 mostra a relação entre as taxas de emergência das sete culturas e a temperatura média à profundidade de sementeira nos solos Pmg e Cb, para 50% da emergência final ( $0,5E_f$ ). Para qualquer cultura, as taxas máximas de emergência medidas no solo Cb foram maiores que as medidas no solo Pmg. Nas culturas outono-invernais, a taxa máxima variou entre  $0,11 \text{ d}^{-1}$  (fava) e  $0,15 \text{ d}^{-1}$  (ervilha) no solo Pmg e entre  $0,125 \text{ d}^{-1}$  (fava) e  $0,22 \text{ d}^{-1}$  (tremocilha e grão) no solo Cb; nas culturas primaveris a taxa máxima variou entre  $0,17 \text{ d}^{-1}$  (girassol e milho) e  $0,2 \text{ d}^{-1}$  (sorgo) no solo Pmg e entre  $0,18 \text{ d}^{-1}$  (girassol) e  $0,25 \text{ d}^{-1}$  (sorgo) no solo Cb. Para as culturas outono-invernais, a temperatura média correspondente à taxa máxima de emergência foi maior no solo Cb





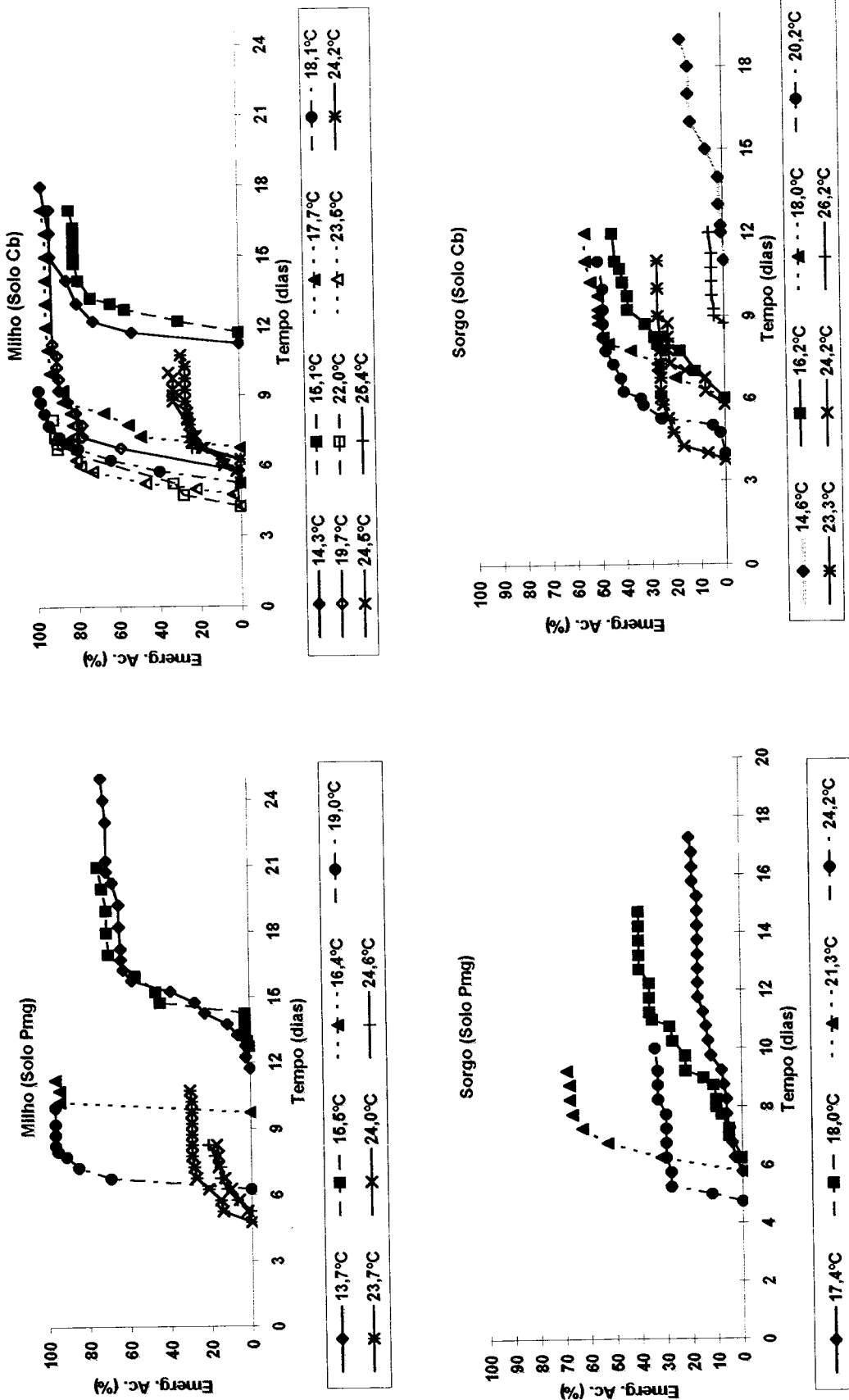
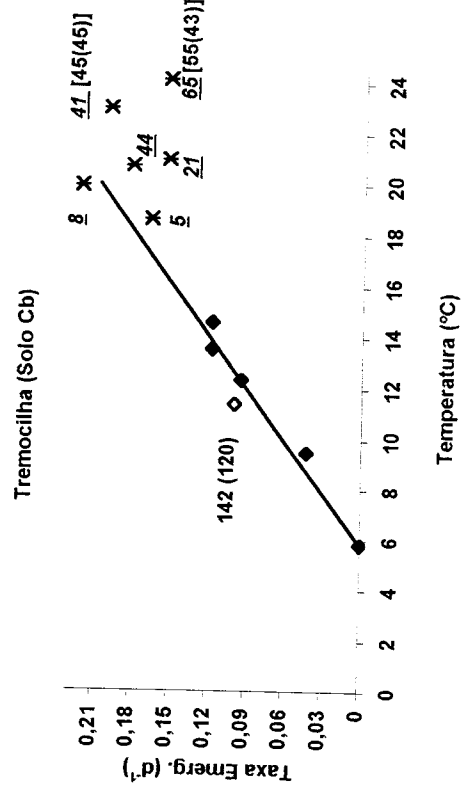
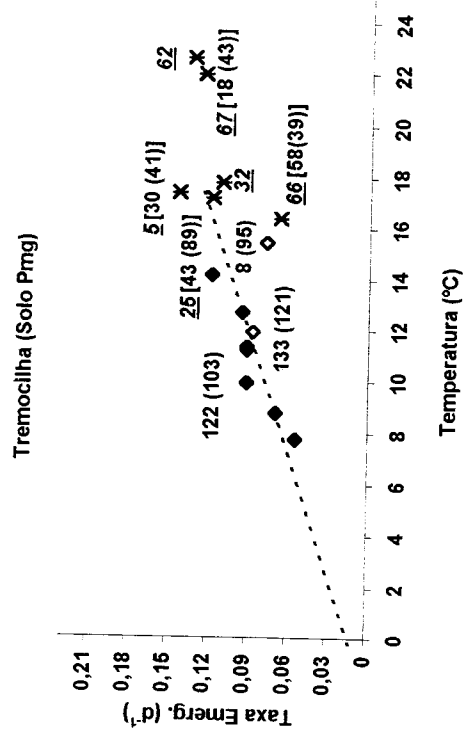
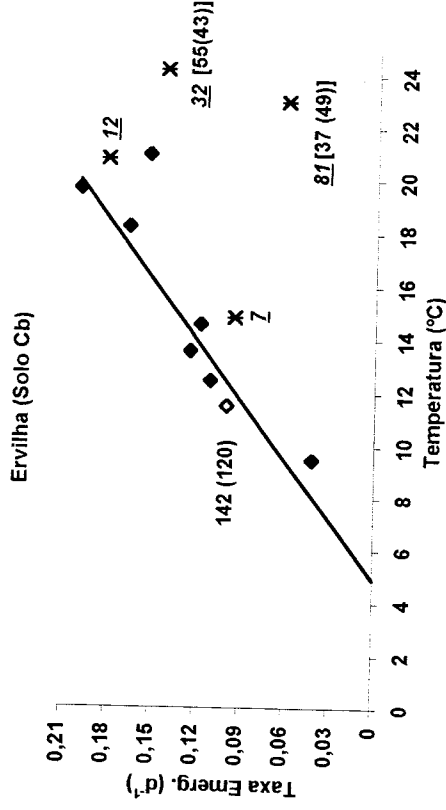
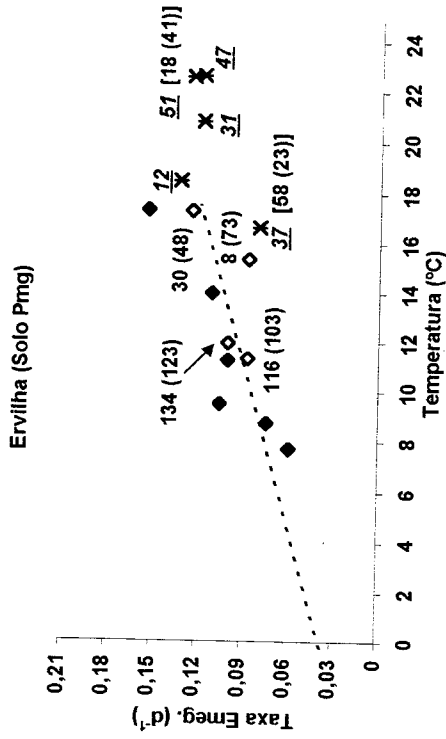
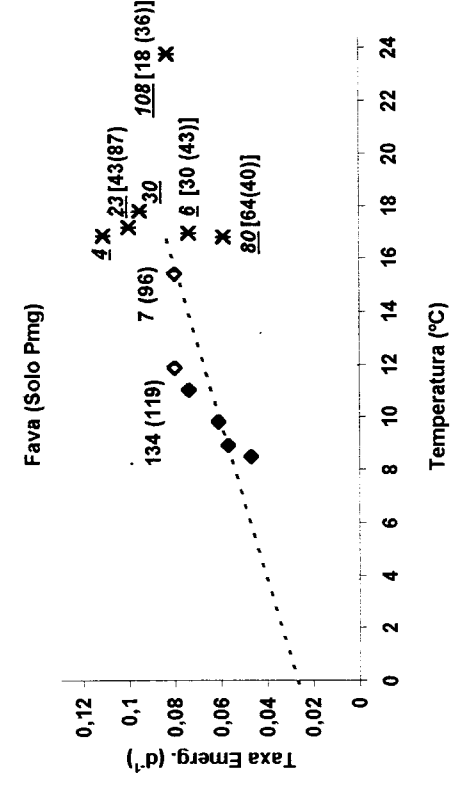
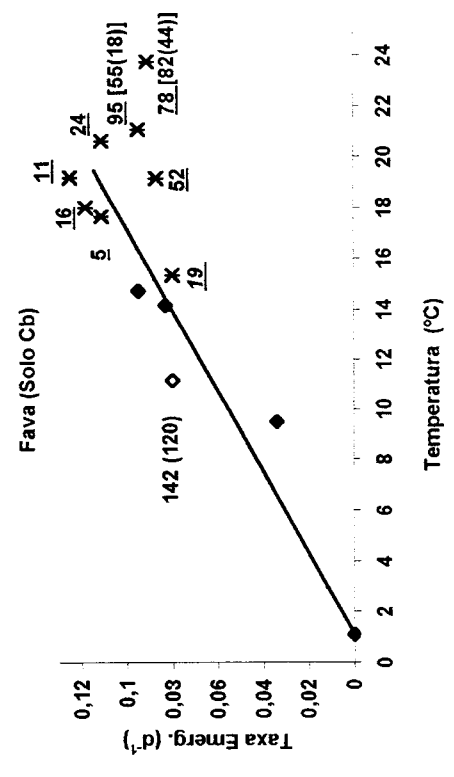
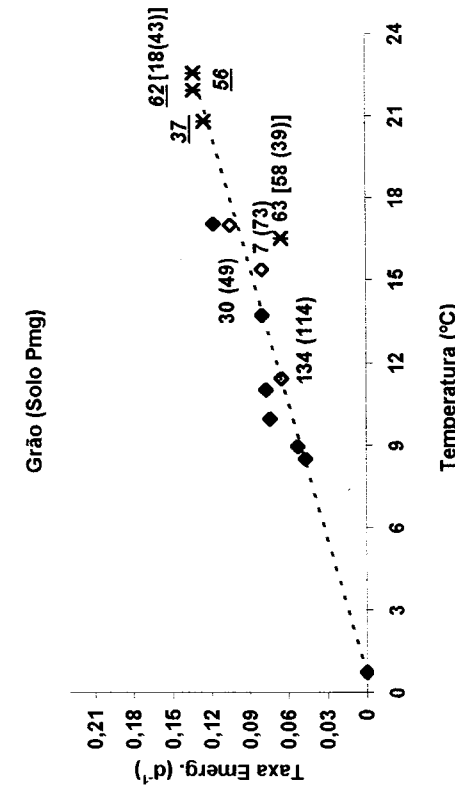
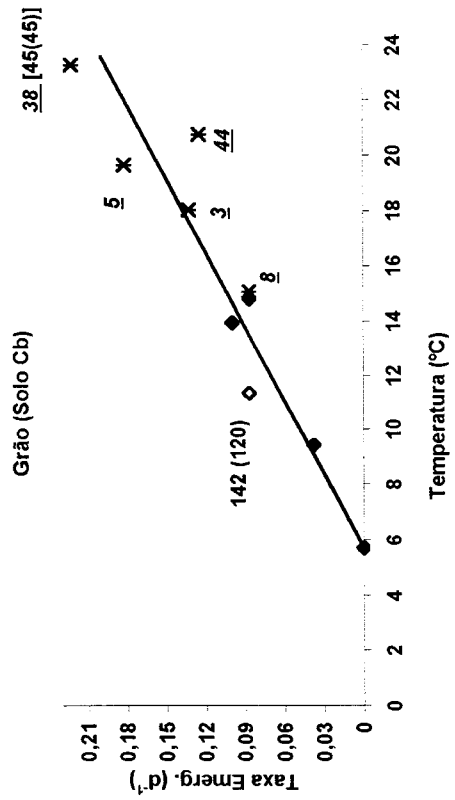
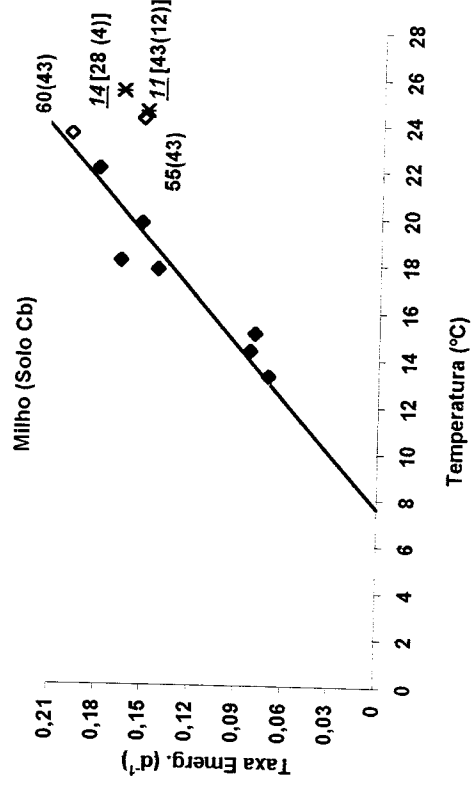
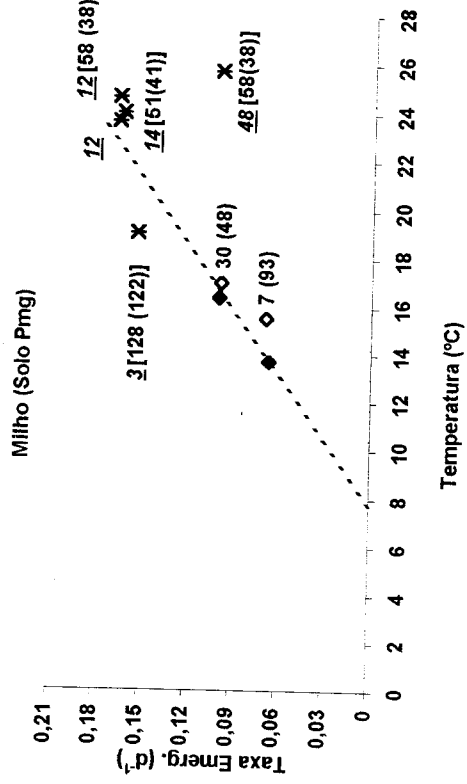
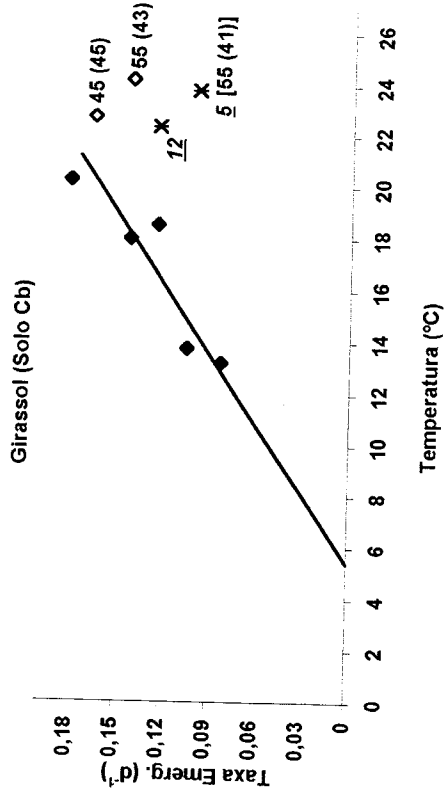
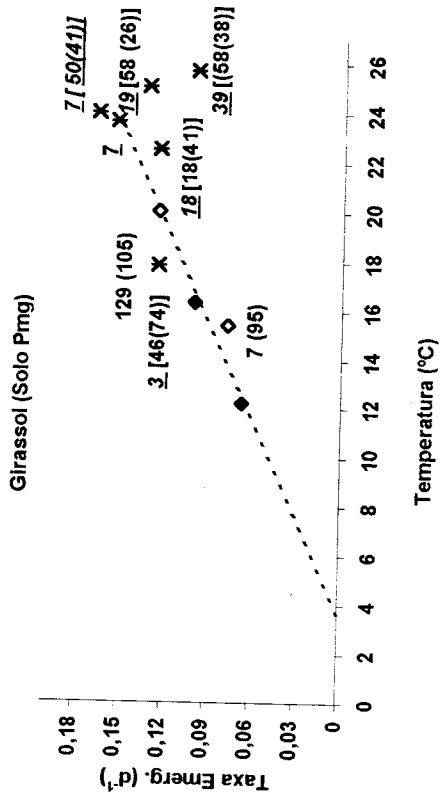
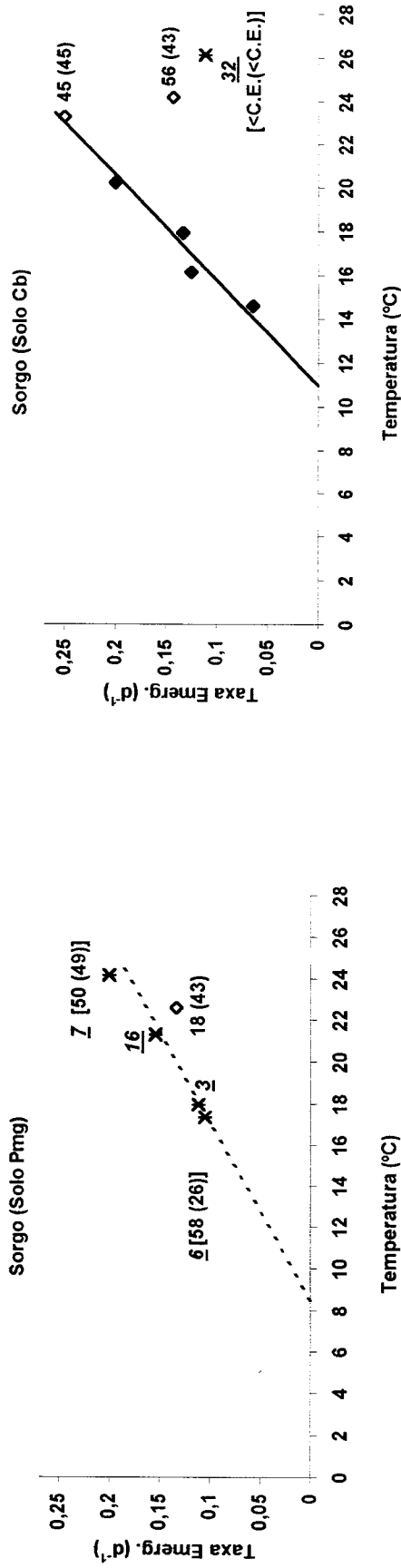


Fig. 3. 11. Curvas de emergência acumulada ao longo do tempo (DAS - dias após a sementeira), a várias temperaturas, para as espécies indicadas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa): Nota: curvas representadas por ..... referem-se a ensaios ao longo dos quais o teor médio de humidade nos dois solos, Pmg e Cb, foi inferior a 50% da Capacidade Utilizável respectiva









**Fig. 3.12. Variação da taxa de emergência com a temperatura nas espécies indicadas, para 50% do total de plântulas emergidas ( $E_{0,5}$ ) nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa).** Nota 1: as rectas de regressão referem-se aos pontos até à taxa de emergência máxima; Nota 2: os pontos representados por losangos com fundo branco indicam teores de humidade superiores à C.C. entre a sementeira e 0,5E<sub>1</sub> ou inferiores a 50% C.U. em pelo menos parte do tempo de emergência; Nota 3: os pontos representados por asteriscos indicam a ocorrência de temperaturas médias horárias superiores à  $T_{opt}$  de germinação, associadas ou não com a ocorrência de teores de humidade definidos na Nota 2; Nota 4: os números em itálico e sublinhados referem-se ao número de horas em que a temperatura medida entre a sementeira e  $E_{0,5}$  foi superior à  $T_{opt}$  de germinação estimada; Nota 5: os restantes números referem-se aos valores da humidade do solo medidos no momento da sementeira e, entre parênteses, aos correspondentes a  $E_{0,5}$ .

que no solo Pmg; entre as culturas primaveris, foi maior no solo Pmg para o girassol e para o milho e da mesma ordem de grandeza para o sorgo. A temperatura média correspondente à taxa máxima de emergência  $[R(E)_{\text{máx}}]$  no solo Pmg foi aproximadamente de 17°C para a ervilha e para a fava, 17,5°C para a tremocilha, 22°C para o grão e 24°C para as três culturas primaveris; no solo Cb foi cerca de 20°C para a ervilha e para a tremocilha, de 23°C para o grão e 19°C para a fava, 20°C para o girassol, 22°C para o milho e 24°C para o sorgo.

Da Fig. 3.12 não é evidente que a gama de temperaturas medidas inclua os intervalos sub-óptimo e supra-óptimo, tal como foram definidos para a germinação. Além disso, a dispersão dos pontos é grande, sobretudo às temperaturas mais elevadas. No entanto, é visível que para as culturas nos dois tipos de solo, a taxa de emergência aumentou com a temperatura média até à temperatura correspondente a  $R(E)_{\text{máx}}$  (intervalo térmico A). A partir dessa temperatura (intervalo térmico B) a taxa ou diminui ou tende a manter-se aproximadamente constante, mas sem um padrão de comportamento claramente definido, excepto para o grão e, no solo Pmg, para o sorgo, onde não é visível este intervalo. Qualquer destes intervalos (A e B) estão contidos no intervalo térmico sub-óptimo de germinação, pois as temperaturas médias durante a emergência foram inferiores à temperatura óptima de germinação.

Para o intervalo térmico A foram estabelecidas regressões lineares (Fig.3.12) entre as taxas de emergência das sete culturas estudadas e as respectivas temperaturas médias em ambos os solos. O Quadro 3.5 mostra as equações de regressão, os respectivos níveis de correlação, as temperaturas-base estimadas e a significância estatística de cada regressão. Apenas a regressão referente à fava semeada no solo Pmg não é significativa para um nível de probabilidade de 95%. No solo Pmg, os valores de  $R^2$  variaram entre 0,40 (ervilha) e 0,89 (girassol); no solo Cb, variaram entre 0,68 (fava) e 0,97 (sorgo).

Apesar do significado estatístico das regressões no intervalo A, a inspecção da Fig. 3.12 mostra uma dispersão acentuada dos pontos, provavelmente devido a teores de humidade do solo desfavoráveis e/ou à ocorrência de temperaturas “instantâneas” muito elevadas que retardam o desenvolvimento. Para caracterizar esta dispersão, cada experiência foi classificada de acordo com o teor médio de humidade do solo à sementeira e durante o tempo de emergência, e de acordo com a ocorrência de temperaturas médias horárias superiores à temperatura óptima de germinação (temperaturas elevadas). Estas condições são também indicadas na Fig. 3.12. Verifica-se

Quadro 3.5. Regressões lineares entre as taxas de emergência {R(E)} de 50% da população emergida e as temperaturas médias (T), para as culturas indicadas, e respectivas temperaturas-base. R<sup>2</sup> é o coeficiente de determinação das regressões e  $\alpha$  é o respectivo nível de significância (Teste F)

Cultura	Solo	Regressão linear		T <sub>base</sub> (°C)	Nível de significância ( $\alpha$ )
		Equação	R <sup>2</sup>		
Ervilha	Pmg	$y = 0,0047x + 0,0376$	0,40	-8	< 0,05
	Cb	$Y = 0,0131x - 0,0666$	0,86	5,1	< 0,05
Tremocilha	Pmg	$y = 0,0065x + 0,0128$	0,62	-1,9	< 0,05
	Cb	$y = 0,0146x - 0,0844$	0,94	5,8	< 0,05
Grão	Pmg	$y = 0,0057x + 0,0041$	0,83	-0,7	< 0,05
	Cb	$y = 0,0126x - 0,0776$	0,94	6,2	< 0,05
Fava	Pmg	$y = 0,0037x + 0,0252$	0,42	-6,8	< 0,1
	Cb	$y = 0,0062x - 0,0066$	0,68	1,1	< 0,05
Girassol	Pmg	$y = 0,0076x - 0,0279$	0,89	3,7	< 0,05
	Cb	$y = 0,0112x - 0,0591$	0,84	5,3	< 0,05
Milho	Pmg	$y = 0,0113x - 0,0888$	0,86	7,9	< 0,05
	Cb	$y = 0,0131x - 0,101$	0,92	7,7	< 0,05
Sorgo	Pmg	$y = 0,0116x - 0,0986$	0,78	8,5	< 0,05
	Cb	$y = 0,0207x - 0,2269$	0,97	11	< 0,05



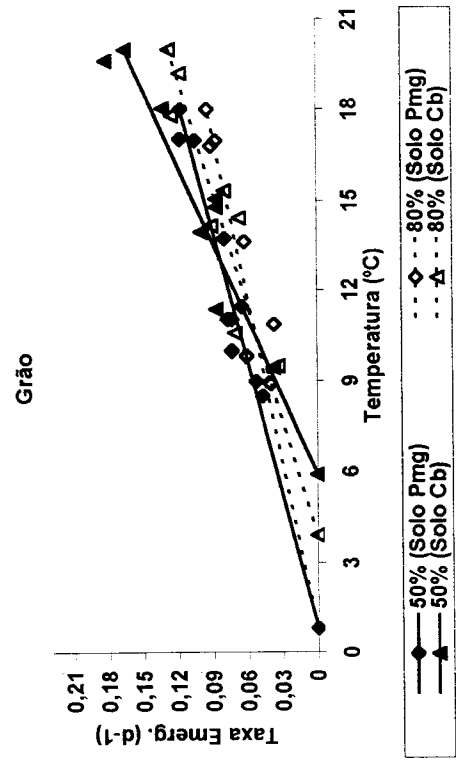
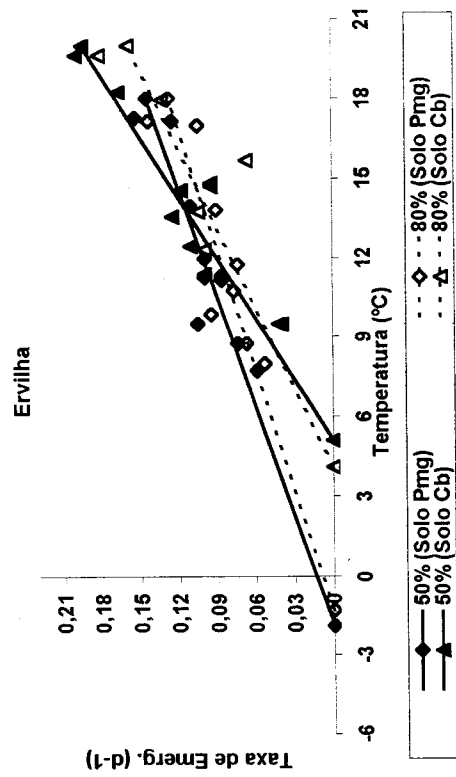
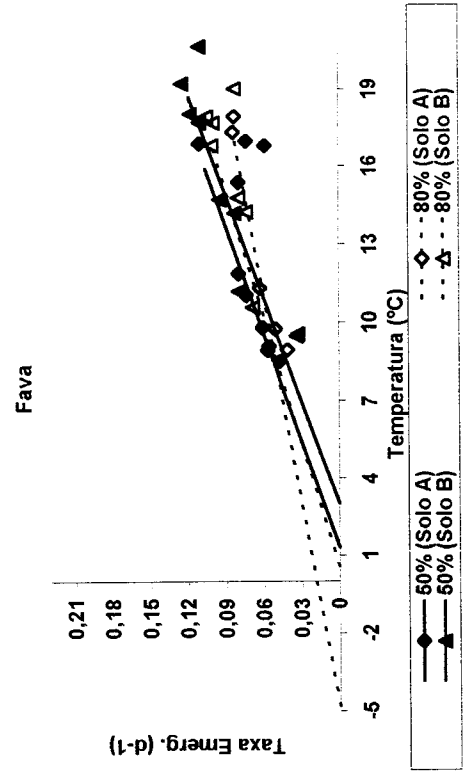
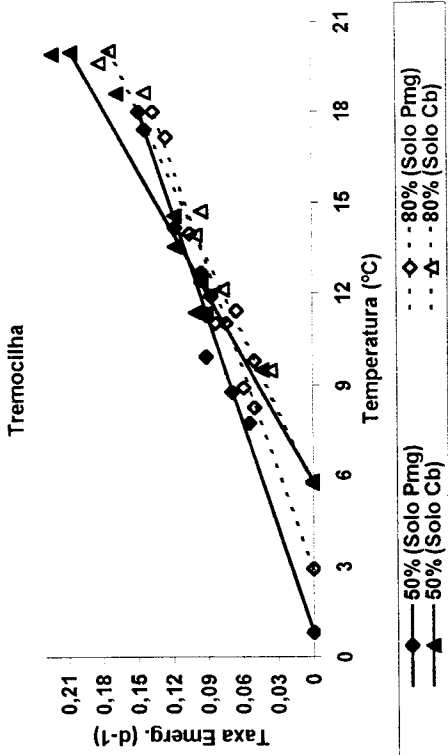
que a dispersão neste intervalo térmico é sobretudo devida a atrasos na emergência em condições de solo muito seco à sementeira e/ou à exposição prolongada a temperaturas médias horárias superiores à temperatura óptima de germinação. Esta última situação é a dominante no intervalo térmico B, nas experiências que decorreram tanto no solo Pmg como no solo Cb, sendo provavelmente responsável pela inexistência de uma tendência particular de comportamento da taxa de emergência em função da temperatura nesta gama.

É de realçar que teores elevados de humidade no solo (superiores à capacidade de campo), que ocorreram sobretudo a temperaturas baixas, não parecem afectar negativamente as taxas de emergência de qualquer das culturas nos dois tipos de solos.

### **3.3.2.2. Taxa de emergência vs. temperatura para condições térmicas e hídricas “não limitantes”**

Para o intervalo Térmico A foram estabelecidas regressões lineares entre as taxas de emergência medidas para duas fracções emergidas ( $0,5E_f$  e  $0,8E_f$ ) das sete culturas testadas e respectivas temperaturas médias, sempre que em qualquer dos solos Pmg e Cb as condições hídricas e térmicas entre a sementeira e a emergência aparentemente não limitaram a velocidade de emergência das plântulas de cada cultura. Para isso, não se consideraram as experiências em que o teor de água no solo à sementeira foi igual ou inferior a 20% da Capacidade Utilizável e, independentemente do teor de água no solo, não se consideraram as experiências onde o número de horas de temperatura média horária superior à temperatura óptima de germinação ultrapassou o equivalente a cerca de duas horas por dia durante o tempo de emergência. Os resultados são apresentados na Fig. 3.13 e o Quadro 3.6 mostra os coeficientes de determinação das regressões lineares estabelecidas, os tempos térmicos para cada cultura e as temperaturas cardinais estimadas. O ANEXO C mostra as equações de regressão e respectivos níveis de correlação e de significância. Os resultados mostram que ao longo do intervalo térmico A a relação entre taxa de emergência e temperatura foi linear para qualquer das fracções emergidas consideradas com um nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05.

Para todas as experiências no intervalo térmico B foram também estabelecidas regressões lineares sempre que o nº de pontos foi superior a 3, mas nenhuma das regressões foi significativa para um nível de probabilidade de 90%.



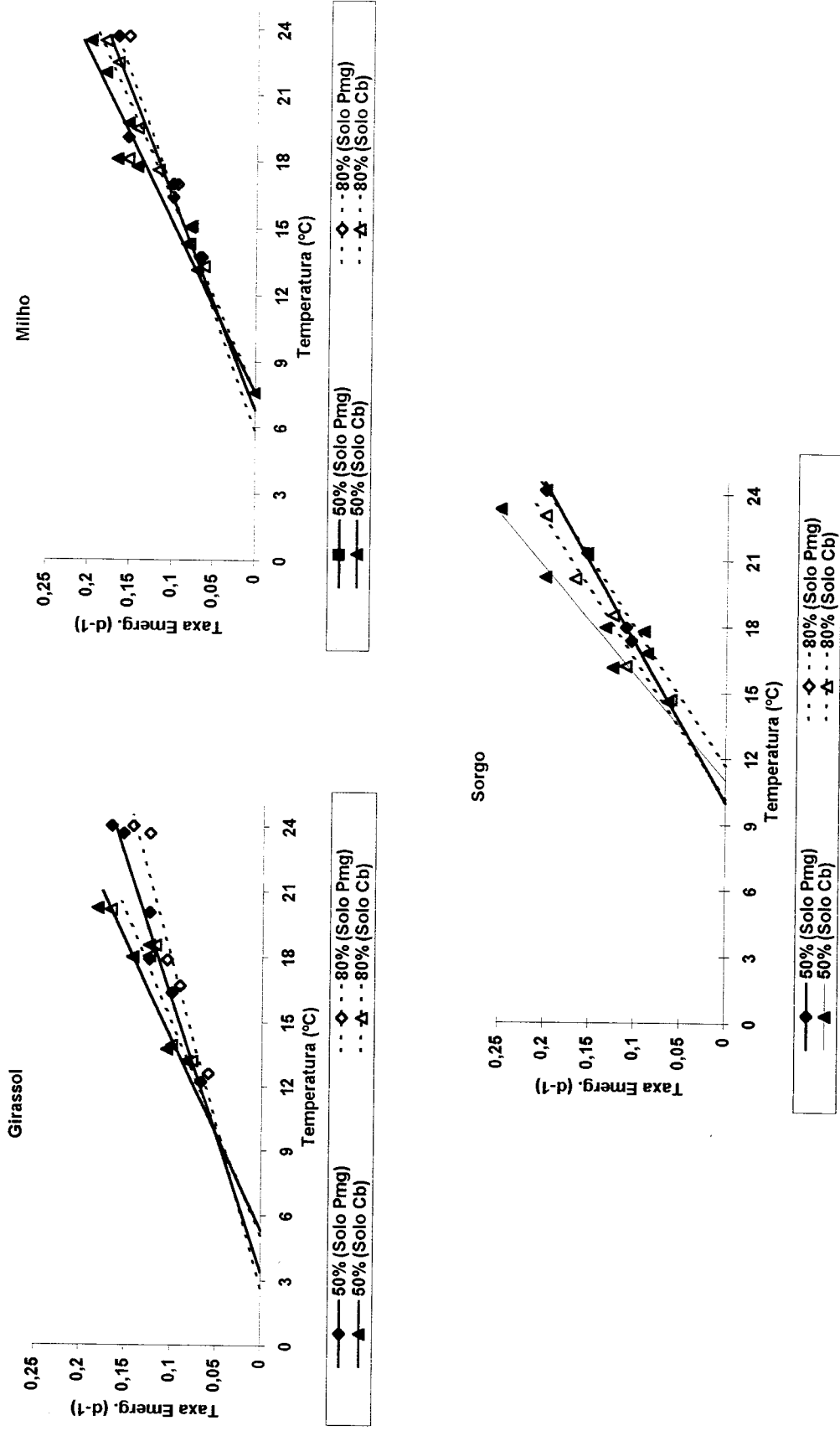


Fig. 3.13. Variação da emergência com a temperatura para 50% e 80% das plântulas emergidas das culturas indicadas, nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa)

**Quadro 3.6. Temperaturas cardinais e tempos térmicos de emergência (50% e 80% da população emergida) das culturas indicadas, nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa), obtidos a partir das regressões entre a taxa de emergência e a temperatura. O número de pontos**

regredidos e os coeficientes de determinação das regressões estão também apresentados. Todas equações são significativas para uma probabilidade de 95%.

Culturas	Solos	Fracção	Temperatura	Tempo	Coeficiente de	Nº de	
		Emergida	base	térmico			
		(%)	(°C)	°Cd	(R <sup>2</sup> )	(n)	
O t o n o / I n v e r n o	Ervilha	Pmg	50	-1,9	137	0,81	9
			80	-1,3	151,5	0,72	9
		Cb	50	5,1	76,3	0,86	8
			80	4,1	100	0,64	8
	Tremocilha	Pmg	50	0,8	116,3	0,94	9
			80	2,9	111,1	0,91	9
		Cb	50	5,8	70	0,94	7
			80	5,6	83,3	0,91	7
	Grão	Pmg	50	0,8	147,1	0,89	8
			80	0,8	181,8	0,72	8
		Cb	50	5,9	86,5	0,85	7
			80	3,9	126,6	0,8	7
Fava	Pmg	50	1,3	137	0,98	6	
		80	-4,8	263,16	0,69	6	
	Cb	50	3,4	125	0,9	7	
		80	0,6	181,8	0,72	7	
P r i m a v e r ã o / V e r ã o	Girassol	Pmg	50	3,4	126,6	0,97	6
			80	2,7	151,5	0,92	6
		Cb	50	5,3	89,3	0,84	5
			80	5,1	99	0,84	5
	Milho	Pmg	50	6,8	95,2	0,88	5
			80	5,9	106,4	0,8	5
		Cb	50	7,6	76,3	0,92	8
			80	7,5	85,5	0,92	8
	Sorgo	Pmg	50	10	71,9	1	4
			80	11,7	62,1	0,99	4
		Cb	50	11	48,3	0,97	5
			80	10,2	62,5	0,96	5

Para  $0,5E_f$  das culturas outono-invernais, os valores de  $R^2$  relativos ao intervalo térmico A variaram entre 0,81 (ervilha) e 0,98 (fava) no solo Pmg e entre 0,85 (fava) e 0,94 (tremocilha) no solo Cb; para  $0,8E_f$  variaram entre 0,69 (fava) e 0,91 (tremocilha) no solo Pmg e entre 0,64 (ervilha) e 0,91 (tremocilha) no solo Cb. Para  $0,5E_f$  das culturas primaveris  $R^2$  variou entre 0,88 (milho) e 1 (sorgo) no solo Pmg e entre 0,84 (girassol) e 0,97 (sorgo) no solo Cb; para  $0,8E_f$  variou entre 0,80 (milho) e 0,99 (sorgo) no solo Pmg e entre 0,84 (girassol) e 0,96 (sorgo) no solo Cb. A linearidade entre taxa e temperatura confirma resultados apresentados por Kanemasu *et al.*, (1975) para o sorgo, por Warrington e Kanemasu (1983) para o milho, por Mohamed *et al.* (1988b) para o amendoim e para o milho painço, por Craufurd *et al.* (1996) para o feijão frade ou por Vigil *et al.* (1997) para o nabo.

Ao longo do intervalo A e para  $0,5E_f$ , foram diferentes as taxas de emergência para as diversas culturas e, para cada cultura, foram diferentes as taxas nos solos Pmg e Cb (Fig. 3.13). Entre as culturas outono-invernais a ervilha foi a mais rápida a emergir no solo Pmg; a fava foi a mais lenta enquanto que a tremocilha foi mais rápida que o grão. No solo Cb as taxas de emergência da ervilha e da tremocilha, semelhantes entre si, foram maiores que as taxas de emergência do grão e da fava enquanto que a taxa de emergência do grão foi superior à da fava para valores da temperatura média superiores a cerca de 11°C. Para as culturas primaveris, em ambos os solos, até cerca de 18°C a taxa de emergência do girassol foi maior que as taxas do milho e do sorgo enquanto que, para temperaturas superiores, o sorgo apresentou as taxas maiores.

Entre as culturas outono-invernais, as taxas de emergência foram maiores no solo Pmg até uma determinada temperatura média (cerca de 14°C para a ervilha e para a tremocilha, cerca de 12,5°C para o grão e 9°C para a fava) e maiores no solo Cb para valores de temperatura superiores. Entre as culturas primaveris, a taxa de emergência é maior no solo Cb que no solo Pmg; as diferenças aumentaram com a temperatura média e equivalem a cerca de dia e meio para o girassol a 20°C de temperatura média, a cerca de meio dia e de um dia, respectivamente para o milho e para o sorgo, a 24°C.

### 3.3.2.3. Temperaturas cardinais

Devido ao baixo nível de significância estatística das regressões lineares estabelecidas entre taxas de emergência e temperaturas incluídas no intervalo B, as estimativas de  $T(E)_{opt}$  e da  $T(E)_{máx}$  não foram obtidas. Por isso, apenas foram analisadas as estimativas da temperatura-base [ $T(E)_{base}$ ] para a emergência das sete culturas (Quadro 3.6).

Para  $0,5E_f$  das culturas outono-invernais semeadas no solo Pmg, a ervilha apresenta a  $T_{base}$  menor ( $-1,9^\circ\text{C}$ ), a fava a  $T_{base}$  mais elevada ( $1,3^\circ\text{C}$ ) e a tremocilha e o grão  $T_{base}$  iguais ( $0,8^\circ\text{C}$ ); no solo Cb as  $T(E)_{base}$  estimadas foram menores para a fava ( $3,4^\circ\text{C}$ ) e para a ervilha ( $5,1^\circ\text{C}$ ) que para a tremocilha ( $5,8^\circ\text{C}$ ) e para o grão ( $5,9^\circ\text{C}$ ). Entre as culturas primaveris o girassol parece ser a cultura mais tolerante a baixas temperaturas [as  $T(E)_{base}$  para o girassol foram  $3,4^\circ\text{C}$  e  $5,3^\circ\text{C}$  nos solos Pmg e Cb, respectivamente] enquanto o sorgo foi a que apresentou maiores valores estimados para as  $T(E)_{base}$  ( $10^\circ\text{C}$  e  $11^\circ\text{C}$  nos solos Pmg e Cb, respectivamente); o milho apresentou valores intermédios ( $6,8^\circ\text{C}$  no solo Pmg e  $7,6^\circ\text{C}$  no solo Cb).

As temperaturas-base das culturas outono-invernais foram maiores no solo Cb que no solo Pmg enquanto que entre as culturas primaveris as diferenças não foram significativas. Para  $0,5E_f$  das culturas outono-invernais as diferenças foram de  $2,1^\circ\text{C}$  para a fava e atingiram  $7^\circ\text{C}$  para a ervilha; para  $0,8E_f$  as diferenças variaram entre  $2,9^\circ\text{C}$  para a tremocilha e  $5,4^\circ\text{C}$  para a ervilha. Entre as culturas primaveris as diferenças para  $0,5E_f$  variaram entre  $0,8^\circ\text{C}$  para o milho e  $2,9^\circ\text{C}$  para o girassol; para o 8º decil variaram entre  $1,5^\circ\text{C}$  para o sorgo e  $2,4^\circ\text{C}$  para o girassol.

Para cada cultura os valores estimados para a temperatura-base variaram entre os dois decis avaliados. A variação de  $T(E)_{base}$  entre o 5º decil ( $0,5E_f$ ) e o 8º decil ( $0,8E_f$ ) foi superior a  $1^\circ\text{C}$  no solo Pmg para a tremocilha ( $2,1^\circ\text{C}$ ) e para o sorgo ( $1,7^\circ\text{C}$ ), no solo Cb para o grão ( $2^\circ\text{C}$ ) e em ambos os solos para a fava ( $6,1^\circ\text{C}$  e  $2,8^\circ\text{C}$  nos solos Pmg e Cb, respectivamente); nos restantes casos, as diferenças são iguais ou inferiores a  $1^\circ\text{C}$ . Para testar a invariabilidade da  $T(E)_{base}$  ao longo da população foram calculados os respectivos intervalos de confiança para a emergência dos dois decis das sete culturas nos solos Pmg e Cb (Quadro 3.7). Os intervalos de confiança para  $0,5E_f$  relativos aos solos Pmg e Cb não se excluem mutuamente; contudo, a intersecção entre os intervalos é menor nas culturas outono-invernais, nomeadamente na tremocilha ( $2,2^\circ\text{C}$ ) e no grão ( $0,2^\circ\text{C}$ ) e maior nas culturas primaveris.

Para cada cultura nenhum dos intervalos dos dois decis se excluem mutuamente tornando possível considerar como homogéneas as amostras de sementes utilizadas (Ferrão *et al.*, 1996) e o valor médio destes decis como temperatura-base da amostra (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a). Contudo, a grande dimensão dos intervalos de confiança para uma probabilidade de 95% sugere alguma cautela na apreciação da homogeneidade apenas com base nesta avaliação estatística.

Para o 5º decil ( $0,5G_f$  ou  $0,5E_f$ ) a  $T(E)_{base}$  no solo Pmg foi inferior à  $T(G)_{base}$  no caso da ervilha, da tremocilha e do milho e superior no caso das restantes espécies; no solo Cb, apenas para o milho a  $T(E)_{base}$  foi inferior à  $T(G)_{base}$  (ver Quadro 3.1). No solo Pmg, as diferenças entre  $T(E)_{base}$  e  $T(G)_{base}$  das culturas outono-invernais variaram entre  $1,3^\circ\text{C}$  (grão) e  $3,2^\circ\text{C}$  (ervilha) enquanto que para as culturas primaveris variaram entre  $0,4^\circ\text{C}$  (girassol) e  $1,7^\circ\text{C}$  (milho); no solo Cb, entre as culturas outono-invernais variaram entre  $2,1^\circ\text{C}$  (ervilha) e  $8,3^\circ\text{C}$  (grão) e entre as culturas primaveris variaram entre  $0,7^\circ\text{C}$  (girassol) e  $2,5^\circ\text{C}$  (milho). A  $T(E)_{base}$  do grão obtida no solo Cb não se inclui no intervalo de confiança (para 95% de probabilidade) estimado para a correspondente  $T(G)_{base}$ .

**Quadro 3.7. Intervalos de 95% de Confiança para a  $T_{base}$  ( $^\circ\text{C}$ ) de emergência de 50% e 80% da emergência final ( $E_f$ ) para cada cultura**

Cultura	Solo Pmg		Solo Cb	
	$0,5E_f$	$0,8E_f$	$0,5E_f$	$0,8E_f$
<b>Ervilha</b>	(-3,1;7,9)	(-4,3;5,8)	(3,0; 9,7)	(2,5;13,1)
<b>Tremocilha</b>	(-0,9;3,9)	(1,3;6,0)	(3,7;8,9)	(3,4;9,4)
<b>Grão</b>	(-1,7;5,6)	(-1,4;9,3)	(3,4;11,0)	(0,9;11,0)
<b>Fava</b>	(-0,5;3,7)	(-8,6;3,4)	(-0,3;9,1)	(-3,1;12,2)
<b>Girassol</b>	(-0,1; 7,9)	(-2,3;10,5)	(-0,8;15,0)	(1,1;15,1)
<b>Milho</b>	(1,1;15,1)	(-1,1;17,6)	(1,2;18,6)	(5,3;11,4)
<b>Sorgo</b>	(7,9;12,1)	(9,5;14,1)	(8,6;13,4)	(7,3;13,9)

#### 3.3.2.4. Influência das temperaturas elevadas nas taxas de emergência

Resultados anteriores (secção 3.1.2.2) mostraram que a exposição mais ou menos prolongada das sementes e plântulas a temperaturas médias horárias superiores à  $T_{\text{ópt}}$  de germinação (temperaturas elevadas), associada ou não a teores baixos de humidade do solo, diminuiu a taxa de emergência da maioria das culturas.

Para avaliar este efeito, as taxas de emergência medidas ( $R_{\text{med}}$ ) para  $0,5 E_f$  nas experiências afectadas pela ocorrência de temperaturas elevadas, foram subtraídas as respectivas taxas de emergência estimadas ( $R_{\text{est}}$ ) a partir das equações de regressão estabelecidas para o intervalo térmico A (secção 3.1.2.2), e estabelecidas relações entre  $R_{\text{med}}-R_{\text{est}}$  e o nº de horas durante as quais as plântulas pré-emergentes foram expostas a

temperaturas superiores à  $T(G)_{opt}$ . Estes cálculos foram feitos para as culturas outono-invernais em ambos os solos e para as culturas primaveris no solo Pmg e são apresentados na Fig. 3.14. Quando o teor de água no solo à sementeira e/ou o teor médio de humidade entre a sementeira e tempo correspondente a  $0,5E_f$  foram inferiores a 50% da C.U., os respectivos valores são também apresentados na Figura.

Os resultados mostram que para a maioria das combinações cultura/solo,  $R_{med}-R_{est}$  diminuiu com o aumento da duração da exposição das plântulas pré-emergentes a temperaturas elevadas (isto é, a redução da taxa aumentou com o nº de horas de exposição); o decréscimo de  $R_{med}-R_{est}$  com o aumento do número de horas de exposição foi linear para a ervilha e a fava em ambos os solos e para a tremocilha, o girassol e o milho no solo Pmg (com um nível de significância estatística superior a 95%) (ANEXO D); para o grão em ambos os solos e para a tremocilha no solo Cb, não foi claro o sentido da influência das temperaturas elevadas na redução da taxa de emergência; para o sorgo semeado no solo Pmg as respectivas taxas não foram afectadas por exposições inferiores a 17 horas.

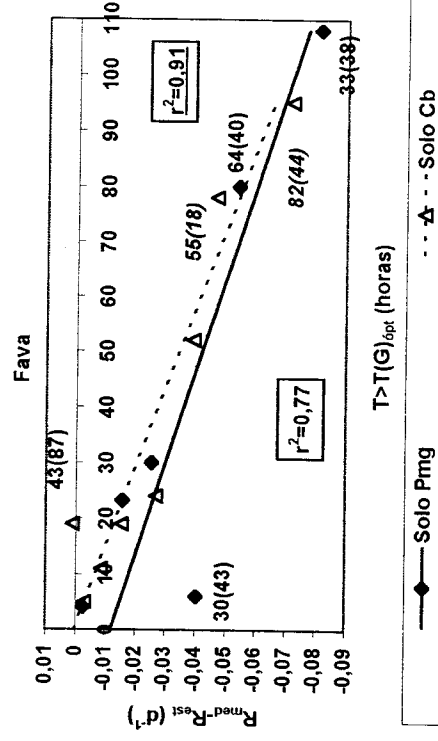
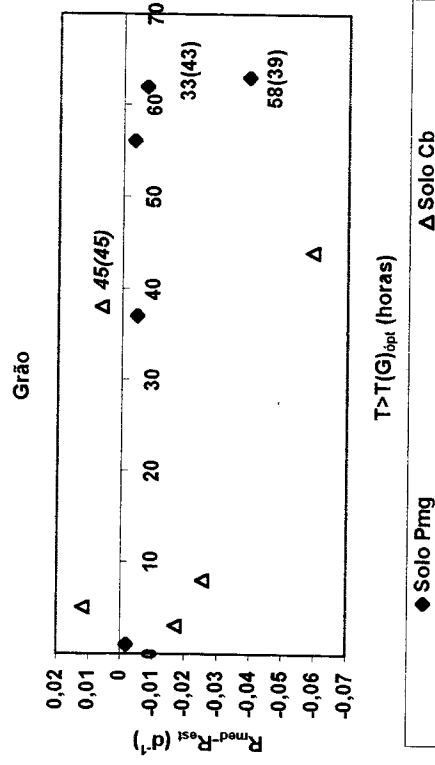
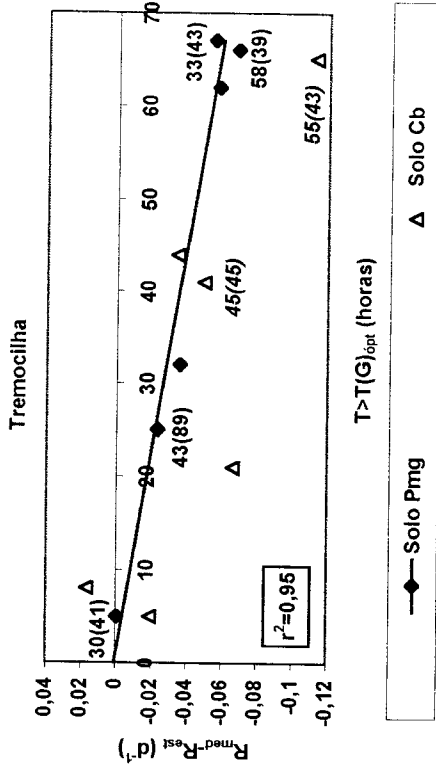
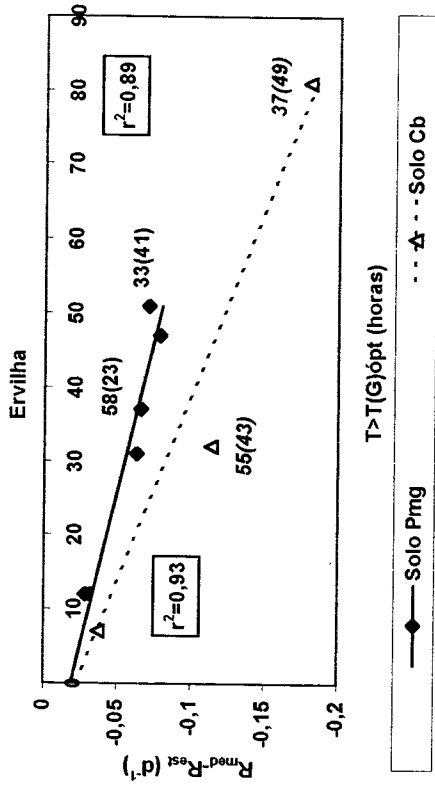
Além disso, verificou-se que, no solo Pmg, exposições pouco duradouras (inferior a 10 horas) das plântulas pré-emergentes de girassol e de milho a altas temperaturas parecem ter encurtado o período de emergência (aumento da taxa); que as diferenças de comportamento da ervilha nos dois solos acentuaram-se com o aumento da duração enquanto as da fava parecem ter diminuído; que em nenhuma combinação o teor de humidade do solo explica, de um modo claro, a maior dispersão em torno das rectas ajustadas.

### **3.3.2.5. Tempos térmicos**

#### **Tempos térmicos para duas fracções da população**

A linearidade entre taxa de emergência e temperatura suporta, em cada solo, a aplicabilidade de um tempo térmico constante no intervalo A de qualquer cultura e para cada fracção emergida ( $0,5E_f$  e  $0,8E_f$ ). Os valores estimados de  $\theta_1(E)$  foram diferentes entre as várias culturas (Quadro 3.6). Entre as culturas outono-invernais, a ervilha e a tremocilha necessitam de acumular menos temperatura (em °Cd) que o grão e a fava para emergirem: o tempo térmico correspondente a  $0,5E_f$  variou, no solo Pmg, entre 116,3°Cd para a tremocilha e 166,6°Cd para o grão e no solo Cb variou entre 70°Cd para a tremocilha e 125°Cd para o grão; para  $0,8E_f$  variou, no solo Pmg, entre 111,1°Cd para a tremocilha e 263,2°Cd para a fava e no solo Cb variou entre 83,3°Cd para a tremocilha





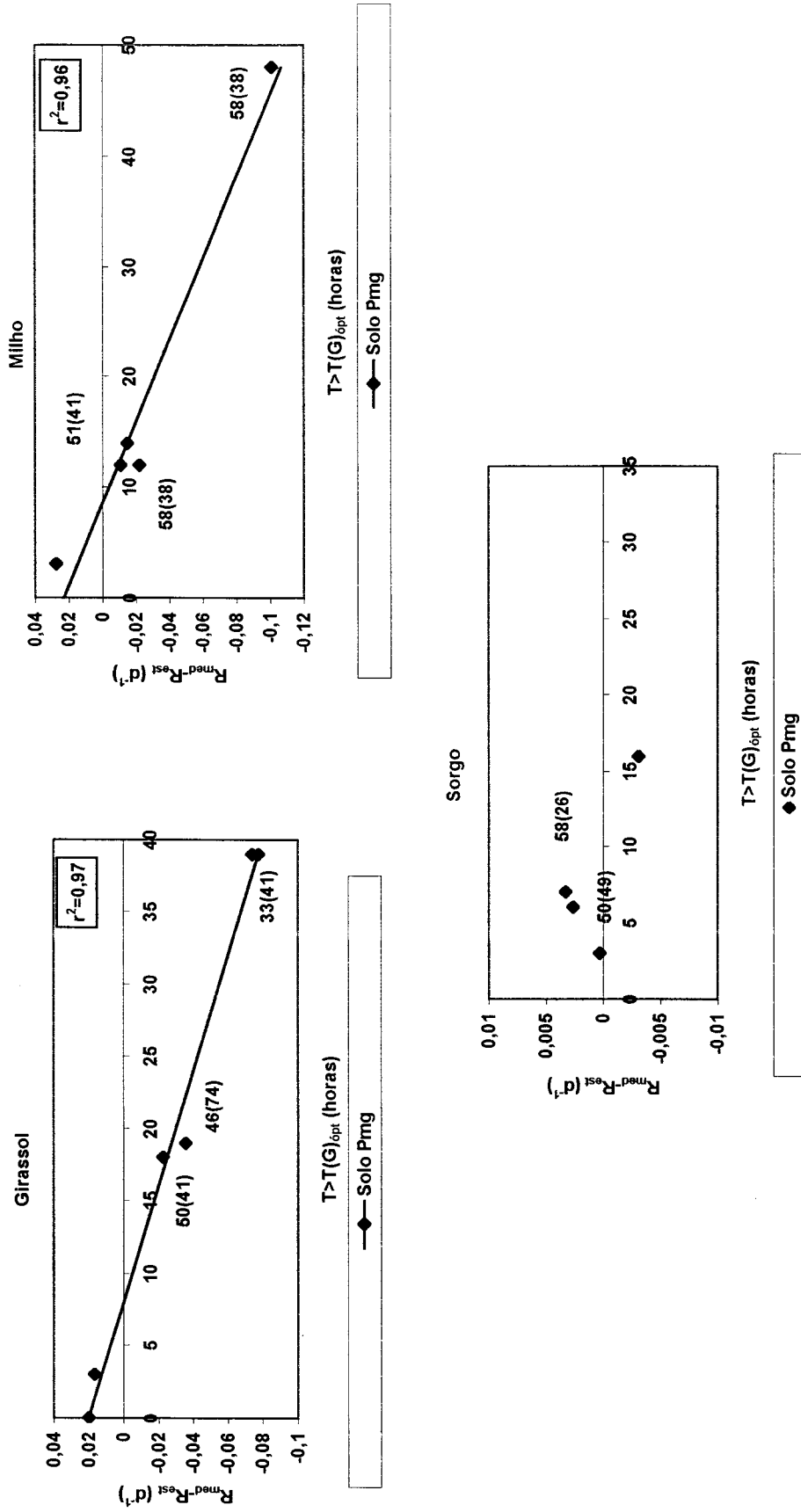


Fig. 3.14. Diferença entre as taxas de emergência medidas ( $R_{med}$ ) e as estimadas ( $R_{est}$ ) em função da duração da exposição (em horas) das plântulas pré-emergentes a temperaturas médias horárias superiores à  $T(G)_{opt}$ , para  $0,5E_r$  das culturas indicadas, nos solos Pmg e Cb.  $R_{est}$  é a taxa calculada para o intervalo Térmico A de emergência. Os números associados aos pontos (em *itálico*) se referem ao solo Cb) representam o teor de água no solo à sementeira e, entre parêntesis, o teor médio de humidade entre a sementeira e o tempo correspondente a  $0,5E_r$ . Em caixa, mostram-se os coeficientes de determinação das regressões (em *itálico*) os  $R^2$  relativos ao solo Cb)

e 181,8°Cd para a fava. Entre as culturas primaveris, o girassol é mais lento a emergir (em °Cd) que as restantes e o sorgo foi a que menos temperatura acumulou para emergir: para atingir 0,5E<sub>f</sub> (0,8E<sub>f</sub>) o sorgo requis apenas 71,9°Cd (62,1°Cd) no solo Pmg e 48,3°Cd (62,5°Cd) no solo Cb enquanto que o girassol requis 119°Cd (147,1°Cd) e 89,3°Cd (99°Cd), respectivamente.

Estes resultados mostram também que o tempo térmico necessário à emergência de cada cultura depende do tipo de solo (Quadro 3.5): para 0,5E<sub>f</sub> ou para 0,8E<sub>f</sub> de qualquer das culturas, o tempo térmico estimado foi maior no solo Pmg que no solo Cb. Foram calculados a partir do Quadro 3.6, no intervalo térmico A, os quocientes entre os tempos térmicos relativos à emergência das sete culturas nos dois solos [ $\theta_1(E)_{Pmg}$  e  $\theta_1(E)_{Cb}$ ] para 0,5E<sub>f</sub> e as razões entre estes  $\theta_1(E)$  e os tempos térmicos para o intervalo sub-ótimo de germinação  $\theta_1(G)$  (Quadro 3.8) [ $\theta_1(E)_{Pmg} / \theta_1(G)$  e  $\theta_1(E)_{Cb} / \theta_1(G)$ ].

**Quadro 3. 8. Tempos térmicos da emergência (0,5E<sub>f</sub>) no intervalo sub-ótimo ( $\theta_1$ <sub>Emer</sub>), relativos aos solos Pmg e Cb.**

Cultura	Tempo térmico				
	$\theta_1(E)$ (°Cd)		$\theta_1(E)_{Pmg} /$	$\theta_1(E)_{Cb} /$	$\theta_1(E)_{Cb} /$
	Solo Pmg	Solo Cb	$/\theta_1(G)$	$/\theta_1(G)$	$/\theta_1(E)_{Pmg}$
Ervilha	117,6	75,2	4,9	3,1	0,6
Tremocilha	116,3	70,0	4,7	2,9	0,6
Grão	166,6	79,4	6,2	3,0	0,5
Fava	137,0	125,0	2,8	2,5	0,9
Girassol	119,0	89,3	4,2	3,1	0,7
Milho	89,3	76,3	4,8	4,1	0,85
Sorgo	71,9	48,3	5,6	3,8	0,7

Entre as culturas outono-invernais, o tipo de solo parece afectar mais o grão [ $\theta_1(E)_{Pmg} / \theta_1(E)_{Cb} = 0,5$ ] e menos a fava [ $\theta_1(E)_{Pmg} / \theta_1(E)_{Cb} = 0,9$ ]; entre as culturas primaveris,  $\theta_1(E)_{Pmg} / \theta_1(E)_{Cb}$  variou entre 0,7 (girassol e sorgo) e 0,85 (milho). A diferença entre os tempos térmicos estimados para a emergência e para a germinação foi maior para cada cultura e mais variável entre as várias culturas no solo Pmg que no solo Cb:  $\theta_1(E)$

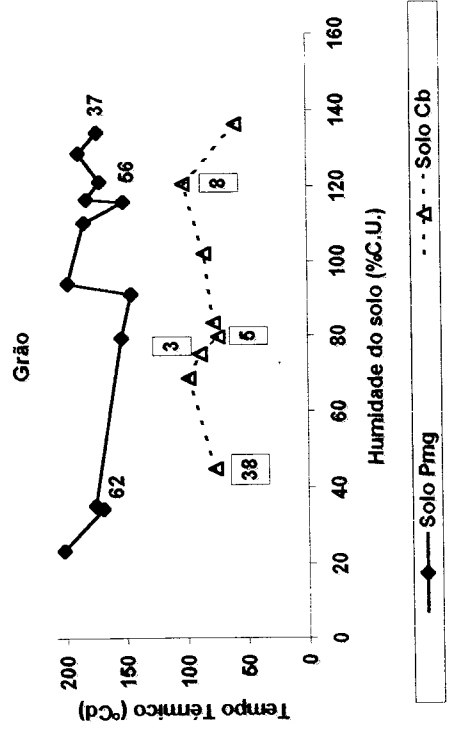
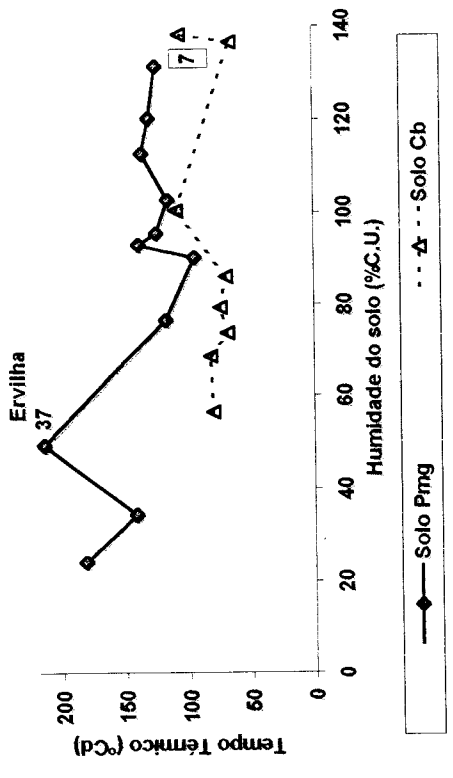
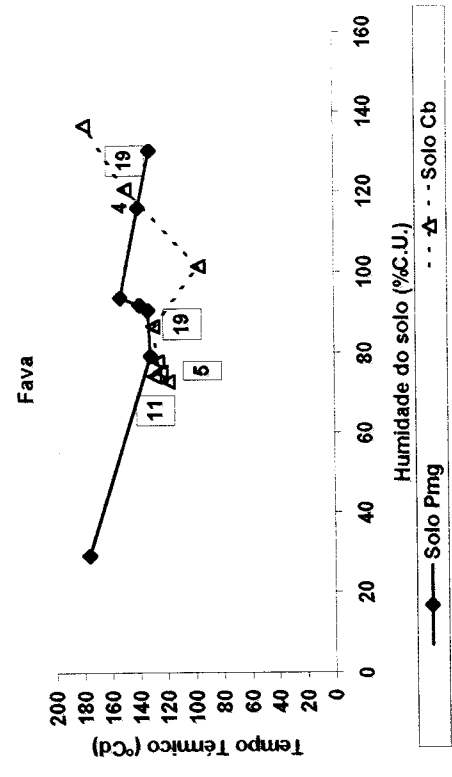
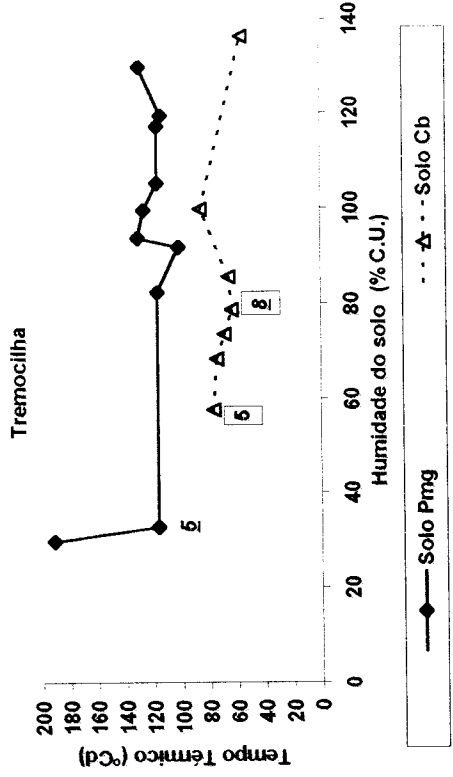
$P_{mg} / \theta_1(G)$  variou entre 2,8 (fava) e 6,2 (grão) enquanto  $\theta_1(E)_{Cb} / \theta_1(G)$  variou entre 2,5 (fava) e 4,1 (milho).

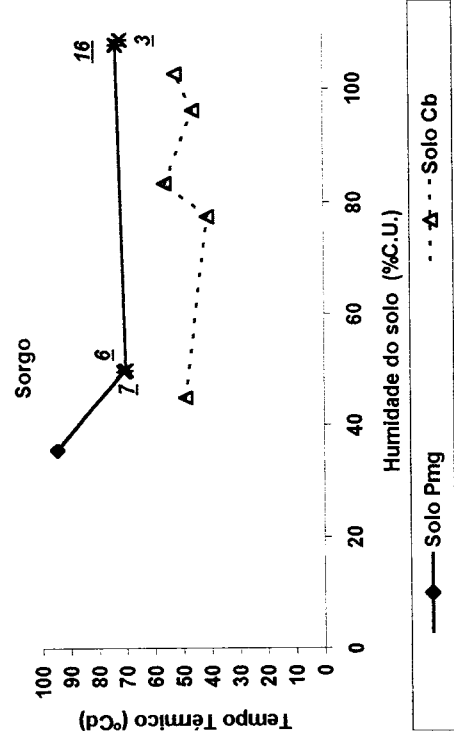
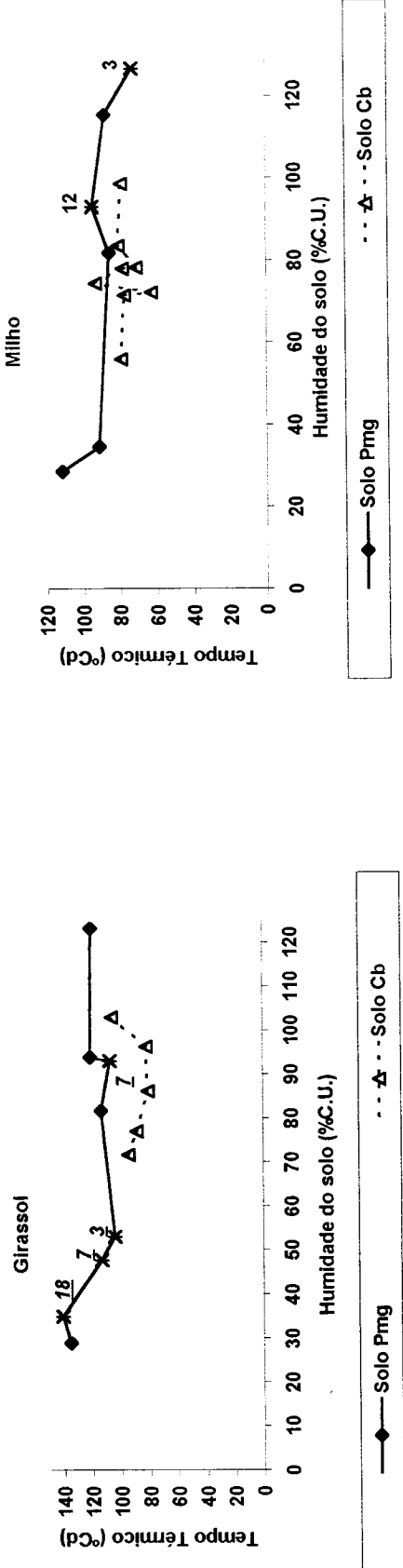
O curso da emergência de uma amostra de plântulas depende da temperatura acumulada, isto é, as plântulas não emergem em simultâneo. Por isso, as diferenças entre os tempos térmicos para  $0,5E_f$  e  $0,8E_f$  (que, no caso da fava, atingem  $126,2^\circ\text{Cd}$  no solo Pmg e  $56,8^\circ\text{C}$  no solo Cb mas, no caso da tremocilha, foram apenas de  $5,2^\circ\text{Cd}$  e  $13,3^\circ\text{Cd}$ , respectivamente nos solos Pmg e Cb) são uma medida da dispersão da emergência.

### **Tempo térmico em função do teor de humidade do solo**

Mostrou-se que o teor de água no solo influencia a forma como a temperatura afecta a taxa de emergência das culturas, sobretudo para situações de défice hídrico (secção 3.3.2.1). A análise da emergência em função do tempo térmico em vez do tempo cronológico permite separar o efeito da temperatura dos de outros factores, nomeadamente do teor de humidade do solo (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a; Abreu, 1987). A Fig. 3.15 mostra a variação do tempo térmico medido para a emergência de cada uma das sete culturas estudadas em função do teor de água no solo: o tempo térmico foi contabilizado a partir das temperaturas medidas desde a sementeira até ao tempo  $t$  estimado para  $0,5E_f$ , considerando a temperatura-base como a média aritmética entre as  $T_{base}$  estimadas para  $0,5E_f$  e  $0,8E_f$ ; o teor de humidade do solo é o teor médio para o período de germinação estimado para cada temperatura média. Para cada cultura, os dados compreendem as experiências cujas temperaturas médias foram inferiores à que correspondeu à taxa máxima de emergência medida (intervalo térmico A); a ocorrência de temperaturas elevadas é representada na Fig. 3.15 por um número correspondente ao nº de horas de exposição.

A Fig. 3.15 mostra que os tempos térmicos obtidos para a emergência de  $0,5E_f$  das diferentes culturas são pouco variáveis numa gama de humidades do solo mais extensa no solo Pmg que no solo Cb, e que inclui em ambos os solos, teores de humidade superiores à C.C., embora no solo Cb não fosse possível medir teores de humidade inferiores a 50% da C.U. para o girassol, fava, tremocilha, ervilha e milho. Os tempos térmicos são semelhantes aos estimados no Quadro 3.5. Por isso, ao longo desta gama de humidades, a variação da taxa de emergência com a temperatura do solo pode ser descrita pela equação (2.6), tornando válido o conceito de tempo térmico para estudos de emergência e modelação numa vasta gama de humidades do solo. No solo Pmg, para teores de humidade iguais ou superiores a 77% para a ervilha, 33% para a





**Fig. 3.15. Efeito do teor de água do solo durante o período de germinação no tempo térmico para a emergência das diversas culturas indicadas (50% das plântulas emergidas) nos solos Pmg e Cb**

*Nota 1*: os pontos representados por asteriscos indicam a ocorrência de temperaturas médias horárias superiores à  $T_{opt}$  de germinação e os números em itálico e sublinhados referem-se ao número de horas em que a temperatura medida entre a sementeira e 0,5E<sub>r</sub> foi superior à  $T_{opt}$  de germinação;

tremocilha, 79% para a fava, 47% para o girassol e 50% da C.U. para o sorgo, os tempos térmicos médios foram, respectivamente, de  $123\pm 14^{\circ}\text{Cd}$ ,  $119\pm 9^{\circ}\text{Cd}$ ,  $138\pm 8^{\circ}\text{Cd}$ ,  $113\pm 7^{\circ}\text{Cd}$  e  $72\pm 1^{\circ}\text{Cd}$ ; entre 35% e 91 % da C.U. o tempo térmico médio para o grão foi de  $161\pm 14^{\circ}\text{Cd}$  e entre 34% e 115 % da C.U foi de  $90\pm 4^{\circ}\text{Cd}$  para o milho. No solo Cb, o tempo térmico médio para a ervilha foi de  $75\pm 6^{\circ}\text{Cd}$  entre 57% e 86% da C.U., para a tremocilha foi de  $70\pm 6^{\circ}\text{Cd}$  entre 58% e 86% da C.U., para o grão foi de  $84\pm 9^{\circ}\text{Cd}$  entre 45% da C.U. e a C.C., para a fava foi de  $126\pm 4^{\circ}\text{Cd}$  entre 73% e 87% da C.U., para o girassol foi de  $87\pm 7^{\circ}\text{Cd}$  entre 72% e 96% da C.U, para o milho foi de  $78\pm 9^{\circ}\text{Cd}$  entre 56% e 99% da C.U. e para o sorgo foi de  $48\pm 6^{\circ}\text{Cd}$  para teores de água no solo iguais ou superiores a 45% da C.U..

Os tempos térmicos para a emergência da ervilha, da tremocilha, do grão, do sorgo e do girassol foram sempre maiores no solo Pmg e menores no solo Cb, tal como foi referido atrás (Quadro 3.6). A sensibilidade das culturas aos valores extremos de humidade do solo na gama medida foi diversa e, para cada cultura, pareceu variar com o tipo de solo. No solo Pmg, o tempo térmico máximo obtido para cada cultura verificou-se a teores de humidade inferiores a 50% da C.U. (entre 23,5% e 49,3%); provavelmente, em condições de solo mais seco durante a germinação, os tempos térmicos de emergência teriam sido ainda maiores, tal como obtiveram, entre outros, Ong (1983) e Abreu (1987) no estudo do amendoim.

No solo Cb, as diferenças de comportamento das culturas para a gama de humidade testada foram pouco significativas, embora deva ser destacada a aparentemente maior sensibilidade da fava e do girassol ao excesso de humidade do solo.

A exposição das sementes e/ou do caulículo das culturas a altas temperaturas ou a sua duração não parecem ter influenciado a forma como o tempo térmico variou com o teor de água no solo. No solo Pmg, nem exposições de 37, 56 ou 62 horas foram suficientes para influenciar a tendência de variação do tempo térmico do grão, nem 18 horas o foram no caso do sorgo; no solo Cb, 38 horas de exposição não afectaram o tempo térmico necessário à emergência do grão para valores de humidade ligeiramente inferiores a 50% da C.U..

### 3.3.3. Dispersão da emergência

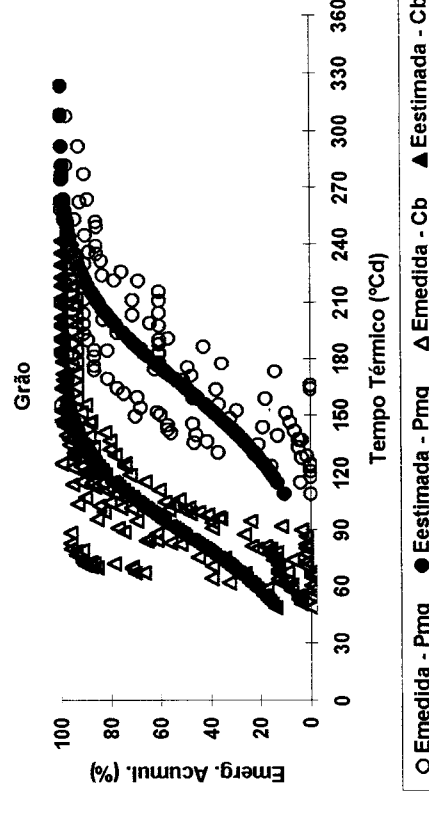
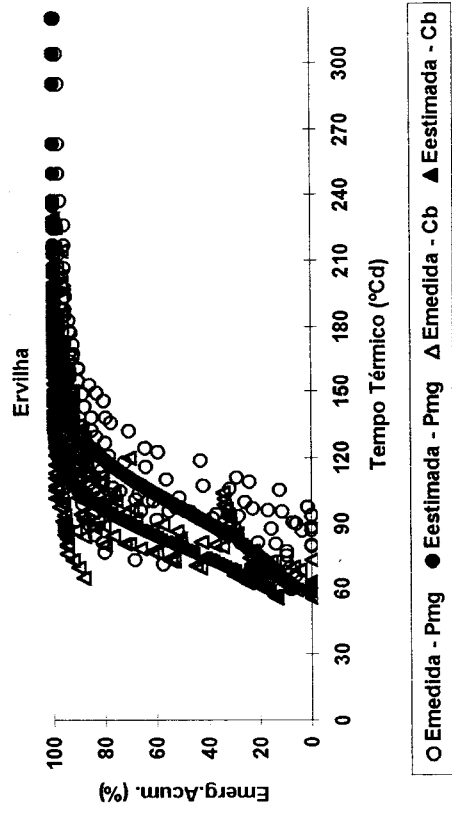
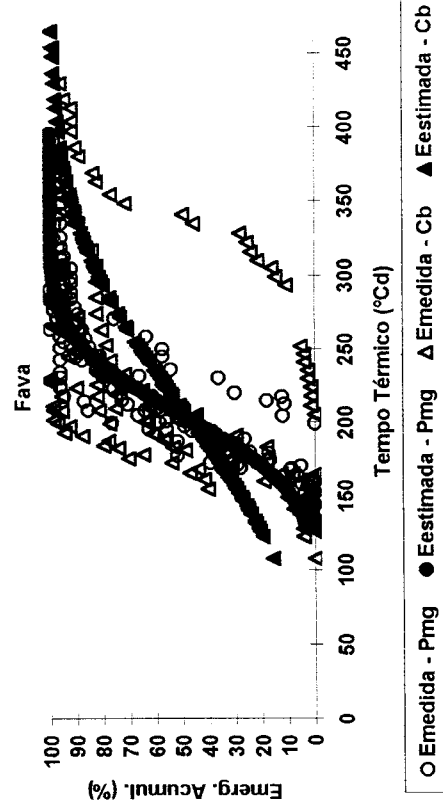
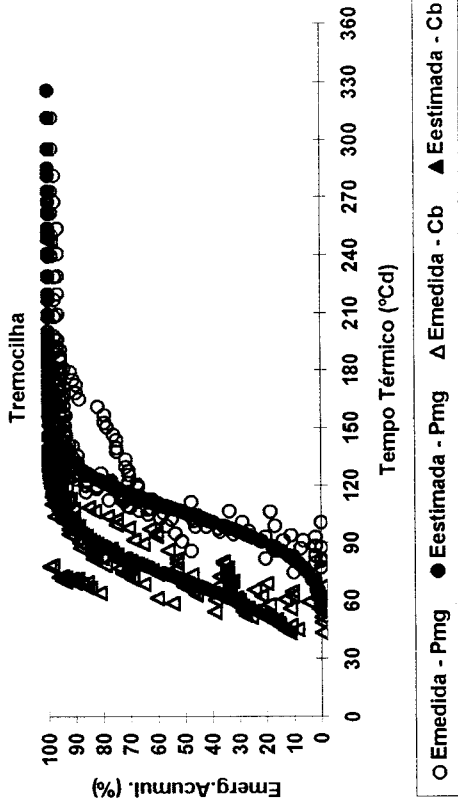
O progresso da emergência acumulada de cada cultura em função do tempo térmico, nos solos Pmg e Cb foi testado e avaliado através da análise *probit*, permitindo estimar a dispersão dos tempos térmicos de emergência. Foram consideradas as fracções emergidas relativamente à emergência final ( $\%E_f$ ) e os correspondentes tempos térmicos estimados a partir da equação 2.6, para cada experiência e para o intervalo térmico A. Considerou-se como temperatura-base representativa de cada cultura a média aritmética das temperaturas-base estimadas para as duas fracções consideradas (50% e 80%). Não foram consideradas experiências ao longo das quais o teor de água no solo se revelou limitante (ver secção.3.3.2.1).

A Fig. 3.16 mostra que, de uma forma geral, a qualidade do ajustamento de uma curva Normal de probabilidade acumulada ao progresso da emergência em função do tempo térmico é razoável nos dois tipos de solo, mas mostra também que a distribuição dos resíduos não é aleatória: na maior parte dos casos, os desvios corresponderam a séries inteiras de valores de emergência acumulada, cada uma correspondente a uma experiência; além disso, o ajustamento da curva *probit* foi menor para os valores menores da emergência acumulada (inferiores a 10%), tal como foi verificado para percentagens idênticas de germinação acumulada.

O Quadro 3.9 apresenta os valores dos parâmetros estimados pela análise *probit*: o desvio-padrão ( $\sigma$ ) da distribuição dos tempos térmicos em torno do valor mais provável ( $\theta_1$ ), a constante de intercepção (C) da regressão linear entre *probit* (E) e o tempo térmico e respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ). No solo Pmg, os valores de  $R^2$  foram mais elevados para o sorgo e para a fava e menores para a ervilha e para o milho; no solo Cb, foram mais elevados para o girassol e para o sorgo e menos elevados para o grão e para a fava. A qualidade de ajustamento para o grão, a fava e o milho foi significativamente diferente nos dois solos enquanto que para as restantes culturas foi semelhante. Para o sorgo em ambos os solos e para a fava no solo Pmg, os valores de  $R^2$  obtidos para o curso da emergência acumulada em função do tempo térmico foram superiores aos valores obtidos para o curso da germinação acumulada, mas para todas as outras combinações solo/cultura, a qualidade do ajustamento para a emergência foi melhor que para a germinação.

A dispersão dos tempos térmicos em torno dos seus valores mais prováveis foi maior que a verificada nos resultados obtidos para as experiências sobre germinação. Em ambos os solos, a dispersão foi maior para as culturas outono-invernais e menor





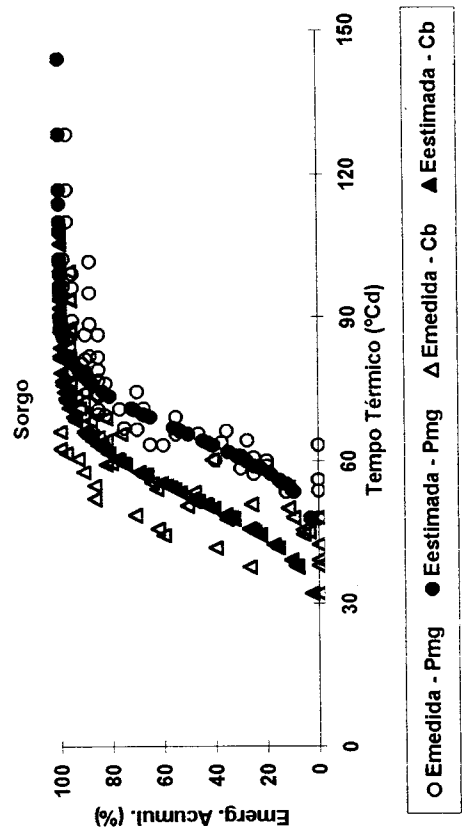
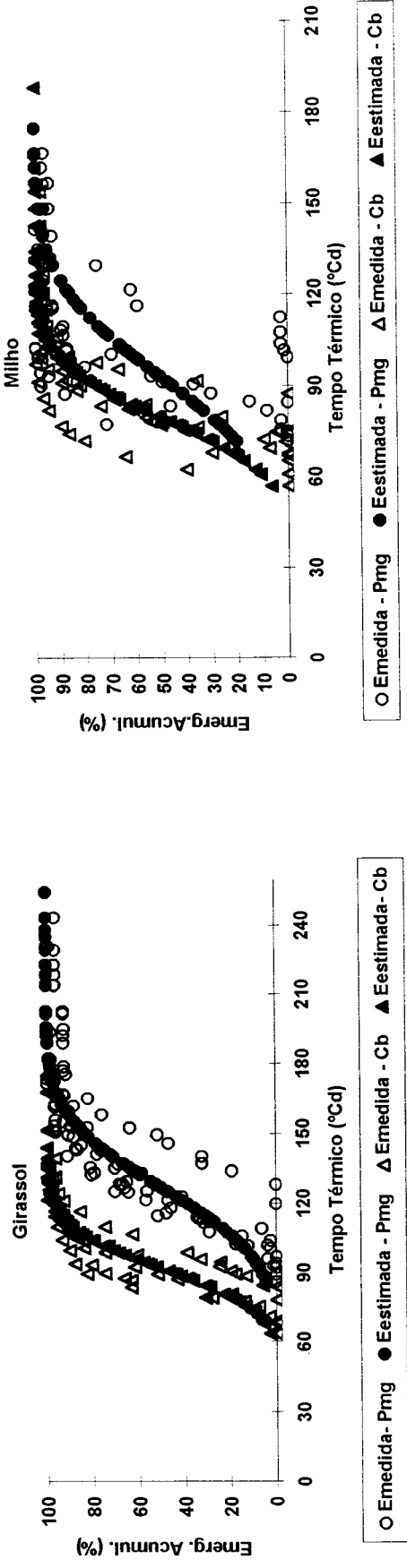


Fig. 3.16. Relação entre a emergência acumulada (E) e o tempo térmico para as 7 culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa), no intervalo térmico A

QUADRO 3. 9 . Parâmetros da relação entre *probit* (E) e o tempo térmico de emergência ( $\theta$ ), e entre *probit* (E) e as variáveis  $\theta$  e a temperatura média. C- Valor da constante de interceptão;  $\sigma$  - desvio padrão da distribuição de frequências do tempo térmico; R<sup>2</sup>- Coeficiente de determinação

Culturas	Solo	Análise <i>probit</i> (Variáveis ajustadas)					
		Tempo Térmico ( $\theta$ )			TT( $\theta$ )+Temp (°Cd)		
		Parâmetros					
		C	$\sigma$ (°Cd)	R <sup>2</sup>	C	$\sigma$ (°Cd)	R <sup>2</sup>
Ervilha	Pmg	-2,36	40	0,6	-2,99	31,5	0,78
	Cb	-2,29	33,9	0,59	-3,43	29,2	0,83
Tremocilha	Pmg	-3,08	34,5	0,75	-2,94	34,0	0,76
	Cb	-2,54	27,3	0,69	-3,26	24,3	0,85
Grão	Pmg	-3,35	49,0	0,69	-4,64	41,9	0,85
	Cb	-2,18	39,6	0,54	-3,43	28,4	0,81
Fava	Pmg	-4,46	46,2	0,79	-5,63	43,1	0,84
	Cb	-1,88	118,7	0,34	-8,06	41,9	0,86
Girassol	Pmg	-4,53	28,6	0,74	-5,32	23,5	0,86
	Cb	-5,9	15,6	0,79	-7,58	12,8	0,92
Milho	Pmg	-3,15	29,3	0,32	-7,51	12,4	0,78
	Cb	-4,54	17,3	0,67	-6,28	12,9	0,83
Sorgo	Pmg	-4,92	13,7	0,81	-5,01	12,9	0,84
	Cb	-3,55	14,4	0,72	-4,98	11,7	0,86

para as primaveris: entre as primeiras os valores de  $\sigma$  foram maiores para o grão (49°Cd para um  $\theta_1=166,6^\circ\text{Cd}$  no solo Pmg e 39,6°Cd para um  $\theta_1 = 79,4^\circ\text{Cd}$  no solo Cb) e para a fava (46°Cd para um  $\theta_1=137^\circ\text{Cd}$  no solo Pmg e 118,7°Cd para um  $\theta_1=125^\circ\text{Cd}$  no solo Cb) e menores para a ervilha (40°Cd para um  $\theta_1=117,6^\circ\text{Cd}$  no solo Pmg e 33,9°Cd para um  $\theta_1=75,2^\circ\text{Cd}$  no solo Cb) e para a tremocilha (34,5°Cd para um  $\theta_1=116,3^\circ\text{Cd}$  no solo Pmg e 27,3°Cd para um  $\theta_1=70^\circ\text{Cd}$  no solo Cb); entre as segundas, os valores de  $\sigma$  foram semelhantes para o milho (29,3°Cd para um  $\theta_1=89,3^\circ\text{Cd}$  no solo Pmg e 17,3°Cd para um  $\theta_1=76,3^\circ\text{Cd}$  no solo Cb) e o girassol (28,6°Cd para um  $\theta_1=119^\circ\text{Cd}$  no solo Pmg e 17,3°Cd para um  $\theta_1=76,3^\circ\text{Cd}$  no solo Cb) enquanto que o sorgo apresentou o menor valor de  $\sigma$  (13,6°Cd para um  $\theta_1=71,9^\circ\text{Cd}$  no solo Pmg e 14,4°Cd para um  $\theta_1=48,3^\circ\text{Cd}$  no solo Cb).

A análise dos resíduos permitiu identificar as séries de valores (experiências) que mais se afastam das emergências acumuladas estimadas. Cada experiência foi por isso identificada pela sua temperatura média (entre a sementeira e a emergência final). Em ambos os solos, os maiores desvios entre os valores medidos e os valores estimados verificaram-se, de uma forma geral, para as temperaturas médias mais baixas (entre 8,8°C e 14,3°C para as culturas outono-invernais e entre 13°C e 20°C para as culturas primaveris). O ANEXO E mostra a significância estatística das diferenças entre as séries de valores medidos (t Student). Na generalidade dos casos (cultura/tipo de solo), os resultados mostram que há diferenças significativas, para uma probabilidade de 95%, entre os cursos da emergência acumulada das diversas experiências efectuadas em função do tempo térmico. Por outro lado, o agrupamento de séries estatisticamente semelhantes entre si não parece depender de uma qualquer gama térmica bem definida (por ex., o progresso da emergência acumulada da ervilha não foi significativamente diferente entre as experiências a 9,0°C, 9,1°C, 11,2°C e a 16,6°C no solo Pmg ou a 14,3°C e a 17,2°C no solo Cb enquanto que o curso da emergência do milho não o foi entre as experiências a 13,2°C e a 23,9°C no solo Pmg ou a 13,6°C, 14,7°C, 17,1°C e 23,5°C no solo Cb).

O significado estatístico das diferenças encontradas entre as diversas curvas de emergência parece mostrar que não basta delimitar uma gama térmica - por ex., eliminar as curvas referentes às temperaturas médias mais baixas - ao longo da qual o progresso da emergência possa ser previsto apenas a partir do tempo térmico. Para avaliar a influência do factor-experiência no progresso da emergência acumulada reavaliou-se o

modelo *probit* considerando o tempo térmico e a temperatura (experiência) os termos ajustados e não apenas o tempo térmico. Os parâmetros estimados para as novas regressões são apresentados também no Quadro 3.9. De uma forma geral, a percentagem da variância total explicada pela nova regressão ( $R^2$ ) aumentou substancialmente em relação à regressão anterior (os maiores aumentos registaram-se para a ervilha, o grão, a fava semeados no solo Pmg e para o milho semeado no solo Cb). Os valores de  $R^2$  foram iguais ou superiores a 0,76 para as culturas ensaiadas no solo Pmg e a 0,81 no solo Cb. A dispersão em torno dos valores mais prováveis diminuiu: entre as culturas outono-invernais os valores de  $\sigma$  variaram de 31,5°Cd (ervilha) a 43,1°C (fava) no solo Pmg e de 24,3°Cd (tremocilha) a 41,9°Cd (fava) no solo Cb; entre as culturas primaveris, variaram de 12,4°Cd (milho) a 23,5°C (girassol) no solo Pmg e de 11,7°Cd (sorgo) a 12,9°Cd (milho) no solo Cb.

Em seguida, testou-se a hipótese de paralelismo entre os cursos da emergência acumulada relativos às diversas experiências testadas a diferentes temperaturas, isto é, procurou-se avaliar em que medida a emergência acumulada depende da interacção entre tempo térmico e a temperatura [tempo térmico ( $\theta$ )  $\times$  temperatura (T)]. Para tal foram estabelecidas novas regressões, tendo como variáveis ajustáveis o tempo térmico, a temperatura e a interacção entre estes factores. Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) obtidos para as diferentes culturas foram iguais ou superiores a 0,82. De uma forma geral, a interacção entre  $\theta$  e T não aumentou significativamente a variância total explicada pela regressão: o acréscimo variou entre 3 % (sorgo) e 9% (fava) no solo Pmg e entre 1% (sorgo) e 11% (grão) no solo Cb.

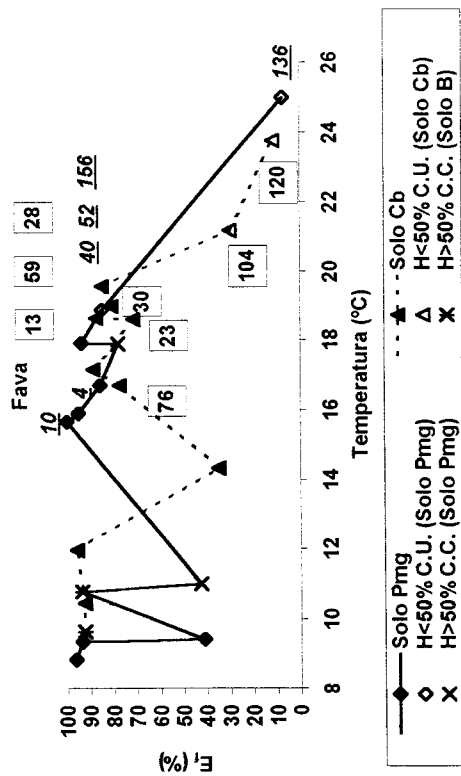
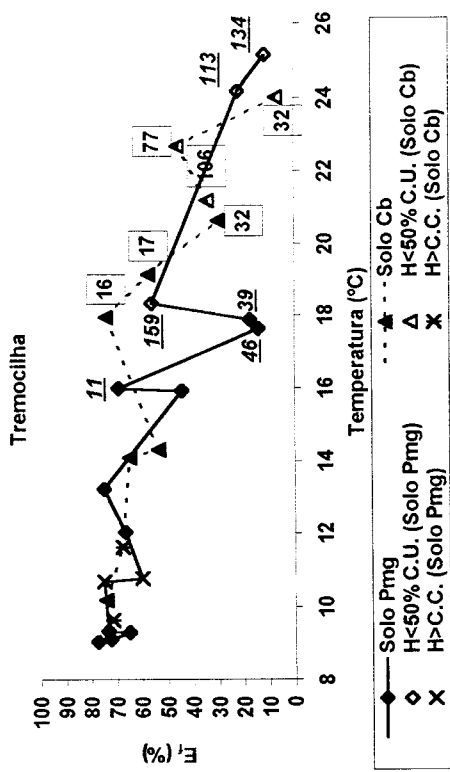
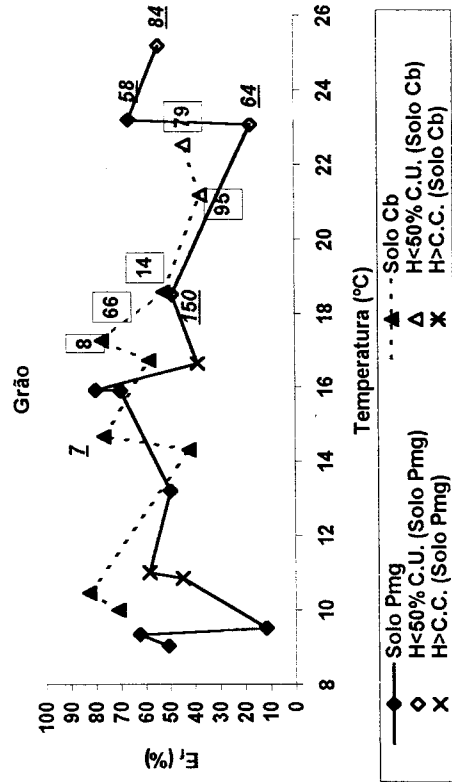
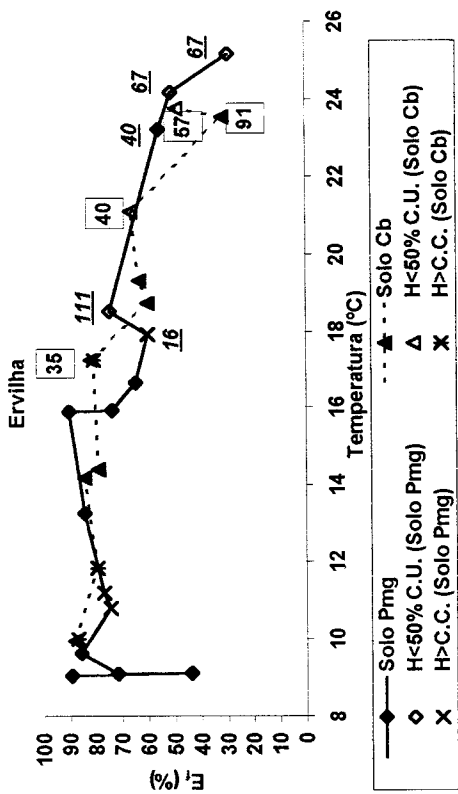
Os resultados mostram que o curso da emergência acumulada de cada experiência em função do tempo térmico é bem descrito por uma curva Normal de probabilidade acumulada e que as curvas de emergência acumulada relativas a cada experiência são aproximadamente paralelas entre si. Mostram também que uma curva Normal de probabilidade acumulada é uma solução para descrever o progresso da emergência acumulada (em função do tempo térmico) de um conjunto limitado de experiências desde que se considerem as condições em que decorreram cada experiência, a gama de temperatura média testada assim como a variação térmica horária da temperatura do solo durante cada experiência.

### 3.3.4. Emergência final

A Fig. 3.17 apresenta a relação entre a emergência final (percentagem de plântulas emergidas relativamente ao total de sementes semeadas) de cada uma das culturas estudadas e a temperatura média nos solos Pmg e Cb para o tempo de emergência correspondente. Os dados foram classificados de acordo com o teor médio de humidade entre a sementeira e a emergência final (inferior ou superior a 50% da C.U. e superior à Capacidade de Campo) e a exposição (ou ausência dela) das plântulas pré-emergentes a temperaturas elevadas (duração em horas).

As emergências finais mais elevadas verificaram-se para temperaturas médias incluídas no intervalo térmico A (Fig. 3.17); para temperaturas médias mais elevadas (intervalo B) a emergência final das culturas testadas foi progressivamente menor à medida que a temperatura média aumentou (declínio mais rápido para a fava, o girassol e o milho e mais lento para as restantes culturas). Os *m.a.a.* (mínimos agronomicamente aceitáveis) da ervilha, da fava e do milho foram atingidos numa gama mais ou menos extensa de temperaturas em ambos os solos e os do girassol apenas no solo Cb (entre 9°C e 17°C-20°C nas culturas outono-invernais e entre 14°C-16°C e 20°C-23°C nas culturas primaveris); ao invés, os *m.a.a.* da tremocilha e do sorgo não foram em caso algum alcançados, enquanto os do girassol foram-no apenas a cerca de 16°C no solo Pmg. No solo Pmg, a temperatura média mais elevada a que os *m.a.a.* foram atingidos foi superior à  $T_{méd}$  a que correspondeu a taxa de emergência máxima medida em cerca de 1°C para a ervilha e a fava mas foi inferior em cerca de 4°C para o milho e o girassol; no solo Cb foi inferior em 3°C para a ervilha enquanto que para as restantes culturas as diferenças foram inferiores a 1°C. Para a ervilha, a fava, o milho e o girassol, a diferença entre as temperaturas mais elevadas a que os *m.a.a.* foram atingidos e  $T_m$  para a germinação variou entre cerca de 10°C (fava) e 15°C (ervilha) no Solo Pmg e entre cerca de 8°C (fava) e 16,1°C (ervilha) no solo Cb.

Às temperaturas mais baixas houve um decréscimo da emergência final da ervilha no solo Pmg e do sorgo em ambos os solos: no solo Pmg, qualquer das sementes e/ou plântulas pré-emergentes foram expostas a temperaturas inferiores  $T(G)_{base}$  (35 horas no caso da ervilha e 36 horas no caso do sorgo). As quebras mais acentuadas resultam de uma redução na actividade metabólica (Simon *et al.*, 1976), com prolongamento do período entre a sementeira e a emergência e conseqüente diminuição do vigor das plântulas (Singh e Dhaliwal, 1972), exaustão de reservas (Angus *et al.*



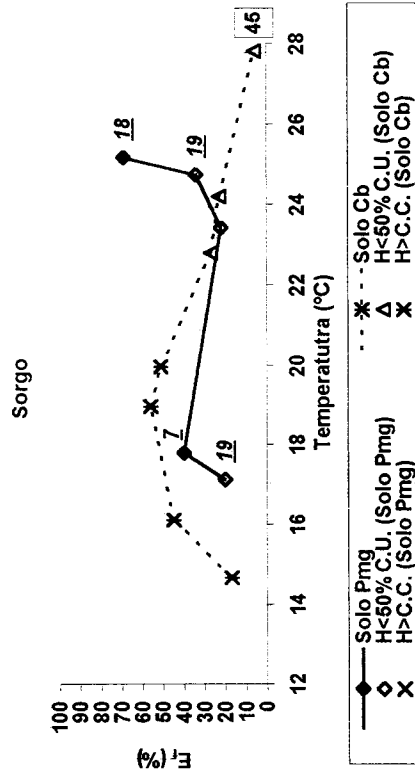
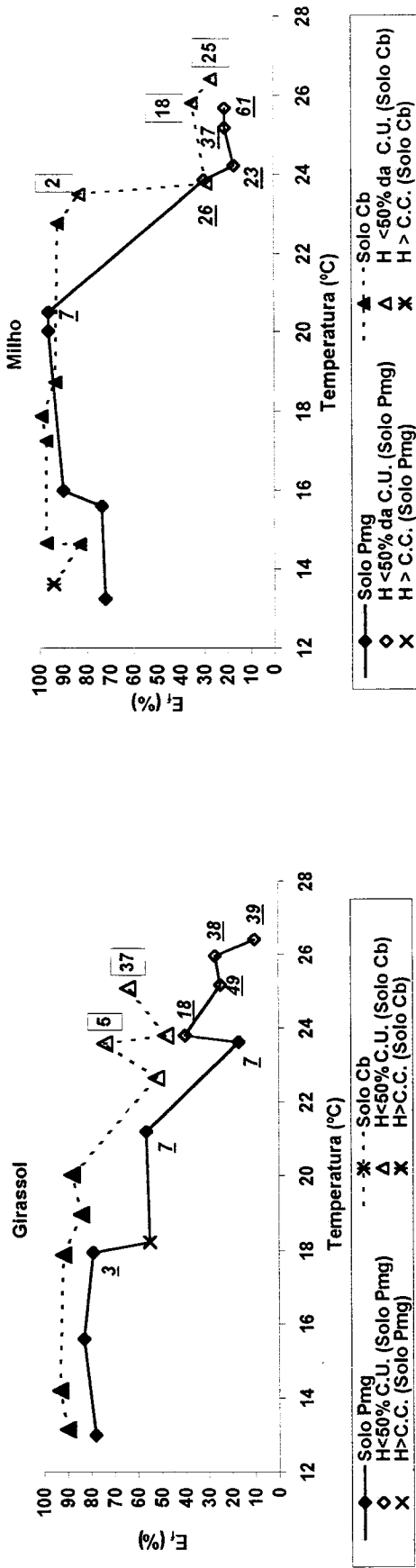


Fig.3.17. Emergência final ( $E_f$ ) das sete culturas indicadas, nos solos Pmg e Cb, em função da temperatura do solo à profundidade de sementeira, para teores médios de humidade do solo (H) inferiores a 50% da Capacidade Utilizável (C.U.), superiores à Capacidade de Campo (C.C.) e entre 50% da C.U. e a C.C. durante toda a emergência: Nota: os números sublinhados em itálico (N) ou em contidos em caixa [N] referem-se ao n° de horas em que a temperatura foi superior à respectiva  $T_{opt}$ , respectivamente no solo Pmg e no solo Cb.



1981a; Ong, 1983) e maior susceptibilidade aos patogênicos do solo, sobretudo em solos húmidos (Pollock, 1972).

Às temperaturas médias mais elevadas, normalmente associadas a teores baixos de humidade do solo e às quais correspondem temperaturas médias horárias superiores a  $T(G)_{opt}$ , a emergência final diminuiu de um modo acentuado. As emergências finais obtidas foram geralmente inferiores a 50% quando as temperaturas médias foram superiores a cerca de 20°C, no caso da tremocilha, do grão e da fava e a cerca de 23-24°C no caso da ervilha e das culturas primaveris. Exposições a temperaturas elevadas iguais ou superiores a 40 horas para a ervilha (solo Pmg) e a 17 horas (solo Cb) ou a 39 horas (solo Pmg) para a tremocilha diminuíram as correspondentes  $E_f$ . Sete horas de exposição foram suficientes para diminuir  $E_f$  do girassol no solo Pmg; durações até 7 horas e até 18 horas para o milho e para o sorgo, respectivamente, não parecem ter influenciado a  $E_f$ ; ao invés, os resultados mostram ainda que as  $E_f$  do grão e da fava não foram sensíveis à conjugação destas condições térmicas e hídricas. Num ensaio de ervilha, houve decréscimo da  $E_f$  quando se associaram teores médios de humidade superiores à C.C. ( $T_{méd} = 17,9^\circ\text{C}$ ) a temperaturas elevadas (16 horas). Quebras significativas da emergência final devido à ocorrência de temperaturas elevadas foram obtidas, entre outros, por Laude *et al.*, (1956) e por Socebee e Herbel (1969) para diferentes cereais ou por Steiner e Jacobsen (1992) para a cana-do-açúcar.

Para as culturas outono-invernais o tipo de solo não parece ter influenciado as emergências finais ao longo da gama de temperaturas testadas; ao invés, as culturas primaveris apresentaram  $E_f$  mais elevadas no Solo Cb que no Solo Pmg (ao longo de toda gama térmica testada no caso do girassol, até cerca de 23°C para o sorgo e até cerca de 16°C e para valores superiores a 24°C no caso do milho). As diferenças entre as  $E_f$  ocorridas nos solos Pmg e Cb foram superiores a 10% até cerca de 24°C para o girassol e de 20°C para o sorgo; para o milho variaram entre 10% e 20% até cerca de 16°C e entre 10% e 15% para temperaturas superiores a 24°C. Entre cerca de 16°C e a temperatura correspondente à taxa de emergência máxima medida, as diferenças apenas foram visíveis para as culturas com sementes de menor dimensão (girassol e sorgo).

As menores emergências finais de cada cultura ocorreram sobretudo para teores médios de humidade do solo inferiores a 50% da C.U. aos quais se associaram, na maior parte dos casos, temperaturas elevadas (Fig. 3.17); ao invés, teores elevados de humidade do solo (percentagens superiores à C.C.) não parecem afectar a emergência final da maioria das culturas. Para teores de humidade inferiores a 50% da C.U., a  $E_f$  foi

raramente superior a 50%, tendo sido obtidas emergências finais superiores aos *m.a.a.* em apenas três experiências (com ervilha, fava e girassol), todas realizadas no solo Pmg..

A Fig. 3.17 mostra também que as emergências finais da ervilha e da fava foram superiores às da tremocilha e do grão nos solos Pmg e Cb numa proporção considerável de cada uma das gamas térmicas testadas, enquanto que o grão e a ervilha parecem ser mais tolerantes que a tremocilha e a fava às temperaturas mais elevadas (médias superiores a 22°C-23°C). Entre as culturas primaveris, as emergências finais do milho e do girassol foram superiores às do sorgo numa gama extensa de temperaturas (até 24°C) em ambos os solos mas a emergência do milho foi superior à do girassol entre 15-16°C e cerca de 24°C, sendo a diferença maior no Solo Pmg que no Solo Cb; para temperaturas médias superiores a 24°C, no solo Pmg, o sorgo foi mais tolerante ao calor que as restantes culturas enquanto que no solo Cb o girassol parece ser mais tolerante que o milho e o sorgo.

As emergências finais ( $E_f$ ) de qualquer das culturas estudadas foram, por regra, inferiores às correspondentes germinações finais ( $G_f$ ) (Figuras. 3.3 e 3.17). As diferenças entre  $G_f$  e  $E_f$  (*quebra à sementeira*) foram maiores para temperaturas incluídas no intervalo térmico B que ao longo do intervalo térmico A. Para temperaturas semelhantes incluídas na gama térmica correspondente ao intervalo térmico A, a *quebra à sementeira* foi menor para a ervilha, a fava, o girassol e o milho que para as restantes culturas e as  $E_f$  da ervilha no solo Pmg e as  $E_f$  do milho no solo Cb foram mesmo superiores às respectivas  $G_f$ . Nos solos Pmg e Cb,  $E_f-G_f$  foi superior a 20% para a tremocilha e para o grão e a 40% para o sorgo; no solo Pmg foi geralmente inferior a 20% nos casos da fava, do girassol, da ervilha e do milho enquanto que no solo Cb foi inferior a 10% nos casos do milho, da ervilha e do girassol e variável no caso da fava. No intervalo térmico B, as quebras à sementeira aumentaram com a temperatura média: entre as culturas outono-invernais as quebras obtidas no solo Pmg foram superiores a 5%, 15%, 25% e 40% para a fava, a ervilha, o grão e a tremocilha, respectivamente e, entre as culturas primaveris, foram superiores a 20% para o sorgo, a 50% para o girassol e a 70% para o milho; no solo Cb foram superiores 15%, 20%, 45% e 50% para a fava, a ervilha, o grão e a tremocilha, respectivamente e, entre as culturas primaveris foram superiores a 5% para o milho, a 15% para o girassol e a 65% para o sorgo.

As *quebras à sementeira* derivam das diferentes condições em que ocorreram as germinações (laboratoriais) e as emergências (em pleno campo), nomeadamente do

regime térmico imposto (constante para a germinação e variável para a emergência) e da natureza dos substratos: o grau de contacto semente-água, devidamente controlado em laboratório, é afectado em pleno campo pela competição das sementes pela água e pelas necessidades evaporativas da camada limite do solo, sobretudo quando o défice de saturação do ar é elevado (Mayer e Poljakoff-Mayber, 1975). Por outro lado, as quebras à sementeira também se devem a factores que influenciam a fase entre o fim do processo germinativo e a emergência (alongamento do caulículo): diferentes características das sementes (Flentje e Saksena, 1964), deficiente desenvolvimento de uma semente germinada no sentido de uma plântula danificada, deformada ou doente (FAO, 1986), sensibilidades diferentes das variedades utilizadas às variações diárias do teor de água no solo (Currie, 1973) e aos patogénicos do solo (Mathews e Bradnock, 1967), diferentes capacidades de absorção da água (Pollock, 1972; Bewley e Black, 1994) ou resistências ao alongamento do coleóptilo/hipocótilo (Bresson, 1995); além disso, as quebras podem ser devidas ao menor rigor na profundidade de sementeira usada ou na preparação do terreno em toda a área de sementeira e a variações rápidas de humidade não medidas na camada mais superficial do solo.

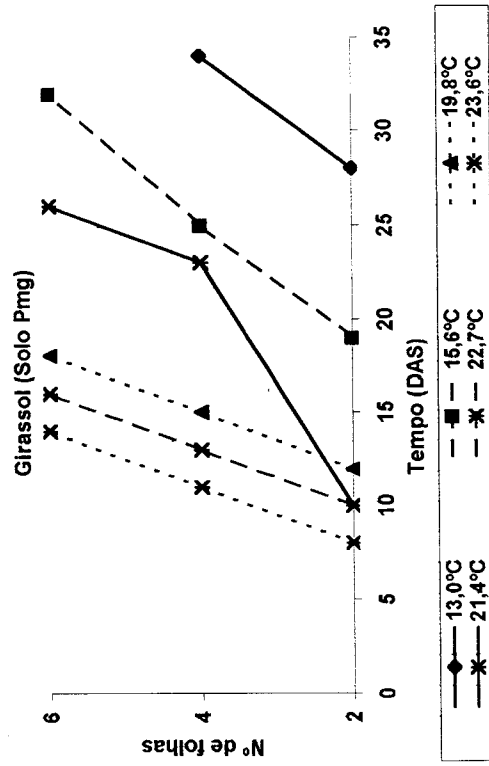
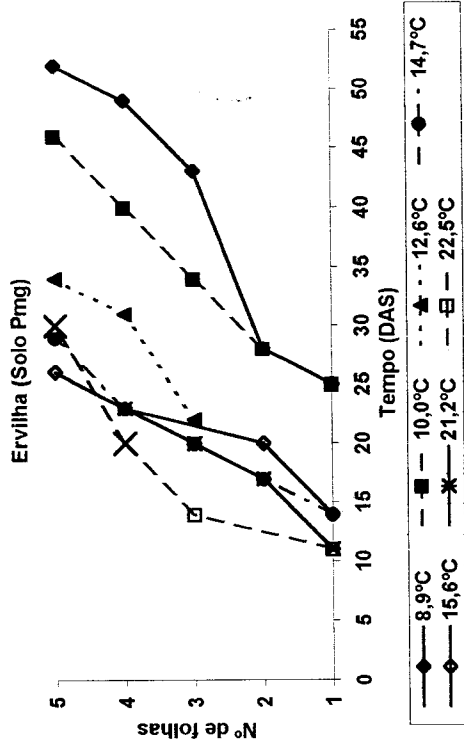
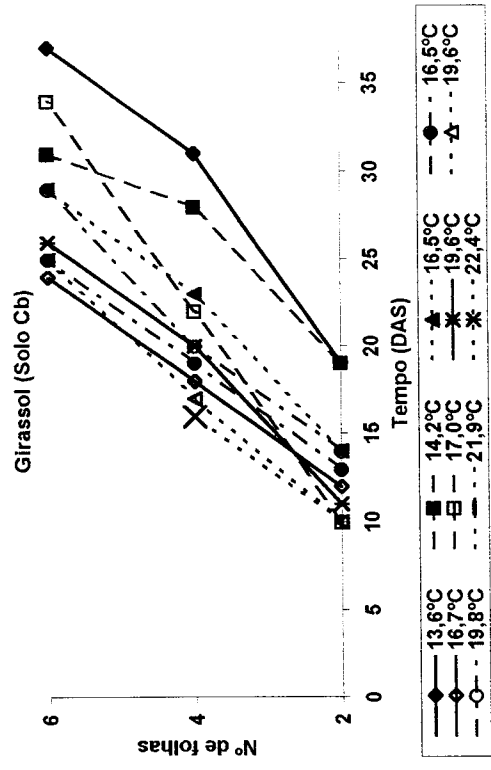
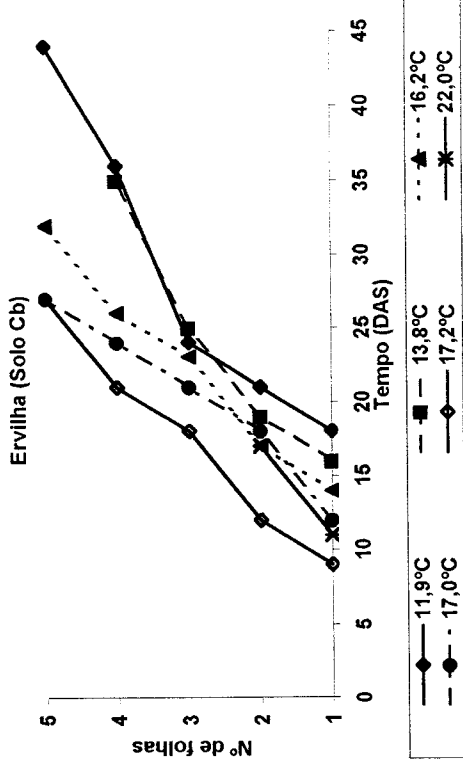
#### **3.4. Folhas e área foliar durante o estabelecimento**

A actividade fotossintética das primeiras folhas é fundamental para tornar a plântula rapidamente independente das reservas limitadas contidas na semente, permitindo assim um estabelecimento apropriado (Abreu, 1987; Fortin *et al.*, 1994). As primeiras folhas asseguram uma cobertura do solo que é tanto mais eficaz quanto mais rápida for a produção de folhas e maior for a velocidade de crescimento da área foliar. O número de folhas produzidas, a taxa de aparecimento de cada folha e o crescimento foliar ao longo do tempo foram avaliados em função da temperatura da zona meristemática e do teor de água no solo ao longo da fase de estabelecimento de cinco culturas (ervilha, fava, girassol, milho e sorgo). O teor de humidade do solo foi a média dos valores obtidos entre a sementeira e a produção da folha de ordem  $n$  ou a medição de uma dada área foliar. O estabelecimento foi considerado concluído quando foi medida a 5ª folha ou o 3º par de folhas no caso do girassol.

### 3.4.1. Evolução temporal do número de folhas

A Fig. 3.18 apresenta a evolução temporal do número de folhas na fase de estabelecimento de três culturas (ervilha, girassol e sorgo) representativas das cinco estudadas, nos solos Pmg e Cb, a diferentes temperaturas médias entre a sementeira e a produção da 5ª folha. A Fig 3.18 inclui experiências com teores baixos de humidade do solo (ocorrência de teores inferiores a 50% da Capacidade Utilizável) medidos ao longo do estabelecimento. Verifica-se que, de uma forma geral, o número de folhas aumentou ao longo do tempo, mas o tempo necessário à produção de cada uma das folhas aumentou à medida que a temperatura diminuiu, e para teores de humidade inferiores a 50% da C.U.. Além disso, a produção de folhas parece mesmo ter cessado antes da 5ª folha para teores de humidade muito baixos ou, no caso das culturas primaveris, para as temperaturas mais baixas.

No solo Pmg, a uma temperatura média de 10°C foram necessários 25 dias para a produção da 1ª folha de ervilha e 46 dias para a produção da 5ª folha; contudo, a 15,6°C foram necessários menos 8 dias para a produção da 1ª folha e menos 20 dias para a produção da quinta. O aparecimento de folhas foi limitado por teores de humidade que variaram entre 38% e 28% da C.U. (apenas 4 folhas abertas 23 DAS para uma  $T_{\text{média}}$  de 21,2°C). A 1ª folha de sorgo foi produzida a 6 DAS a 27,8°C e a 14 DAS a 19,5°C; a quinta demorou mais 10 dias a 19,5°C que a 27,8°C. O 1º par de folhas de girassol foi medido 22 DAS para uma temperatura média de 15,6°C e apenas 8 DAS a uma temperatura de 23,6°C; o 3º par foi medido, respectivamente, a 32 DAS e 14 DAS. A 13°C apenas foram produzidos dois pares de folhas até 34 DAS. No solo Cb, a produção da 1ª folha de ervilha demorou entre 9 dias a 17,2°C e 18 dias a 11,9°C; a quinta demorou 27 dias a 17,2°C e 44 dias a 11,9°C. A 22°C, e para teores médios de humidade inferiores a 30% da C.U. apenas foram produzidas 2 folhas. A produção da 1ª e da 5ª folhas do sorgo demorou mais 2 dias a 19,7°C que a cerca de 22°C. A 13,8°C e a 15,1°C apenas emergiram duas e três folhas, respectivamente. À temperatura média de 24,6°C, apenas foram produzidas 4 folhas, provavelmente devido a uma rápida dessecação da camada superficial do solo. O 1º par de folhas de girassol emergiu a 25 DAS e o 3º par a 37 DAS para uma temperatura média de 13,6°C enquanto que a 19,6°C emergiu a 13 DAS e 25 DAS, respectivamente. A 22,4°C apenas foi produzido o 1º par para um teor médio de humidade de 27% da C.U.; a 21,9°C emergiram dois pares enquanto o teor médio de humidade variou entre 51% e 29% da C.U.



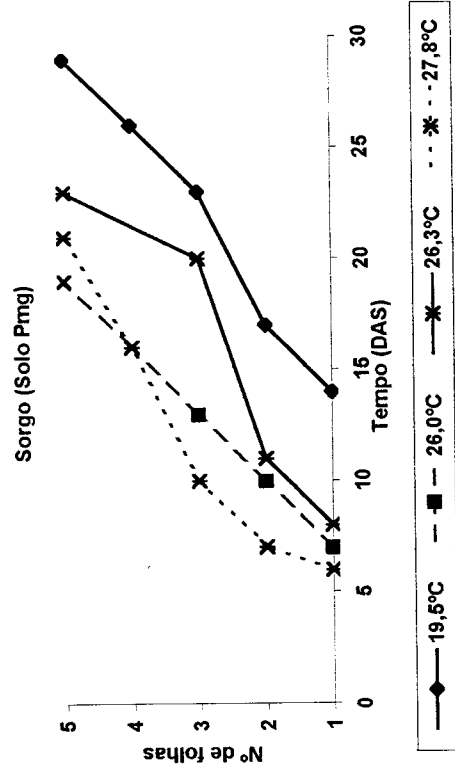
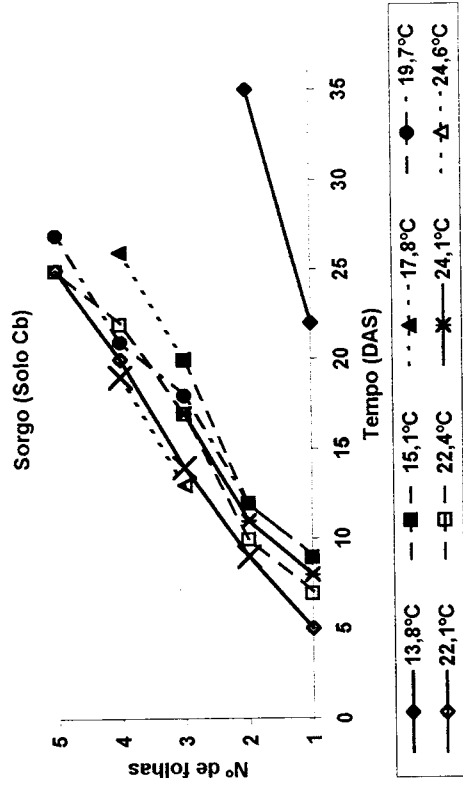


Fig. 3.18. Evolução temporal (DAS, dias após sementeira) do número de folhas na fase de estabelecimento de três culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa): os pontos representados por asteriscos (\*) referem-se a experiências afectadas por teores de humidade do solo inferiores a 50% da Capacidade Utilizável, enquanto os pontos representados por (x) referem-se à ocorrência de teores de humidade do solo inferiores a 50% da Capacidade Utilizável entre a sementeira e a produção da folha respectiva

Este tipo de variação da produção de folhas ao longo do tempo em função da temperatura foi também verificado, por exemplo, para o trigo e para a cevada por Cao e Moss (1989) ou para várias cultivares de milho painço por Mohamed *et al.* (1988b,c). Para o amendoim, Leong e Ong (1983) verificaram atrasos sistemáticos na produção de cada folha quando sujeita a baixos teores de humidade do solo.

A influência do tipo de solo no número de folhas produzidas parece visível sobretudo a teores baixos de humidade do solo. No solo Pmg, teores médios de humidade inferiores a 40% da C.U. limitaram o número de folhas produzidas para a ervilha mas não tiveram efeito visível na produção de folhas de girassol ou de sorgo (ANEXO A). No solo Cb, teores inferiores a 50% da C.U. limitaram geralmente a produção de folhas para qualquer das três culturas; a excepção é uma experiência de girassol que produziu três pares de folhas enquanto o teor de água variou entre 40% e 44% da C.U..

#### **3.4.2. Número de folhas e temperatura**

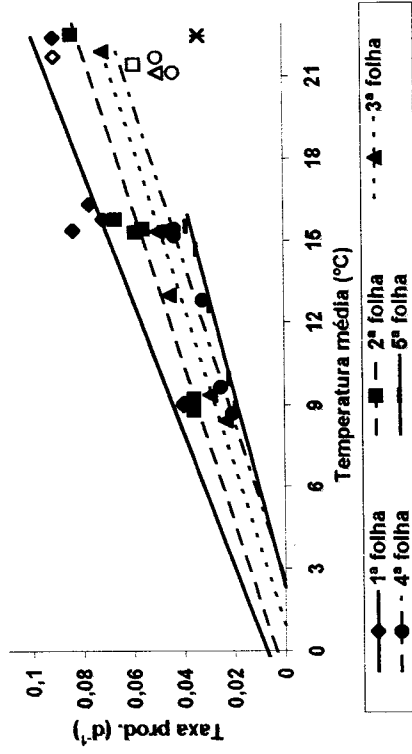
Estudou-se a produção ou o aparecimento das folhas das diferentes culturas na sua fase de estabelecimento a partir do cálculo da sua taxa (ou velocidade) e do tempo térmico para a produção de cada folha (filocrão).

##### **Taxa de produção das folhas**

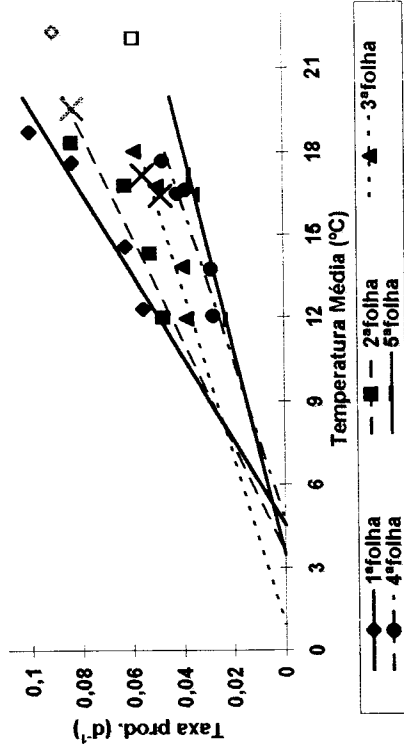
Nos solos Pmg e Cb analisou-se a relação entre a taxa de produção ( $d^{-1}$ ) de cada uma das primeiras cinco folhas de ervilha, fava, milho e sorgo e de cada um dos primeiros três pares de folhas de girassol e a temperatura média ( $^{\circ}C$ ) entre a sementeira e o dia da emergência da respectiva folha ou par de folhas. Os resultados obtidos estão apresentados na Fig. 3.19, onde estão assinaladas as folhas produzidas sob condições hídricas potencialmente deficientes (teor médio de humidade entre a sementeira e a produção da folha de ordem  $n$  inferior a 50% da C.U). Também se assinalam as situações em que os teores médios de humidade do solo permaneceram entre 50% da C.U. e a C.C. desde a sementeira até à produção de uma folha de ordem  $n$ , embora a emergência tenha sido afectada por temperaturas elevadas (ver secção 3.3.2.4).

Nos dois solos, e numa gama térmica mais ou menos extensa, a taxa de aparecimento de cada folha de ordem  $n$  aumentou, em geral, com a temperatura. Em condições hídricas favoráveis, no solo Pmg verificaram-se aumentos da taxa entre temperaturas de cerca de  $9^{\circ}C$  e  $22^{\circ}C$  para a ervilha, de  $10^{\circ}C$  e  $16^{\circ}C$  para a fava, de  $12^{\circ}C$

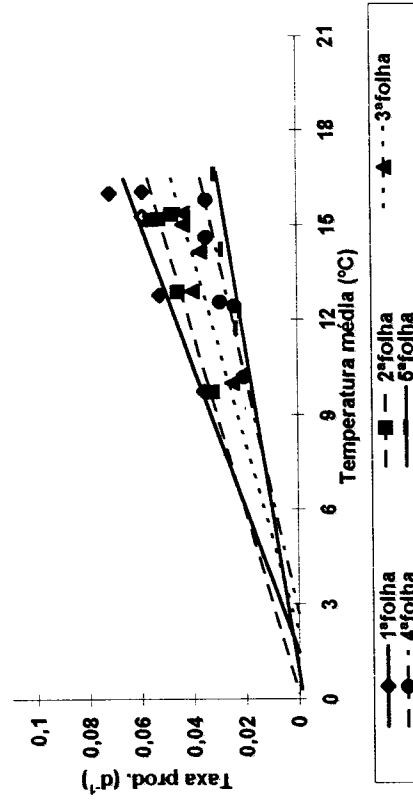
Ervilha (Pmg)



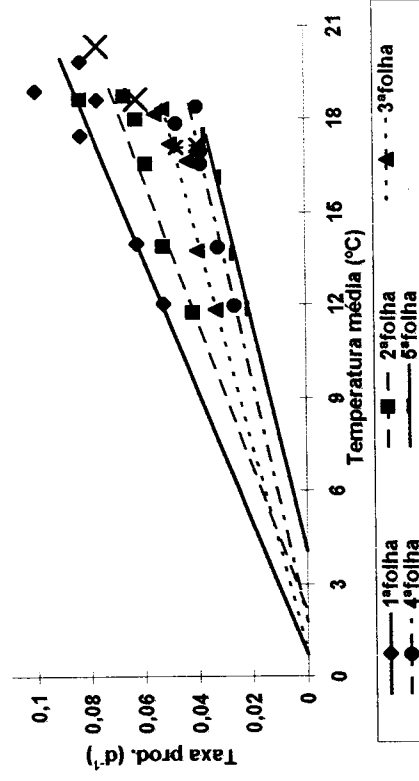
Ervilha (Cb)



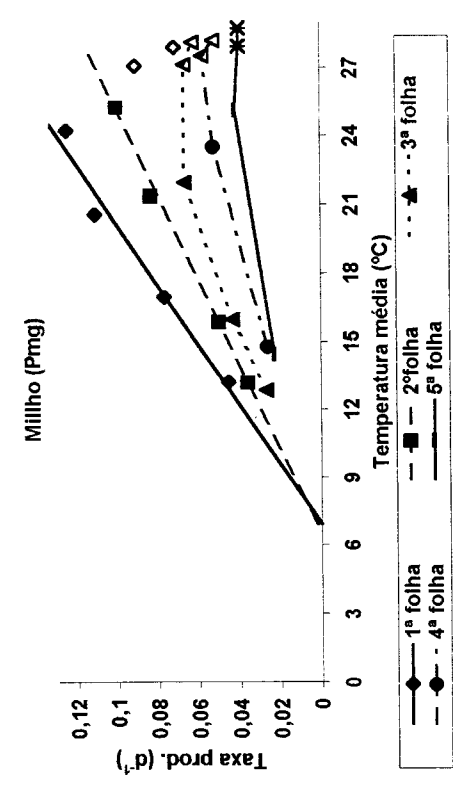
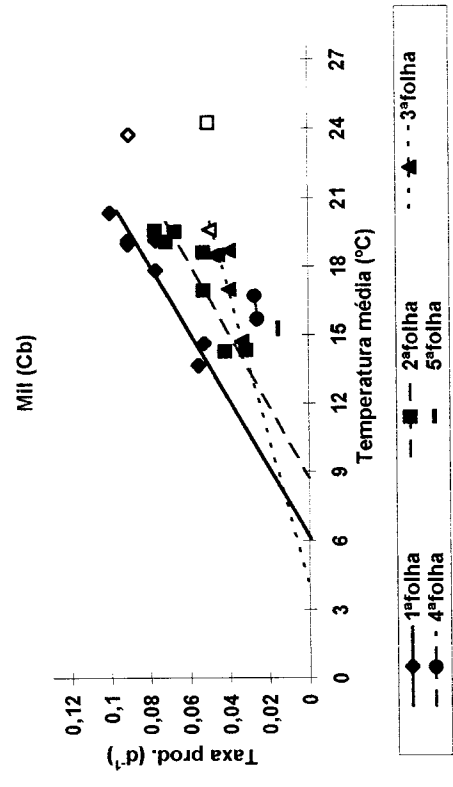
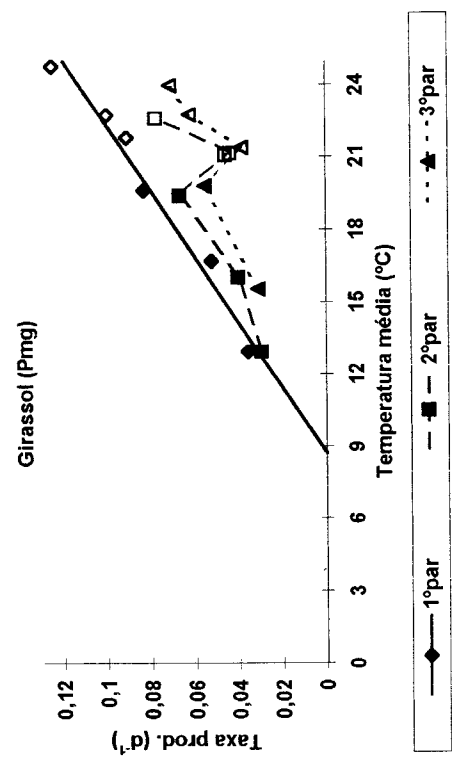
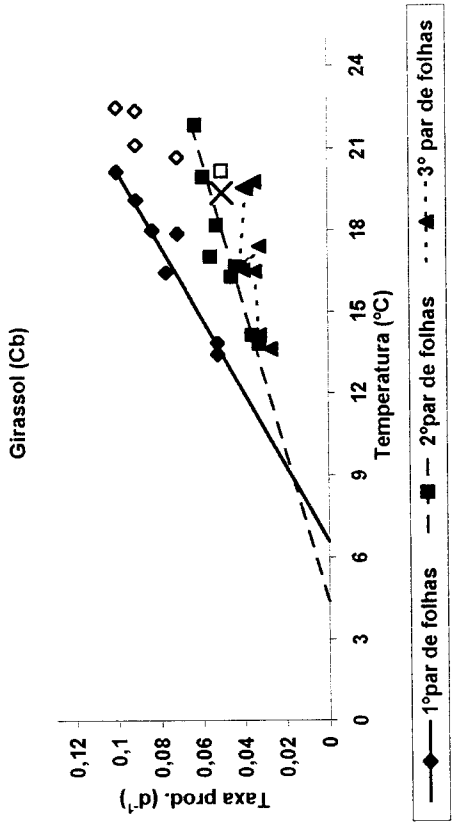
Fava (Pmg)

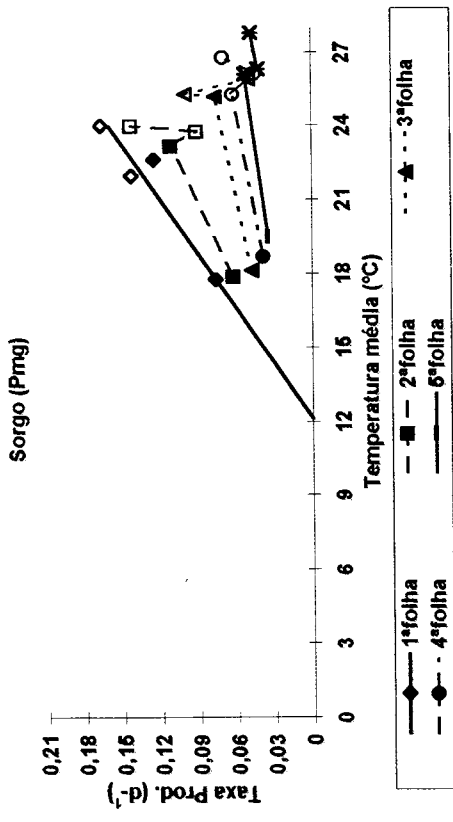
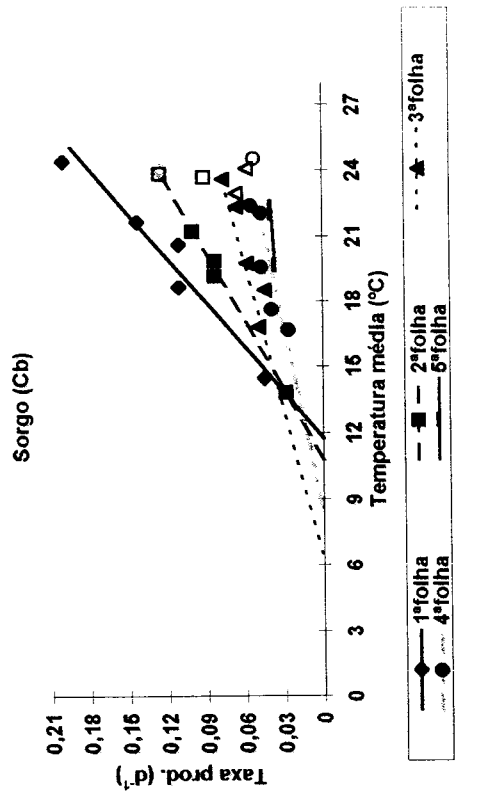


Fava (Cb)









**Fig. 3.19. Taxas de produção de folhas na fase de estabelecimento de cinco culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa)**

As rectas de regressão referem-se ao intervalo térmico entre a temperatura-base e a temperatura correspondente à taxa de produção máxima medida.

Os pontos com fundo branco ou asterisco indicam a ocorrência de teores de humidade do solo inferiores a 50% C.U., entre a sementeira e o dia em que foi produzida a folha respectiva. Os pontos representados por uma cruz (x) referem-se a experiências durante as quais o teor de humidade foi superior a 50% da C.U., mas as plântulas foram expostas a temperaturas elevadas durante a emergência

e 24°C para o girassol e o milho e entre cerca de 18°C e 24°C para o sorgo; no solo Cb, a taxa aumentou para temperaturas entre cerca de 12°C e 18°C na ervilha ou 20°C na fava, entre cerca de 13°C e 20°C no girassol e no milho e entre cerca de 14°C e 24°C no sorgo. Contudo, baixos teores de humidade do solo parecem retardar a produção das folhas, o que confirma resultados obtidos, por exemplo, por Barlow *et al.* (1977), Leong e Ong (1983) ou Craufurd *et al.* (1993) para diferentes culturas agrícolas. Quando foi prolongada a duração da exposição das plântulas a temperaturas elevadas entre a sementeira e a emergência, sem que o teor de humidade tenha sido inferior a 50% da C.U., o aparecimento das folhas em causa parece ter sido também retardado (casos de ervilha, fava e girassol no solo Cb).

A taxa de aparecimento de folhas parece aumentar linearmente com a temperatura média da zona meristemática (Fig. 3.19). Por isso, foram estabelecidas regressões lineares entre as taxas de produção de cada uma das cinco primeiras folhas (ou dos 3 pares de folhas, no caso do girassol) e as temperaturas médias entre a sementeira e a produção de cada folha ou pares de folhas. Tal como nas experiências sobre a emergência das plântulas à superfície, não foram consideradas taxas de aparecimento visivelmente afectadas por teores extremos de humidade do solo e/ou por temperaturas do solo demasiado elevadas. Entre as culturas primaveris, não foram estabelecidas regressões para algumas folhas por não haver um número suficiente de pontos regredidos (mínimo de quatro) (ANEXO F). Para cada folha das cinco espécies, o Quadro 3.10 apresenta os coeficientes de determinação das regressões lineares estabelecidas nos dois tipos de solo. Os resultados mostram que em ambos os solos as taxas de produção de folhas variaram linearmente com a temperatura média durante o respectivo período, para um nível de probabilidade superior a 95%, sendo excepção a 2ª folha da ervilha no solo Cb, para a qual a regressão foi apenas significativa para um nível de 90%. A relação linear entre taxa e temperatura foi também obtida por Leong e Ong (1983) para folhas do amendoim, Watts (1972), Cooper (1979) e Salah e Tardieu (1996) para o milho, Gallagher *et al.* (1979) e Cao e Moss (1989) para o trigo e Mohamed *et al.* (1988b) para o milho painço.

#### **Temperatura-base [T(P)<sub>base</sub>]**

Os resultados apresentados na Fig.3.19 não permitiram estimar a  $T_{\text{ópt}}$  e a  $T_{\text{máx}}$  (equações 2.13 e 2.14) para a taxa de aparecimento de cada folha, por a gama térmica experimental não ter sido suficientemente ampla. Por esta razão, as temperaturas-base

Quadro 3.10. Temperaturas-base ( $T_{base}$ ), e tempos térmicos para a produção de folhas em cinco culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa), obtidos a partir das regressões lineares entre a taxa de produção de folhas e a temperatura. Apresentam-se também os coeficientes de determinação das regressões e o número de pontos regredidos em cada caso. Notas: \* par de folhas; as regressões são significativas para 95% de probabilidade ou (1) 90% de probabilidade

Culturas	Solos	Nº de ordem da folha	$T_{base}$ (°C)	Tempo Térmico (°Cd)	Coef. de determinação ( $R^2$ )	Nº de pontos regredidos
Ervilha	Pmg	1	-1,8	243,9	0,88	6
		2	-1,1	277,8	0,97	6
		3	1,0	294,1	0,98	6
		4	2,6	294,1	0,98	5
		5	2,2	357,1	0,99	5
	Cb	1	4,6	149,3	0,94	4
		2	3,6	188,7	0,8582 (1)	4
		3	0,9	303,0	0,92	4
		4	4,7	285,7	0,90	5
		5	3,5	370,4	0,98	4
Fava	Pmg	1	1,5	227,3	0,86	5
		2	0,2	285,7	0,88	5
		3	2,0	303,0	0,88	5
		4	2,7	370,4	0,88	5
		5	0,3	526,3	0,94	5
	Cb	1	0,7	212,8	0,77	6
		2	2,2	232,6	0,77	6
		3	0,9	333,3	0,91	7
		4	1,8	384,6	0,83	7
		5	4,1	370,4	0,97	5
Girassol	Pmg	1*	8,8	135,1	0,97	6
		2*	-	-	-	-
		3*	-	-	-	-
	Cb	1*	6,5	147,1	0,90	7
		2*	4,4	270,3	0,89	8
		3*	-	-	-	-
Milho	Pmg	1	6,7	133,3	0,97	4
		2	6,6	185,2	1,00	4
		3	-	-	-	-
		4	-	-	-	-
		5	-	-	-	-
	Cb	1	6,1	149,3	0,89	7
		2	8,8	156,3	0,84	7
		3	4,0	322,6	0,78	6
		4	-	-	-	-
		5	-	-	-	-
Sorgo	Pmg	1	12,1	74,1	0,91	4
		2	-	-	-	-
		3	-	-	-	-
		4	-	-	-	-
		5	-	-	-	-
	Cb	1	11,8	68,5	0,95	5
		2	10,8	104,2	1,00	5
		3	6,3	238,1	0,87	5
		4	8,2	270,3	0,80	5
		5	-	-	-	-

deste processo foram as únicas temperaturas cardinais calculadas e são apresentadas no Quadro 3.10.

As temperaturas-base [ $T(F)_{base}$ ] foram menores nas culturas de inverno (ervilha e fava) e maiores nas primaveris (girassol, milho e sorgo). As  $T(F)_{base}$  das folhas de ervilha foram, em regra, maiores no solo Cb e as de girassol e sorgo foram maiores no solo Pmg, enquanto que as  $T(P)_{base}$  das folhas de milho e fava não mostraram qualquer tendência definida. No solo Pmg, as de ervilha variaram entre  $-1,8^{\circ}\text{C}$  e  $2,6^{\circ}\text{C}$ , as da fava entre  $0,2^{\circ}\text{C}$  e  $2,7^{\circ}\text{C}$  enquanto que as 2 primeiras do milho apresentaram valores entre 6 e  $7^{\circ}\text{C}$ , a primeira do sorgo uma  $T(F)_{base}$  de cerca de  $12^{\circ}\text{C}$  e o 1º par do girassol uma  $T(F)_{base}$  de cerca de  $9^{\circ}\text{C}$ . No solo Cb, as  $T(F)_{base}$  da ervilha variaram entre  $0,9^{\circ}\text{C}$  e  $4,7^{\circ}\text{C}$ , as da fava entre  $0,7^{\circ}\text{C}$  e  $4,1^{\circ}\text{C}$ , as do sorgo entre  $6,3^{\circ}\text{C}$  e  $11,8^{\circ}\text{C}$ , as do milho entre  $4,0^{\circ}\text{C}$  e  $8,8^{\circ}\text{C}$ , enquanto os 2 primeiros pares de folhas de girassol apresentaram valores de  $6,5^{\circ}\text{C}$  e  $4,4^{\circ}\text{C}$ .

Os intervalos de confiança (para 95% de probabilidade) obtidos para cada  $T(F)_{base}$  são apresentados no Quadro 3.11. Os limites dos intervalos de confiança não excluem a hipótese de uma temperatura-base única para a produção de qualquer folha na fase de estabelecimento. Assim, as médias aritméticas dos valores obtidos para as folhas de cada espécie foram consideradas as temperaturas-base para a produção de folhas:  $0,6 \pm 1,8^{\circ}\text{C}$  e  $3,5 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$  para a ervilha,  $1,3 \pm 1,1^{\circ}\text{C}$  e  $1,9 \pm 1,3^{\circ}\text{C}$  para a fava;  $6,7 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$  e  $6,3 \pm 2,4^{\circ}\text{C}$  para o milho respectivamente nos Solos Pmg e Cb; no solo Cb,  $5,9 \pm 1,5^{\circ}\text{C}$  para o girassol e  $9,3 \pm 2,5^{\circ}\text{C}$  para o sorgo. Os limites de confiança também indicam que os valores de  $T(F)_{base}$  de cada folha nos dois solos não podem ser consideradas significativamente diferentes.

Para a ervilha, o sorgo, a fava e o girassol os valores médios obtidos para a  $T(F)_{base}$  da produção de folhas no solo Pmg foram superiores aos obtidos para a emergência em cerca de  $0,6^{\circ}\text{C}$ ,  $2^{\circ}\text{C}$ ,  $3^{\circ}\text{C}$  e  $4^{\circ}\text{C}$ , respectivamente; ao invés, as  $T(F)_{base}$  para a produção de folhas de milho foram inferiores em cerca de  $1^{\circ}\text{C}$  à obtidas para a emergência. No solo Cb, foram inferiores em cerca de  $1^{\circ}\text{C}$  para a ervilha, o milho e o sorgo; para o girassol e para a fava. os valores foram muito aproximados (diferenças de  $0,7^{\circ}\text{C}$  e  $0,1^{\circ}\text{C}$ , respectivamente). Em qualquer caso, os valores médios de  $T(F)_{base}$  para a produção de folhas estão contidos nos intervalos de confiança para as respectivas  $T_{base}$  da emergência. Os resultados disponíveis não rejeitam a hipótese de uma temperatura-base conservativa entre a emergência e a produção de folhas na fase de estabelecimento.

Quadro 3. 11. Intervalos de Confiança (95%) da temperatura-base (°C) para a produção de folhas durante o estabelecimento de cada espécie nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa)

Cultura	Solo Pmg					Solo Cb				
	1ªfolha	2ªfolha	3ªfolha	4ªfolha	5ªfolha	1ªfolha	2ªfolha	3ªfolha	4ªfolha	5ªfolha
<b>Ervilha</b>	-3,2;7,8	-5,5;6,7	-2,4;6,2	0,3;5,2	0,9;3,6	-3,3;13,9	NS	-9,9;14,1	-0,2;11,8	-1,9;9,5
<b>Fava</b>	-4,9;11,4	-6,4;10,1	-3,6;10,5	-2,4;10,3	-4,5;6,7	-5,2;14	-3,0;13,7	-2,8;7,5	-2,1;10,4	1,0;7,6
<b>Girassol*</b>	6,4;11,8	-	-	-	-	3,8;11,1	1,1;10	-	-	-
<b>Milho</b>	0,8;13,3	4,0;9,3	-	-	-	3,1;11,5	6,3;14,0	-1;15,0	-	-
<b>Sorgo</b>	4,3;21,7	-	-	-	-	4,5;17,8	7,6;14,5	-	-	-

São por isso consistentes com os resultados obtidos por Ketring e Wheless (1989) para o amendoim ou por Hodges e Evans (1992) e por Bollero *et al.* (1996) para o milho.

### **Tempo térmico**

A linearidade obtida entre a taxa de produção de cada folha e a temperatura suporta, em cada solo e cada cultura, a aplicabilidade de um tempo térmico [ $\theta_1(F)$ ] constante que caracterize a velocidade a que as folhas são produzidas na fase de estabelecimento. Além disso, permite integrar esta fase do ciclo em modelos de crescimento e desenvolvimento, com o objectivo de estimar a ocorrência de diversos estádios fenomenológicos das culturas (Ketring e Wheless, 1989; Hodges e Evans, 1992; Bollero *et al.*, 1996).

Os valores de  $\theta_1(F)$  estimados e indicados no Quadro 3.10 foram diferentes entre as várias culturas estudadas. Para a produção da 1ª folha, a posição relativa das culturas em termos de tempo térmico é idêntica à observada para a emergência e para a germinação. A fava necessita de acumular mais temperatura para produzir qualquer uma das cinco primeiras folhas que qualquer das restantes culturas. Entre as culturas primaveris é o sorgo a que apresenta menores valores de  $\theta_1(F)$ , para qualquer folha de ordem n.

Para as várias culturas nos solos Pmg e Cb, o Quadro 3.12 compara os valores de  $\theta_1(P)$  para a 1ª folha com os correspondentes valores de  $\theta_1(E)$ , assim como os valores de  $\theta_1(P)$  para a 1ª folha nos dois solos. Verifica-se que, para produzirem a 1ª folha, a fava, a ervilha e o milho necessitam de acumular mais temperatura após a emergência que o sorgo e o girassol, tanto no solo Pmg como no solo Cb. Contudo, para a ervilha, o girassol, o milho e o sorgo, essa acumulação pós-emergência é maior no solo Cb [ $\theta_1(F) / \theta_1(E)$  entre 1,4 e 2,0] que no solo Pmg [ $\theta_1(F) / \theta_1(E)$  entre 1,0 e 1,8], enquanto que para a fava é idêntica nos dois solos [ $\theta_1(F) / \theta_1(E) = 1,7$ ]. Este comportamento compensa a emergência mais rápida no solo Cb, excepto para a ervilha. De facto, o tempo térmico para a produção da 1ª folha de ervilha, parece ser influenciada pelo tipo de solo [ $\theta_1(F)_{Cb} / \theta_1(F)_{Pmg} = 0,6$ ], enquanto o das restantes culturas não [ $\theta_1(F)_{Cb} / \theta_1(F)_{Pmg} \approx 1$ ]. Contudo, para a produção de folhas de ordem superior à 1ª, as diferenças entre os valores de  $\theta_1(F)$  relativos aos dois solos parecem atenuar-se.

**Quadro 3.12. Relação entre os tempos térmicos calculados nos solos Pmg e Cb para a emergência das plântulas  $\theta_1(E)$  e para a emergência da primeira folha  $\theta_1(F)$  de cinco culturas; relação entre os  $\theta_1(P)$  estimados nos dois solos.**

Cultura	Solo Pmg		Solo Cb		$\theta_1(F)_{Cb} / \theta_1(F)_{Pmg}$ (°Cd)
	$\theta_1(F)/\theta_1(E)$	$\theta_1(F) - \theta_1(E)$ (°C d)	$\theta_1(F)/\theta_1(E)$	$\theta_1(F) - \theta_1(E)$ (°C d)	
Ervilha	1,8	106,9	2,0	73,0	0,6
Fava	1,7	90,3	1,7	87,8	0,9
Girassol	1,1	8,5	1,7	57,8	1,1
Milho	1,4	38,1	2,0	73,0	1,1
Sorgo	1,0	2,2	1,4	20,3	0,9

### Filocrão

O filocrão é o tempo térmico necessário para a produção de uma folha, i.e., o tempo térmico para o aparecimento de folhas sucessivas, em °C d folha<sup>-1</sup>. A equação 2.13 mostra que na gama térmica entre  $T_{base}$  e  $T_{opt}$  a produção de folhas depende da temperatura acumulada. Por isso, foram estabelecidas regressões lineares entre o número de folhas produzidas na fase de estabelecimento e as temperaturas acumuladas necessárias à sua produção. O declive de cada regressão é a taxa térmica de produção foliar em folhas/(°C d<sup>1</sup>); o inverso do declive é o filocrão (°Cd/folha). As temperaturas acumuladas foram obtidas a partir das temperaturas medidas e das temperaturas-base médias de aparecimento das cinco primeiras folhas em cada solo. Foram consideradas as experiências não afectadas por solo muito seco nem por temperaturas elevadas durante a emergência.

A Fig. 3.20 mostra que a produção de novas folhas durante a fase de estabelecimento de cada uma das cinco culturas estudadas aumentou de uma forma aproximadamente linear com a temperatura acumulada. Este tipo de comportamento também foi observado por Gallagher (1979) e por Kirby (1995) para a cevada e o trigo, por Leong e Ong (1983) e por Ketring e Wheless (1992) para o amendoim, por Cao e Tibbitts (1995) para a batata, por Hodges e Evans (1992) para o milho e por Abreu e Campbell (1997) para o trigo. As regressões lineares obtidas (Quadro 3.13) têm



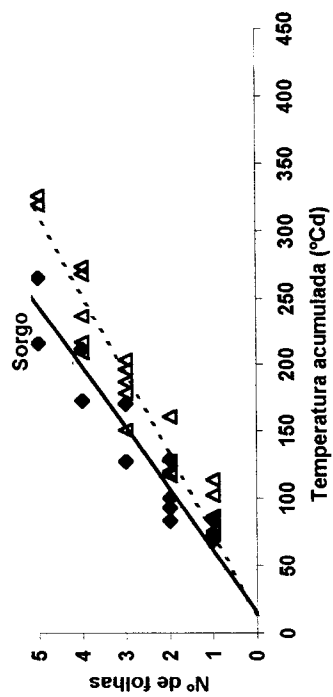
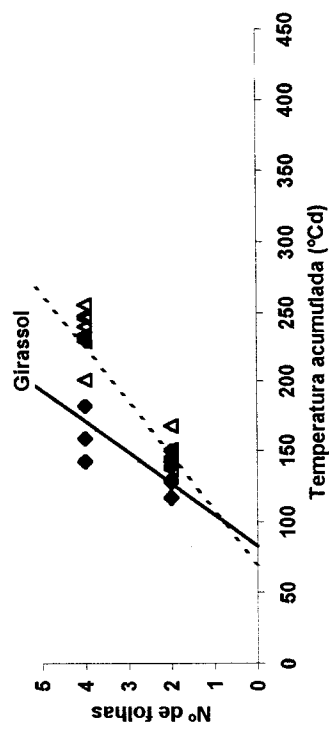
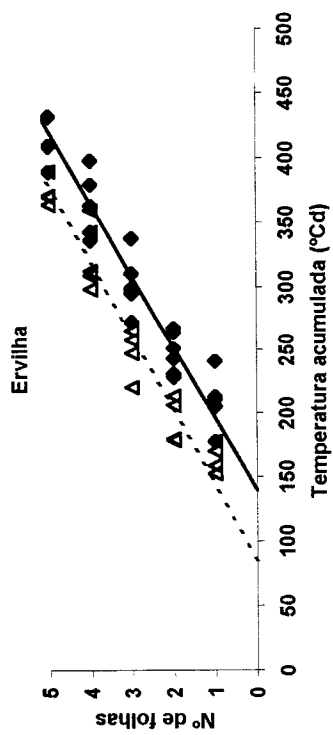
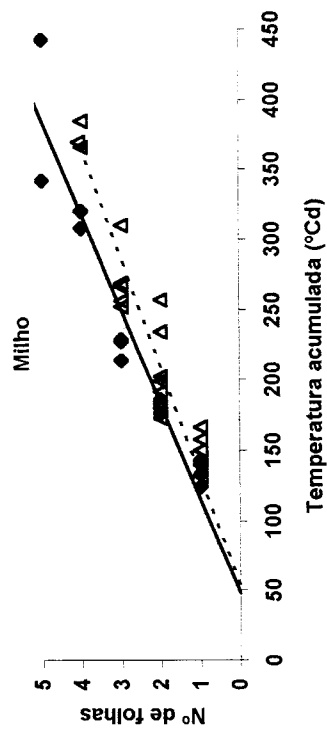
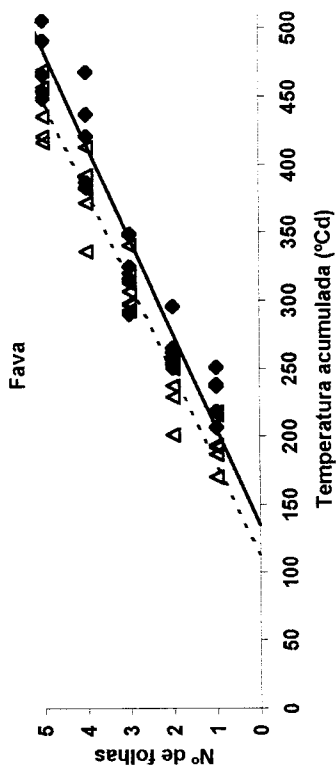


Fig 3.20. Número de folhas produzidas em função da temperatura acumulada, para cinco culturas nos solos Pmg (—◆—) (Évora) e Cb (—△—), em Lisboa

Quadro 3.13. Regressões lineares estabelecidas entre o número de folhas produzido por cinco culturas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa) e a temperatura acumulada;  $R^2$  é o respectivo coeficiente de determinação. O filocroço é o inverso do declive da regressão. As regressões foram significativas para um nível de significância ( $\alpha$ ) < 0,00001

Cultura	Solo Pmg				Solo Cb			
	Equação de regressão	Coef. de correlação ( $R^2$ )	Filocroço	Início da produção foliar	Equação de regressão	Coef. de correlação ( $R^2$ )	Filocroço	Início da produção foliar
	$y=mx+b$		$^{\circ}\text{Cd}$	$^{\circ}\text{Cd}$	$y=mx+b$		$^{\circ}\text{Cd}$	$^{\circ}\text{Cd}$
Ervilha	$y = 0,0178x - 2,486$	0,93	56,2	139,7	$y = 0,0171x - 1,4638$	0,94	58,5	85,6
Fava	$y = 0,0144x - 1,9503$	0,92	69,4	135,4	$y = 0,015x - 1,7078$	0,95	66,7	113,9
Girassol	$y = 0,0452x - 3,7442$	0,87	22,1	82,8	$y = 0,0259x - 1,8211$	0,89	38,6	70,3
Milho	$y = 0,0148x - 0,7034$	0,92	67,6	47,5	$y = 0,0129x - 0,7032$	0,90	77,5	54,5
Sorgo	$y = 0,0218x - 0,3299$	0,91	45,9	15,1	$y = 0,0168x - 0,228$	0,92	59,5	13,6

coeficientes de determinação muito elevados, com um nível de significância ( $\alpha$ ) menor que 0,00001, mostrando que o filocrão tem um valor constante na fase de estabelecimento de cada cultura em cada solo. O filocrão do girassol foi menor que o das restantes culturas (22,1°C no solo Pmg e 38°Cd no solo Cb); o da ervilha (56,2°Cd no solo Pmg e 58,5°Cd no solo Cb) foi menor que o da fava (69,4°Cd no solo Pmg e 66,7°Cd no solo Cb), enquanto que o do milho (67,6°Cd no solo Pmg e 77,5°Cd no solo Cb) foi maior que o do sorgo (49,5°Cd no solo Pmg e 59,5°Cd no solo Cb).

Dada a importância deste parâmetro na simulação do crescimento das culturas (Cao e Moss, 1989; Hodges e Evans, 1992; Abreu e Campbell, 1997), analisou-se o significado estatístico das diferenças entre os valores do filocrão de cada combinação cultura  $\times$  solo. Verifica-se que o filocrão é significativamente diferente entre as culturas e, para cada cultura, é também significativamente diferente nos solos Pmg e Cb, a um nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,01.

Para analisar a influência do estado de secura do solo no filocrão, foram estabelecidas regressões lineares entre o número de folhas produzido e a temperatura acumulada em experiências comprovadamente afectadas por teores baixos de humidade do solo (ver Fig. 3.19), inferiores a 50% da C. U.. Consideraram-se apenas experiências onde foram produzidas pelo menos 4 folhas, no total de sete no solo Pmg (de ervilha, milho e sorgo) e uma (de sorgo) no solo Cb. A temperatura-base considerada para acumulação de temperatura foi a mesma que no parágrafo anterior. Em qualquer das oito experiências, o número de folhas aumentou linearmente com a temperatura acumulada pois as regressões lineares foram significativas para um nível de probabilidade superior a 95%, com valores de  $R^2$  bastante elevados (Quadro 3.14).

Os valores do filocrão destas experiências afectadas por teores médios de humidade do solo inferiores a 50% da C.U. foram sempre maiores que os obtidos para experiências realizadas sob condições hídricas mais favoráveis. A significância estatística das diferenças obtidas entre os valores do filocrão de cada experiência de cada cultura foram analisadas e permitem afirmar que os valores do filocrão da ervilha, do sorgo e do milho foram significativamente superiores (para  $\alpha = 0,05$ ) aos obtidos em condições hídricas favoráveis, excepto para os valores do filocrão do milho no solo Pmg com um teor de humidade inferior a 40% da C.U.(entre a produção da 1ª e da 5ª folha), e do sorgo no solo Cb, que não foram significativamente diferentes dos obtidos em solo húmido.

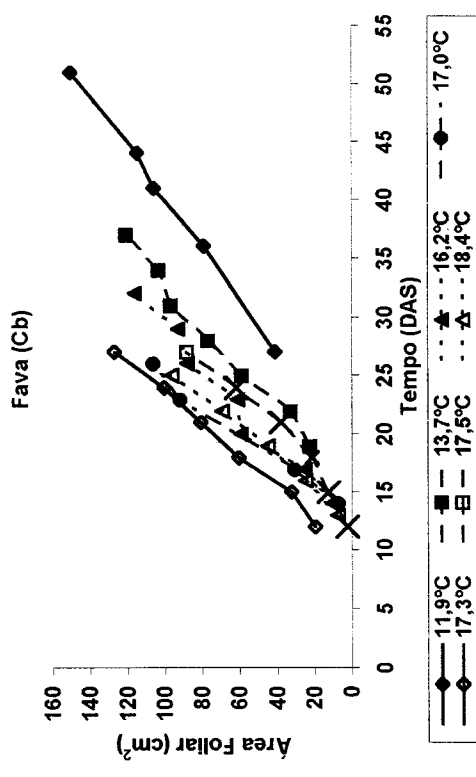
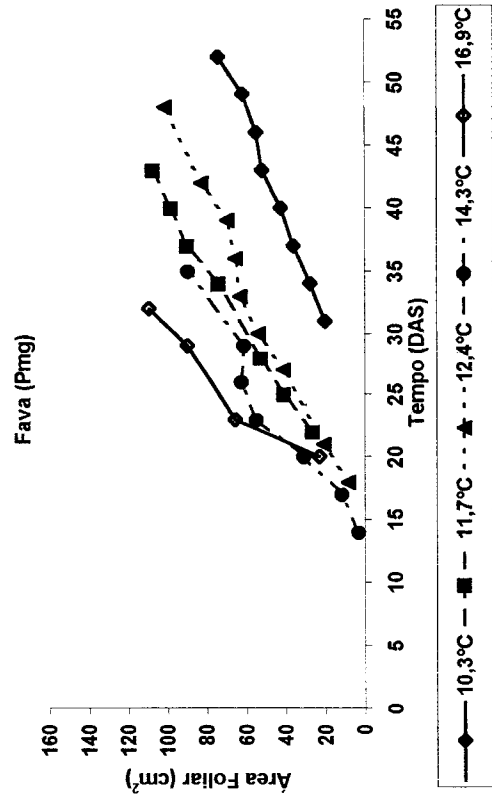
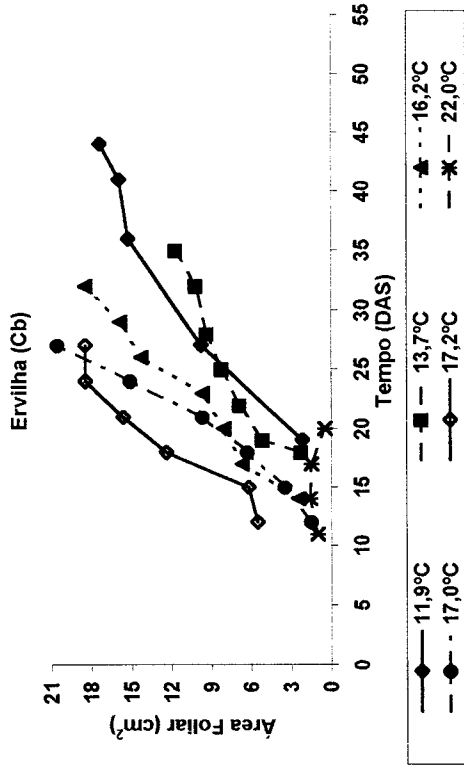
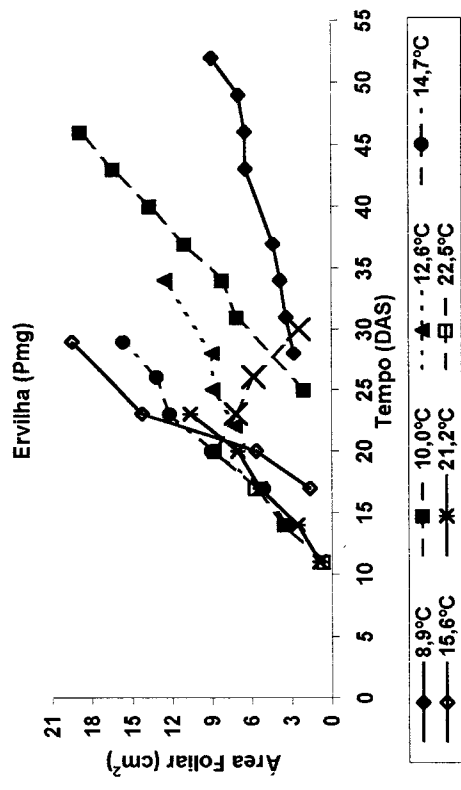
**Quadro 3.14. Coeficientes de determinação das regressões lineares estabelecidas entre o número de folhas de três culturas (ervilha, milho e sorgo) e a temperatura acumulada nos solos Pmg e Cb para teores médios de humidade do solo inferiores a 50% da C.U. ( <sup>1</sup> entre a sementeira e a produção da 4<sup>a</sup> ou da 5<sup>a</sup> folha; <sup>2</sup> teor médio de humidade ao longo do estabelecimento) e filocrão de cada uma das culturas**

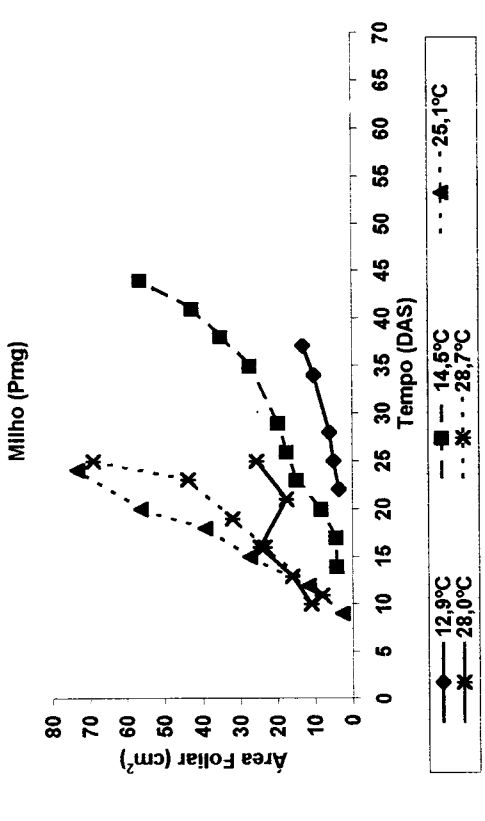
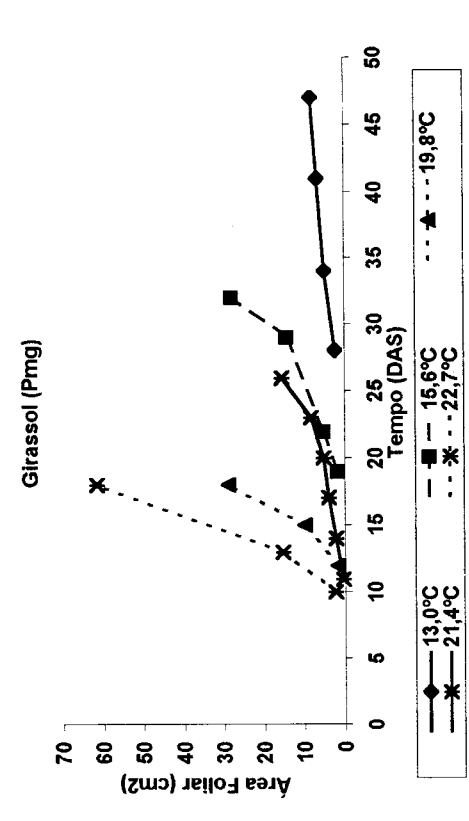
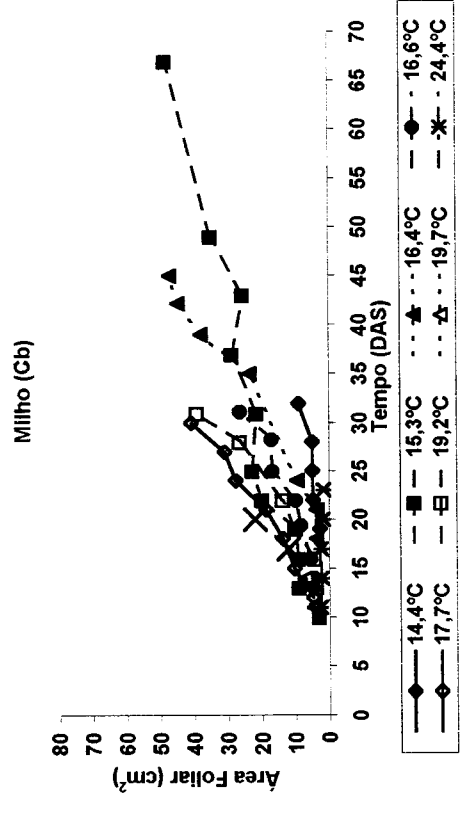
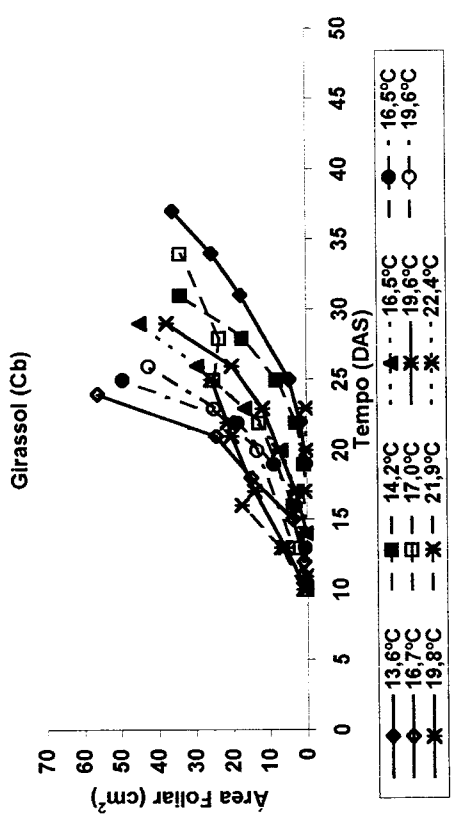
Cultura	Solo	Teor de humidade do solo (% da C.U.)		Coef. de determinação (R <sup>2</sup> )	Filocrão (°Cd)
		(à 5 <sup>a</sup> folha) <sup>1</sup>	(média) <sup>2</sup>		
Ervilha	Pmg	28	33	0,96	80
		34	54	0,83	119
Milho	Pmg	10	26	0,96	100
		5	13	0,95	80,6
Sorgo	Pmg	23	31	0,99	51
		25	32	0,92	71,9
		40	59	0,91	70,4
	Cb	52	47	0,99	64,5

Em síntese, os resultados mostram que o tipo de solo e o teor de água no solo afectam o filocrão das culturas.

### 3.4.3. Crescimento foliar

A evolução temporal da área foliar média por planta na fase de estabelecimento de cinco (ervilha, fava, girassol, milho e sorgo) culturas estudadas em cada solo, é apresentada na Fig. 3.21, para diversas temperaturas médias correspondentes ao período entre a sementeira e a medição da área foliar. A área foliar foi estimada a partir da equação 2.4. Na Fig. 3.21 estão assinaladas as experiências afectadas por teores de humidade do solo inferiores a 50% da C.U.. As áreas foliares medidas e os respectivos desvios-padrão são apresentadas no ANEXO G. O crescimento foliar na fase de estabelecimento de qualquer das cinco culturas estudadas parece variar de uma forma aproximadamente linear com o tempo na gama de temperaturas analisada em ambos os solos (Fig. 3.21). As excepções a esta tendência corresponderam, em geral, a situações de teores de humidade do solo inferiores a 50% da C.U. pós-sementeira, normalmente





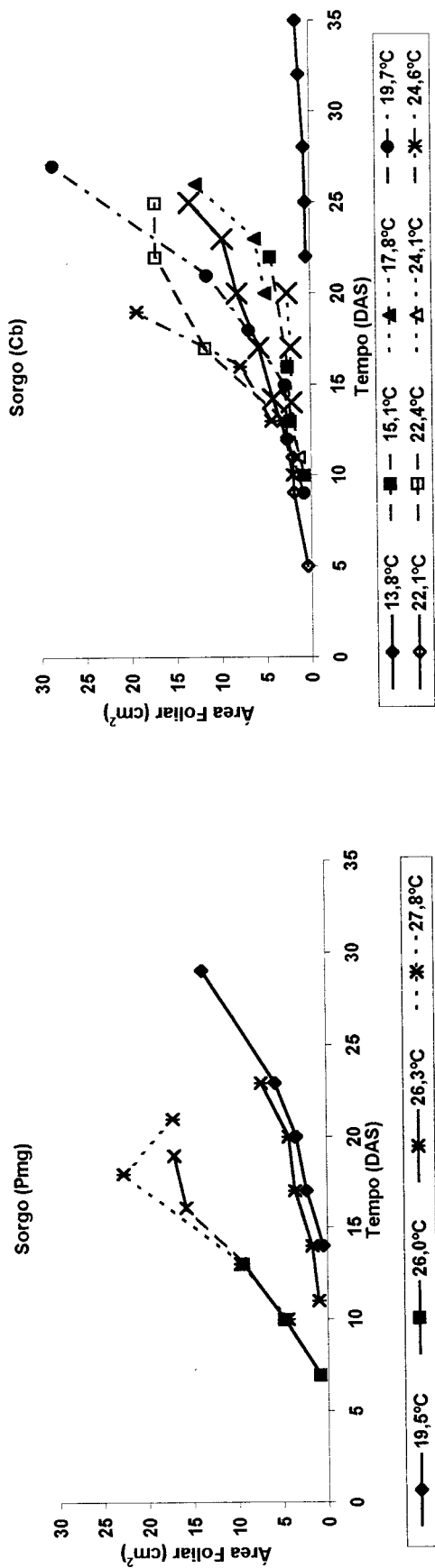


Fig. 3.21. Evolução temporal da área foliar por planta na fase de estabelecimento de cinco culturas no solo Pmg (Évora) e Cb (Lisboa), para diferentes temperaturas médias a partir da sementeira: os pontos representados por asteriscos (\*) e por (x) referem-se, respectivamente, a experiências com teores médios de humidade do solo inferiores a 50% da C.U. entre a sementeira e a medição da área foliar e à simples ocorrência destes teores entre a sementeira e a medição da área foliar .

associadas a temperaturas elevadas, como é o caso, por exemplo, da ervilha nos dois solos à temperatura de cerca de 22°C, do girassol a temperaturas superiores a 19,8°C nos dois solos; do milho a temperaturas de 28°C-29°C no solo Pmg e de cerca de 24,5°C no solo Cb. A Figura 3.21 mostra que o crescimento da área foliar foi mais rápido a teores de humidade do solo superiores a 50% da C.U., que em solo mais seco, e que, por vezes, foi mesmo interrompido (por ex., a 22-22,5°C para a ervilha, a 24,4°C no Solo Cb ou a 28°C no Solo Pmg, para o milho, a 22,4°C para o girassol semeado no solo Cb). Além disso, em solo húmido o crescimento da área foliar às temperaturas baixas foi mais lento (por ex., para a ervilha a 8,9°C no solo Pmg, o girassol a 13,0°C no solo Pmg, o milho a 12,9°C no solo Pmg e a 14,4°C no solo Cb, o sorgo a 13,8°C no solo Pmg e a 19,5°C no solo Cb).

As áreas foliares (por planta) das culturas e respectivos desvios-padrão à quinta folha produzida (3ª par de folhas no caso girassol) em ambos os solos, a diferentes temperaturas médias são apresentadas no Quadro 3.15. Para temperaturas similares, as áreas foliares do sorgo, do girassol, da fava e da ervilha no solo Cb foram geralmente maiores que no solo Pmg. Apesar de os coeficientes de variação (C.V.) das áreas foliares terem sido elevados, foram superiores no solo Pmg que no Cb, em solo com teores de água superiores a 50% da C.U.. No solo Pmg, os C.V. foram inferiores ou iguais a 65% para a ervilha, 42% para a fava, 57% para o girassol e 49% para o milho e o sorgo; no solo Cb, os C.V. foram menores ou iguais a 45%, 26% e 32%, respectivamente para a ervilha, a fava e o sorgo e a 34% para o girassol e o milho.

Teores baixos de humidade no solo (menos que 50% da C.U.) afectaram tanto a área foliar no fim do estabelecimento, como a uniformidade de cobertura do solo: de uma forma geral, houve decréscimo da área foliar média e um aumento do respectivo desvio padrão, quando comparado com solo mais húmido. O decréscimo foi visível no solo Pmg para a ervilha a 22,5°C (com um C.V.= 195%), para o girassol a 21,4°C (C.V.= 108%), para o milho a 28°C (C.V.= 106%) e para o sorgo a 26,3°C (C.V.= 78%); no solo Cb, foi visível para o girassol e para o sorgo, respectivamente a cerca de 20°C (C.V. variou entre 46% e 57%) e de 22°C (C.V. variou entre 196% e 93%) de temperatura média. Todavia, no solo Pmg não se verificaram decréscimos da área foliar do girassol a 22,7°C e a 23,6°C, nem aparentemente do milho a 28,7°C ou do sorgo a 26°C e a 27,8°C: para o sorgo, o decréscimo maior correspondeu ao menor teor médio de humidade medido durante o estabelecimento, mas para o girassol e o milho a relação entre teor de água no solo e a área foliar não foi clara.



**Quadro 3.15. Áreas foliares por planta e respectivos desvios-padrão à quinta folha produzida (3ª para o girassol) das espécies indicadas, nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa), a várias temperaturas. O teor de humidade do solo é a média dos valores medidos entre a sementeira e o fim do estabelecimento.**

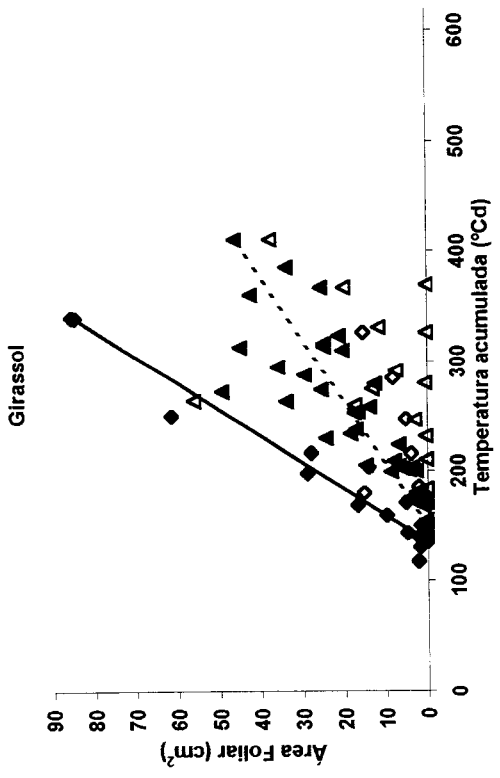
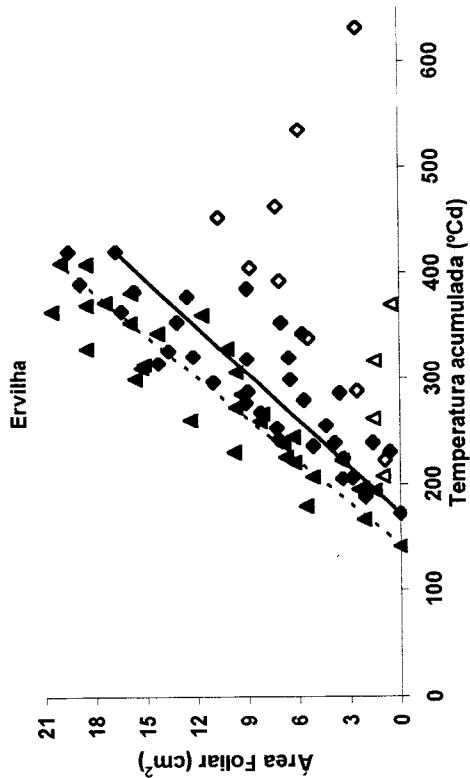
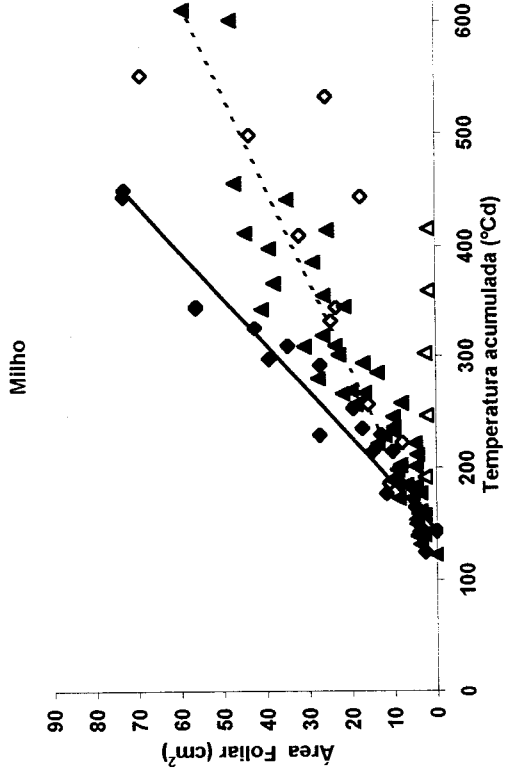
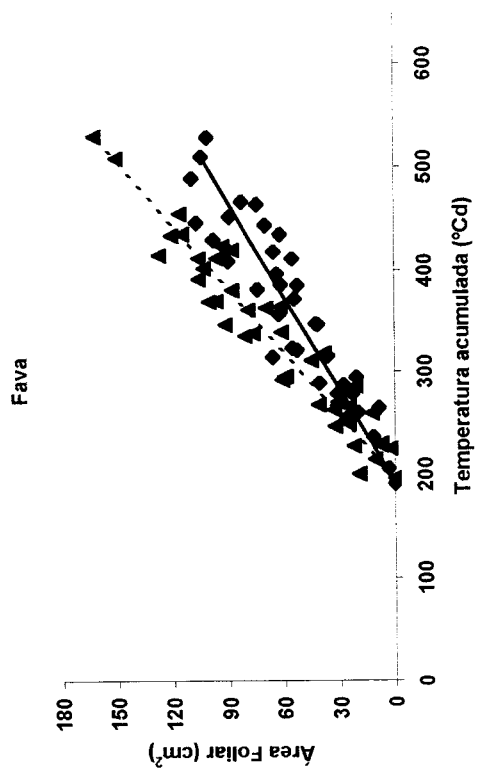
Cultura	Solo Pmg				Solo Cb			
	Temperatura média	Humidade do solo	Área Foliar	Desvio Padrão	Temperatura média	Humidade do solo	Área Foliar	Desvio Padrão
	(°C)	(% C.U.)	(cm <sup>2</sup> )		(°C)	(% C.U.)	(cm <sup>2</sup> )	
Ervilha	8,9	0,90	9,0	5,88	11,9	1,05	17,4	4,39
	10	0,98	18,9	7,12	17,2	0,85	18,5	4,33
	12,6	0,93	12,5	7,66	16,2	0,88	20,5	8,88
	14,7	0,76	15,6	9,21	17,0	0,68	18,4	8,25
	15,6	0,88	19,5	6,05				
	22,5	0,34	2,48	4,84				
Fava	10,3	0,97	74,1	15,01	11,9	1,09	150,2	38,84
	11,7	0,91	106,9	28,17	13,7	1,02	120,6	30,27
	12,4	1,17	101,0	33,16	16,2	0,88	116,0	24,37
	14,3	0,69	89,3	37,39	17,3	0,88	127,1	23,88
	16,9	0,73	109,2	25,71	17,5	0,70	87,80	22,03
Girassol	15,6	0,68	28,0	15,94	13,6	1,05	36,0	7,33
	19,8	0,70	28,9	7,55	14,2	1,15	33,9	16,77
	21,4	0,23	15,5	16,73	16,5	0,87	44,9	12,65
	22,7	0,05	61,5	31,23	16,5	0,83	49,4	10,20
	23,6	0,17	85,5	43,58	16,7	0,54	56,2	17,10
					17,0	0,95	33,8	10,50
					19,6	0,61	25,6	11,9
					19,6	0,44	42,5	14,66
				19,8	0,55	37,7	21,34	
Milho	12,8	0,95	13,0	5,56	15,3	1,11	48,0	16,17
	14,5	0,72	56,3	27,44				
	25,1	0,54	73,3	31,03				
	28,0	0,10	25,5	27,08				
	28,7	0,05	68,9	21,27				
Sorgo	19,5	0,90	13,8	6,74	19,7	0,56	28,5	9,25
	26,0	0,40	17,0	15,37	22,1	0,52	13,4	4,24
	26,3	0,25	7,5	5,87	22,4	0,61	17,2	16,0
	27,8	0,23	17,1	14,54				

De forma a avaliar o efeito do teor de humidade do solo no crescimento foliar, este foi analisado em função da temperatura acumulada e não apenas do tempo cronológico (Fig. 3.22). Para isso, as áreas foliares foram classificadas em função do teor médio de água do solo medido desde a sementeira até ao momento das respectivas medições: teores superiores ou inferiores a 50% da C.U.. A temperatura-base ( $T_{base}$ ) usada para a acumulação de temperatura foi a estimada para a produção de folhas. Da análise da Fig 3.22 verifica-se que a temperatura acumulada necessária para que a área foliar atinja um determinado valor é maior em solo seco que em solo húmido e que as diferenças entre as áreas foliares atingidas aumentaram progressivamente com a temperatura acumulada tanto no solo Pmg como no solo Cb. Além disso, a relação entre a área foliar e a temperatura acumulada parece linear, se a humidade do solo não for limitativa.

Para as medições em solo húmido, foram estabelecidas regressões lineares entre a área foliar (por planta) de cada uma das culturas e a temperatura (meristemática) acumulada no solo Pmg e no Cb (Fig. 3.22). As regressões estão representadas no Quadro 3.16, e os respectivos coeficientes mostram que são significativas a um nível de probabilidade de 95%. A verificação desta linearidade permite definir o tempo térmico necessário ao início da expansão foliar como sendo a intersecção de cada recta com o eixo das abcissas. Entre as culturas outono-invernais esse tempo térmico (Quadro 3.16) foi menor para a ervilha e, entre as culturas primaveris, foi menor para o sorgo em ambos os solos. O declive das rectas de regressão (em  $cm^2/^{\circ}C$ ) mostra que em ambos os solos, o crescimento foliar do girassol ( $0,41 cm^2/^{\circ}Cd$  no solo Pmg e  $0,18 cm^2/^{\circ}Cd$  no solo Cb) e da fava ( $0,33 cm^2/^{\circ}Cd$  no solo Pmg e  $0,48 cm^2/^{\circ}Cd$  no solo Cb) é mais rápido que o das restantes culturas.

Para teores de humidade do solo não limitativos, a velocidade de expansão foliar parece ser, de uma forma geral, influenciada pelo tipo de solo. Com efeito, para um nível de probabilidade superior a 95%, as rectas relativas aos dois solos são significativamente diferentes entre si para a ervilha, a fava, o milho e o sorgo mas não o são para o sorgo: as diferenças observadas foram maiores para a fava (cerca de  $0,23 cm^2/^{\circ}Cd$ ) e menores para a ervilha ( $0,07 cm^2/^{\circ}Cd$ ).

O início da expansão foliar da ervilha e do milho foi mais retardado no solo Pmg (mais  $31,7^{\circ}Cd$  e  $21,8^{\circ}Cd$ , respectivamente), enquanto que o do girassol e o da fava foi mais retardado no solo Cb (mais  $15,3^{\circ}C$  e  $2,5^{\circ}Cd$ , respectivamente). Contudo, os



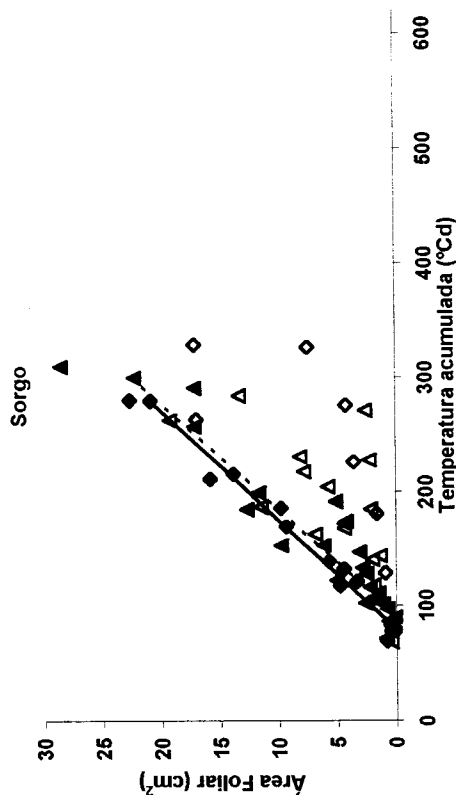


Fig. 3.22. Evolução da área foliar por planta, de cinco culturas em função da temperatura acumulada (em °Cd) nos solos Pmg e Cb em condições de humidade do solo não limitante (Húmido) e em condições de baixos teores de humidade do solo (Seco)

Quadro 3.16. Regressões estabelecidas entre a área foliar (y, em cm<sup>2</sup>) de cinco culturas e a temperatura acumulada (x, em °Cd) nos solos Pmg e Cb, para condições hídricas não limitantes: equações de regressão, respectivos coeficientes de determinação e tempo térmico para o início da expansão da área foliar. As regressões foram significativas para um nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05

Cultura	Solo Pmg			Solo Cb		
	Eq. de regressão	Coef. de correlação (R <sup>2</sup> )	Início da expansão da área foliar (°Cd)	Eq. de regressão	Coef. de correlação (R <sup>2</sup> )	Início da expansão da área foliar (°Cd)
Ervilha	y = 0,0675x - 11,633	0,68	172,3	y = 0,0742x - 10,43	0,82	140,6
Fava	y = 0,3264x - 62,395	0,83	194,2	y = 0,4803x - 94,484	0,91	196,7
Girassol	y = 0,4128x - 55,667	0,92	134,9	y = 0,1778x - 26,703	0,70	150,2
Milho	y = 0,2384x - 34,196	0,93	143,4	y = 0,1211x - 14,85	0,85	122,6
Sorgo	y = 0,1038x - 8,1573	0,97	78,6	y = 0,1011x - 9,0831	0,88	89,8

intervalos de confiança para o início da expansão linear não excluem a hipótese de um valor único para o início da expansão foliar de qualquer das cinco culturas estudadas (Quadro 3.17). Por isso, o tipo de solo não parece influenciar o tempo térmico para o início da expansão foliar.

**Quadro 3. 17. Intervalos de Confiança (95%) dos tempos térmicos (°Cd) para o início da expansão foliar das cinco culturas estudadas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa)**

<b>Cultura</b>	<b>Solo Pmg</b>	<b>Solo Cb</b>
<b>Ervilha</b>	149,3; 195,3	115,5; 165,7
<b>Fava</b>	168,4; 220,0	181,7; 211,7
<b>Girassol</b>	122,1; 147,7	132,4; 168,0
<b>Milho</b>	128,1; 158,7	103,4; 141,8
<b>Sorgo</b>	67,5; 89,7	78,7; 100,9

## 4. TEMPERATURA DO SOLO: RESULTADOS

Apresenta-se aqui os resultados das medições dos perfis de temperatura nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa) e avalia-se a aplicabilidade das séries de Fourier à simulação dos ciclos diários e anuais de temperatura. Além disso, analisa-se o efeito da insolação e do teor de água no comportamento térmico dos dois solos, nomeadamente na profundidade de amortecimento da onda térmica.

### 4.1. Temperaturas médias diária e anual

As temperaturas médias a várias profundidades nos solos Pmg e Cb são apresentadas no Quadro 4.1, tanto para ciclos diários como para ciclos anuais. Os ciclos diários referem-se a dias-tipo definidos em função da insolação astronómica, da insolação real e do teor médio de água no solo ao longo do perfil (ver secção.2.4.3.1 dos Materiais e Métodos). Cada dia-tipo representa um dia médio dum conjunto de dias com características idênticas. Os ciclos anuais referem-se aos anos de 1995 no solo Pmg e de 1994 e 1995 no solo Cb. No mesmo quadro apresentam-se também as temperaturas médias e desvios-padrão de todo o perfil térmico, incluindo a temperatura à superfície (perfil completo, PT1) ou não (perfil parcial, PT2).

As temperaturas médias diárias dos perfis completos nos dias-tipo definidos em função da influência conjunta da insolação astronómica (C, M e L) e da humidade do solo (Hb, Hm e He) variaram entre  $11,2 \pm 0,7^\circ\text{C}$  (dia M-He) e  $29,2 \pm 1,2^\circ\text{C}$  (dia L-Hb) no solo Pmg e entre  $10,1 \pm 1,4^\circ\text{C}$  (C-Hb) e  $30,6 \pm 1,9^\circ\text{C}$  (L-Hb) no solo Cb. Os pequenos desvios-padrão associados a estes valores médios indicam que a temperatura média ( $T_{\text{méd}}$ ) variou pouco com a profundidade. Contudo, é visível do Quadro 4.1 que a variação da temperatura média ao longo do perfil foi maior nos dias C e L que nos dias M e diminuiu à medida que o teor de água no solo aumentou, sobretudo em dias curtos e longos. Além disso, o sentido de variação térmica foi diferente ao longo do ano, reflectindo a variação da radiação líquida à superfície do solo. Assim, para teores baixos de humidade no solo (Quadro 4.1), entre a superfície e 32 cm de profundidade (PT1) a temperatura média aumentou ligeiramente nos dias curtos (em  $2,5^\circ\text{C}$  no solo Pmg e em  $1,2^\circ\text{C}$  no solo Cb) e nos dias de comprimento médio no solo Pmg (em  $1,9^\circ\text{C}$ ), diminuiu nos dias longos (em  $2,7^\circ\text{C}$  no solo Pmg e em  $4,9^\circ\text{C}$  no solo Cb) e manteve-se

Quadro 4.1. Temperaturas médias diárias e anuais (°C), para os perfis PT1 e PT2 e às várias profundidades, nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa): (a) diários, para diferentes combinações entre teores de humidade do solo e valores de insolação astronómica; (b) diários, para diferentes valores de nebulosidade; (c) anuais. PT1 - profundidades de 0, 2, 4, 6, 8, 16 e 32 cm ; PT2 - profundidades de 2, 4, 6, 8, 16 e 32 cm;

-1 não houve registos de pelo menos um valor horário (ciclo diário) ou um valor diário (ciclo anual)

SOLO	Dias-tipo	Perfil (PT1)		Perfil (PT2)		Profundidades						
		Média	DP	Média	DP	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	16 cm	32 cm
Pmg	C-Hb	18,4	0,9	18,6	0,9	17,4	- <sup>1</sup>	17,9	18,3	18,4	- <sup>1</sup>	19,9
	C-Hm	13,2	0,7	13,2	0,7	12,6	12,7	12,7	12,9	13,1	13,7	14,4
	C-He	13,0	0,2	13,0	0,1	13,3	13,1	12,8	13,1	12,9	12,9	12,9
	M-Hb	23,1	0,6	23,3	0,2	21,8	23,4	23,0	23,3	23,2	23,4	23,7
	M-Hm	14,5	0,6	14,5	0,7	14,5	15,3	14,8	14,9	14,6	14,1	13,4
	M-He	11,2	0,7	11,5	0,4	9,9	11,3	11,0	11,4	11,4	11,7	12,1
	L-Hb	29,2	1,2	29,1	1,3	30,0	30,5	- <sup>1</sup>	29,9	29,4	28,5	27,3
	L-Hm	23,7	1,2	23,4	1,0	25,3	24,4	23,8	24,0	23,7	23,0	21,6
	L-He	16,9	0,2	16,9	0,2	- <sup>1</sup>	16,8	16,6	16,9	16,8	17,1	17,3
Cb	C-Hb	11,0	0,6	11,0	0,7	10,9	10,7	10,4	10,7	10,7	11,5	12,1
	C-Hm	10,1	1,4	10,4	1,4	8,6	9,3	9,5	9,7	9,8	11,3	12,8
	C-He	15,2	0,3	15,1	0,2	15,5	15,3	15,1	15,3	15,2	15,0	14,7
	M-Hb	24,2	0,3	24,2	0,3	24,0	24,5	24,3	24,4	24,3	23,6	24,2
	M-Hm	14,8	0,7	14,6	0,5	16,1	15,3	14,4	14,8	14,8	13,8	14,5
	M-He	13,4	0,2	13,4	0,2	13,5	13,7	13,0	13,5	13,4	13,3	13,5
	L-Hb	30,6	1,9	30,3	1,9	32,2	32,8	31,3	30,8	30,6	29,1	27,3
	L-Hm	21,1	1,7	20,6	0,9	24,5	21,8	20,9	21,0	20,8	19,0	20,1
	L-He	18,0	0,2	18,1	0,2	17,8	18,1	17,8	18,1	18,0	18,3	18,1

(a)

SOLO	Dias-tipo	Perfil (PT1)		Perfil (PT2)		Profundidades						
		Média	DP	Média	DP	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	16 cm	32 cm
Pmg	I	18,1	1,3	17,9	1,2	19,5	19,2	18,8	18,3	17,7	17,2	15,9
	P	15,5	0,8	15,3	0,7	16,8	16,0	15,8	15,8	15,5	14,8	14,2
	M	15,4	0,7	15,4	0,8	15,4	16,3	15,8	15,8	15,5	14,9	14,1
	N	17,1	0,5	17,0	0,5	17,5	17,6	17,4	17,2	16,8	16,7	16,2
Cb	I	16,3	1,0	16,0	0,6	18,1	16,9	15,3	16,3	16,3	16,0	15,3
	P	16,4	0,9	16,1	0,7	17,9	17,0	15,9	16,5	16,4	15,9	15,0
	M	14,6	0,8	14,4	0,6	15,9	15,2	14,4	14,6	14,6	14,1	13,4
	N	12,3	0,5	12,3	0,5	11,9	12,1	11,7	12,1	12,2	12,9	13,0

(b)

SOLO	Anos	Perfil (PT1)		Perfil (PT2)		Profundidades						
		Média	DP	Média	DP	0 cm	2 cm	4 cm	6 cm	8 cm	16 cm	32 cm
Pmg	1995	20,7	0,3	20,8	0,2	20,4	21,1	20,7	21,0	20,9	20,8	20,5
Cb	1994	20,3	0,3	20,3	0,3	- <sup>1</sup>	20,6	20,4	- <sup>1</sup>	20,2	20,0	- <sup>1</sup>
	1995	21,2	0,5	21,3	0,5	20,6	21,8	21,5	21,6	21,5	21,2	20,4

(c)  
170

relativamente constante ao longo do perfil do solo Cb em dias de comprimento médio. Para teores médios de humidade no solo, a temperatura média aumentou nos dias curtos (em 1,8°C no solo Pmg e em 4,2°C no solo Cb), diminuiu nos dias longos (em 3,7°C no solo Pmg e em 4,4°C no solo Cb) e em dias M no solo Cb (em 1,6°C) e manteve-se relativamente constante ao longo do perfil em dias M no solo Pmg. Para teores elevados de humidade no solo, foi pequena a variação da temperatura média ao longo do perfil; apenas nos dias de comprimento médio a  $T_{\text{méd}}$  aumentou 2,2°C no solo Pmg e diminuiu 1,6°C no Cb.

As temperaturas médias dos PT1 referentes aos dias I, P, M e N variaram entre 15,4±0,7°C (dia M) e 18,1±1,3°C (dia I) no solo Pmg, entre 12,3±0,5°C (dia N) e 16,3±1,0°C (dia I) no solo Cb (Quadro 4.1). Os desvios-padrão diminuíram com o aumento da nebulosidade em ambos os solos, variando entre 0,5°C e 1,3°C no solo Pmg e entre 0,5°C e 1,0°C no solo Cb. Em sete dos dias analisados a temperatura média diminuiu entre a superfície e os 32 cm de profundidade (no solo Pmg, de 1,3°C no dia N a 3,6°C no dia I e no solo Cb, de 2,5°C no dia M a 2,9°C no dia P); no dia N, solo Cb, a temperatura aumentou cerca de 1°C.

As diferenças entre as temperaturas médias e respectivos desvios-padrão obtidos em PT1 e PT2 reflectem a influência da medição da temperatura à superfície na caracterização do perfil térmico do solo. Estas diferenças, quando existentes, não ultrapassaram 0,5°C em qualquer dos dias-tipo analisados. Contudo, a temperatura à superfície em PT1 aumentou ligeiramente a temperatura média do perfil relativamente a PT2 em dias de maior insolação e contrariou o sentido bem definido do gradiente entre 2 e 32 cm de profundidade nos dias longos em que o teor de água no solo foi baixo (dias L-Hb); além disso, os desvios-padrão estimados nos PT2 foram, na maior parte dos casos, ligeiramente menores que os estimados nos PT1. Estes efeitos são provavelmente devidos à maior exposição dos termopares à superfície, nomeadamente à radiação solar directa (Otter, 1968; Fritschen e Gay, 1979; Taylor e Jackson, 1986), e ao deficiente contacto termopar-solo em solo seco (Taylor e Jackson, 1986; Ham e Senock, 1992).

As temperaturas médias dos PT2 foram invariavelmente intermédias entre as temperaturas médias registadas a 8 cm e a 16 cm, para qualquer dia-tipo, o que confirma resultados obtidos por Meikle e Treadway (1981) e Cochrane e Baker (1985), que estudaram perfis cujas temperaturas médias foram semelhantes às registadas a 10-12 cm de profundidade.



Entre 2 e 16 cm de profundidade (Quadro 4.1), espessura que equivale aproximadamente ao horizonte Ap1 de ambos os solos, a variação da temperatura média diária foi inferior a 1,5°C na maior parte dos dias estudados, embora tenha atingido 3,7°C no dia L-Hb no solo Cb. Entre 2 e 8 cm de profundidade - camada de solo onde se colocam as sementes da maior parte das culturas agrícolas (Diehl, 1989) -, a temperatura média diária variou menos de 1,0°C na maioria dos dias-tipo estudados em ambos os solos. Foram registadas diferenças superiores, da ordem de 1,5-2°C, nos dias L-Hb, no solo Cb e I, no solo Pmg.

Quanto aos ciclos anuais (Quadro 4.1), a temperatura média de PT1 no solo Pmg em 1994 foi de 20,7±0,3°C e, ao longo do perfil, variou entre 20,4°C à superfície e 21,1°C a 2 cm, até 20,5°C a 32 cm. No Solo Cb, as temperaturas médias em 1994 e 1995 foram, respectivamente, de 20,3±0,3°C e 21,2±0,5°C; diminuíram 0,6°C entre 2 cm e 16 cm em 1994 e variaram de 20,6°C à superfície e 21,8°C a 2 cm até 20,4°C a 32 cm em 1995. A temperatura média em PT2 foi semelhante à obtida em PT1 em qualquer dos ciclos anuais em ambos os solos.

Os resultados apresentados mostram que a temperatura média diária dos perfis térmicos estudados, a sua variação em profundidade e o sentido desta variação são influenciados pela altura do ano (insolação astronómica), pelo teor de água no solo e, para teores de humidade do solo intermédios em dias próximos dos equinócios, pela nebulosidade. Além disso, quando o teor de humidade do solo é elevado, a influência deste factor na uniformização de temperaturas ao longo do perfil parece sobrepor-se à influência do comprimento do dia (insolação astronómica) na diversificação de temperaturas. Nas épocas usuais de sementeira e para teores de água no solo superiores a 50% da capacidade utilizável (solos com teores de humidade médios a elevados em dias-tipo C e M), as diferenças entre as temperaturas médias ao longo do perfil são pequenas, sobretudo na camada de sementeira. Por isso, é possível tomar a  $T_{\text{méd}}$  diária como uma constante na simulação da temperatura (equações 2.18 e 2.24) na camada de solo mais influente durante a fase de estabelecimento das culturas, como fizeram outros autores (van Wijk, 1963; Van Wijk, 1963; Carlaw e Jaeger, 1967; de Vries, 1975; Andrade *et al.*, 1993; Streck *et al.*, 1996).

Os resultados também permitem considerar como constante a temperatura média anual ao longo do perfil de ambos os solos. Flucker (1958) no Texas (EUA), Penrod *et al.* (1960) no Kentucky (EUA), e Penrod e Stewart (1967) em Otava (Canadá), consideraram invariável a  $T_{\text{méd}}$  anual ao longo de diferentes perfis estudados. Ao invés,

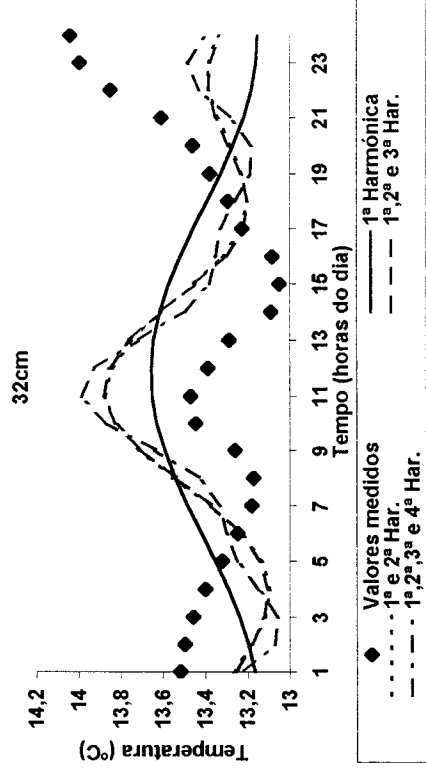
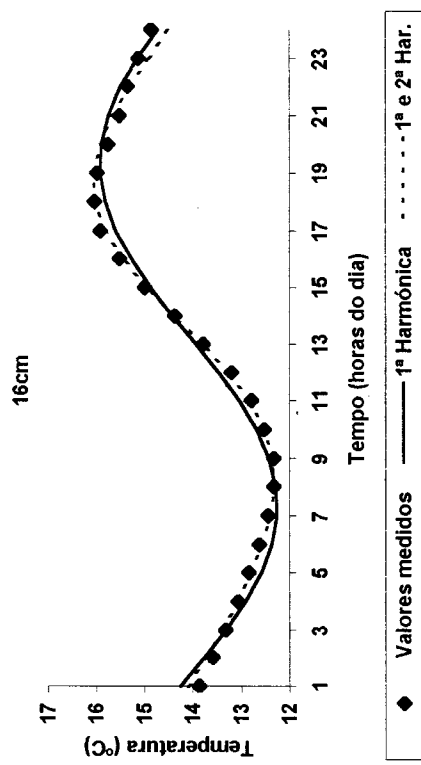
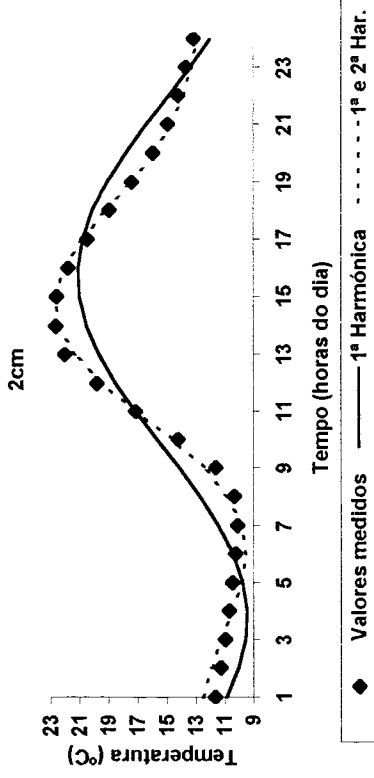
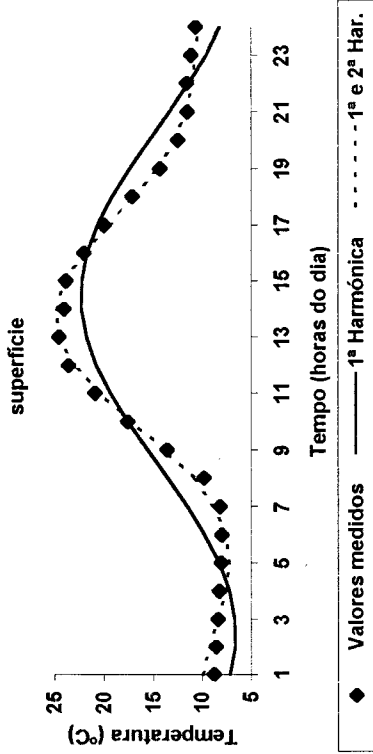
pequenas variações da  $T_{\text{méd}}$  anual com o aumento da profundidade foram reportadas por Figueiredo e Gonçalves (1991) num Luvissolo na região de Bragança, e por Krishnan e Kushwaha (1972) num solo de textura arenosa a franco-arenosa numa região da Índia.

## 4.2. Variação da temperatura nos ciclos diários e harmónicas de Fourier

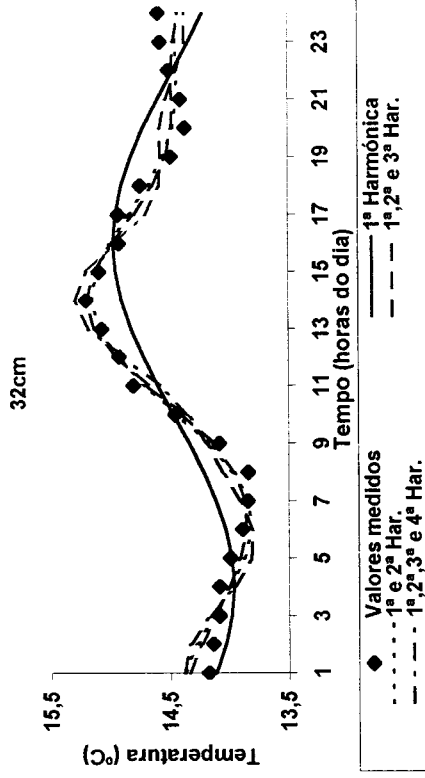
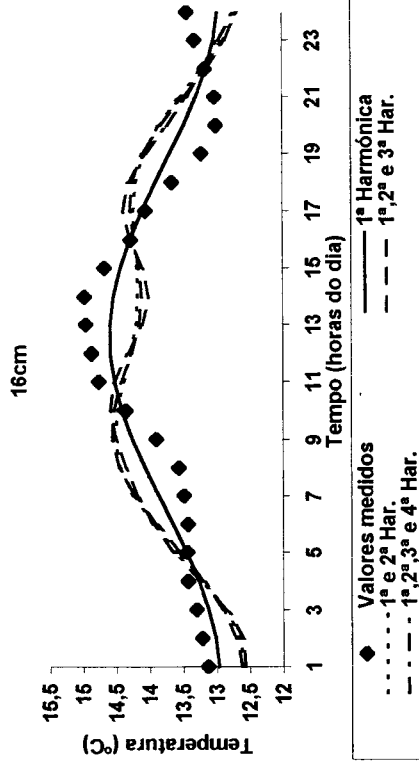
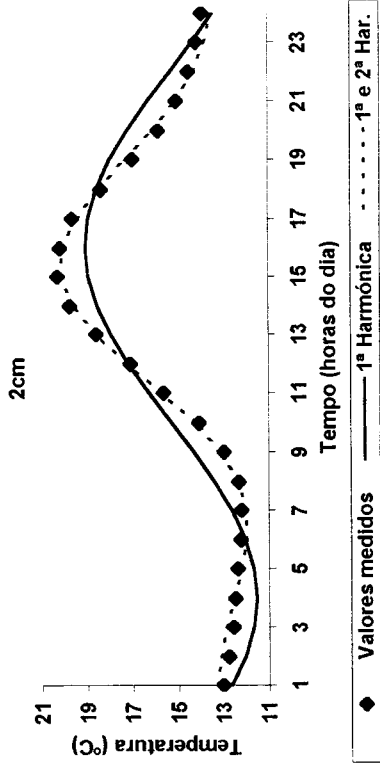
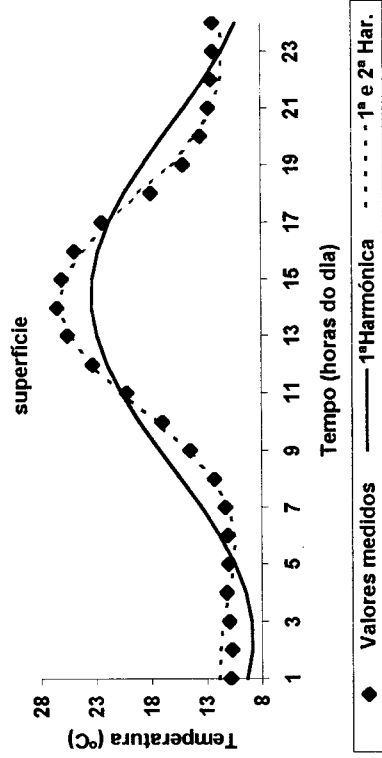
### 4.2.1. Oscilação térmica diária a cada profundidade

A variação das temperaturas médias horárias medidas ao longo de quatro dias-tipo (dias M-Hm e P nos solos Pmg e Cb) é apresentada nas Figuras 4.1 e 4.2, como exemplo dos 26 dias analisados nos dois solos (a dos restantes dias é apresentada no ANEXO H). Os cursos diários das temperaturas a 4, 6 e 8 cm de profundidade não são apresentados graficamente para uma maior clareza da Figura e por terem um comportamento semelhante aos medidos à superfície e a 2 cm de profundidade. Contudo, é de salientar que enquanto à superfície a temperatura varia em cerca de 15 a 30°C durante o ciclo diário, a 16 cm essa variação não ultrapassa em geral os 10°C e a 32 cm é praticamente sempre inferior a 2°C. Os máximos térmicos diários medidos à superfície do solo Pmg foram de 37,8°C no dia M-Hb, 44,1°C (L-Hm), 39,1°C (I) e 36,8°C (P) enquanto nos restantes dias variaram entre 19,2°C (M-He) e 27,8°C (N); à superfície do solo Cb, foram de 42,6°C no dia M-Hb, 47,3°C (L-Hm) e 35,3°C (I) e, nos restantes dias, variaram entre 15,7°C (C-Hm) e 29,3°C (P e M). Os mínimos térmicos medidos à superfície do solo Pmg variaram entre 2,9°C (M-Hm) e 12,8°C (L-Hm), enquanto que no solo Cb, variaram entre 4,9°C (M) e 13,1°C (M-Hb). A 32 cm de profundidade, os máximos térmicos medidos em ambos os solos foram superiores a 18°C nos dias M-Hb e L-Hm e, entre os restantes dias, variaram entre cerca de 12°C e 17°C.

A variação da temperatura ao longo do ciclo diário (Figuras. 4.1 e 4.2) é visivelmente harmónica nos primeiros 8 cm de profundidade em ambos os solos e a 16 cm no solo Pmg; só a 16 cm no solo Cb e a 32 cm de profundidade em ambos os solos o comportamento harmónico é menos evidente. Tendo em conta a oscilação harmónica observada, foram ajustadas as primeiras quatro harmónicas de Fourier (eq. 2.17) à variação de temperatura a cada profundidade em ambos os solos. Os Quadros 4.2 e 4.3 mostram para vários dias-tipo agrupados em função da insolação astronómica, humidade do solo e nebulosidade, a percentagem da variância total explicada por cada harmónica (equações 2.21 e 2.22) e as percentagens acumuladas para as primeiras duas

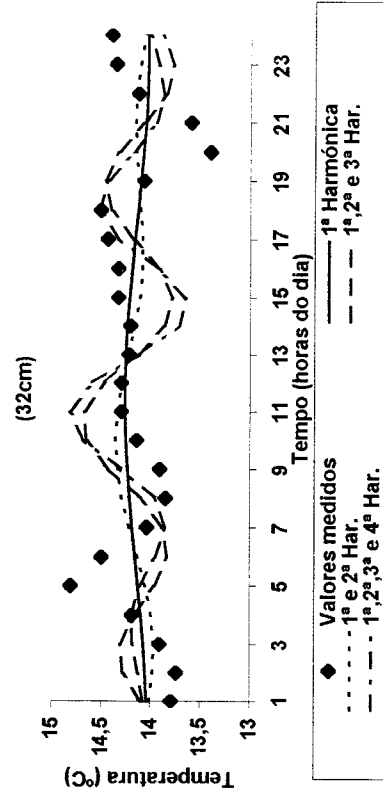
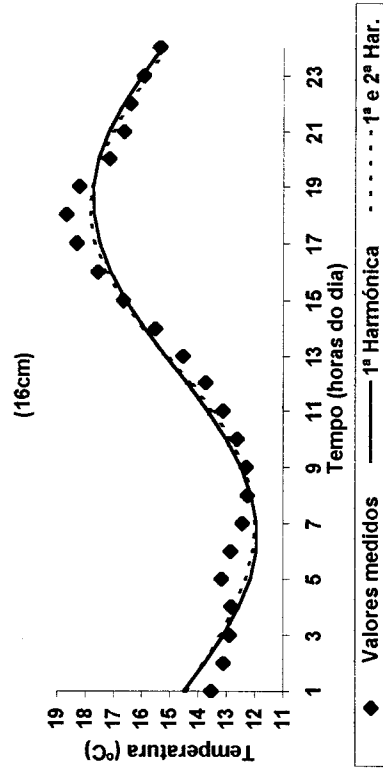
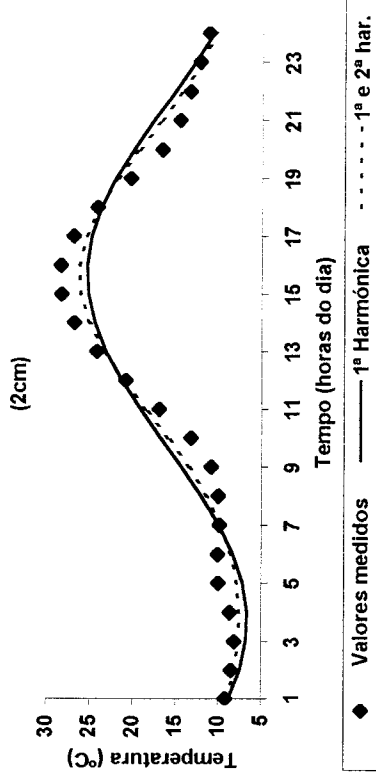
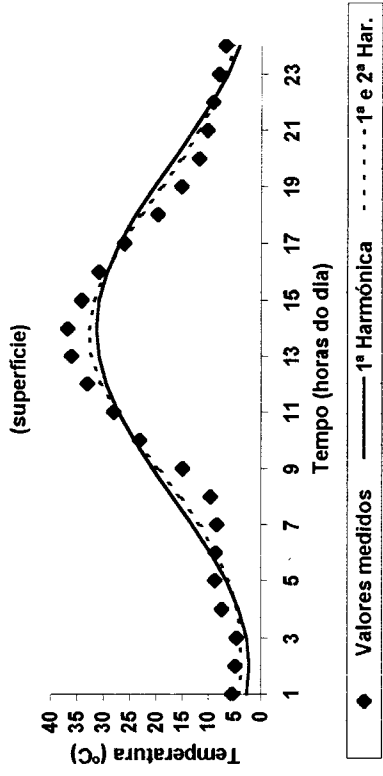


(a)

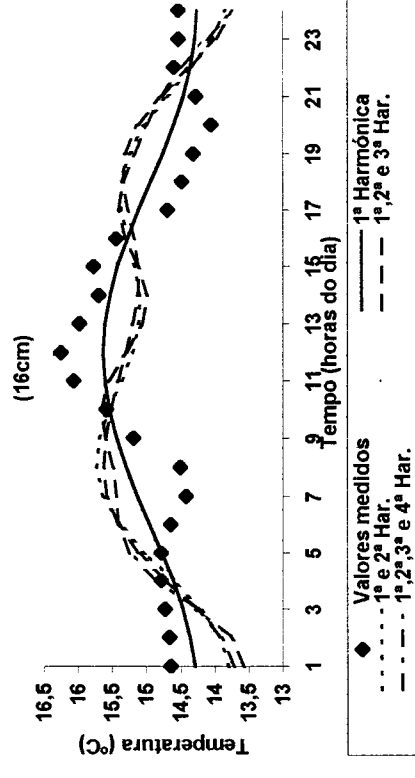
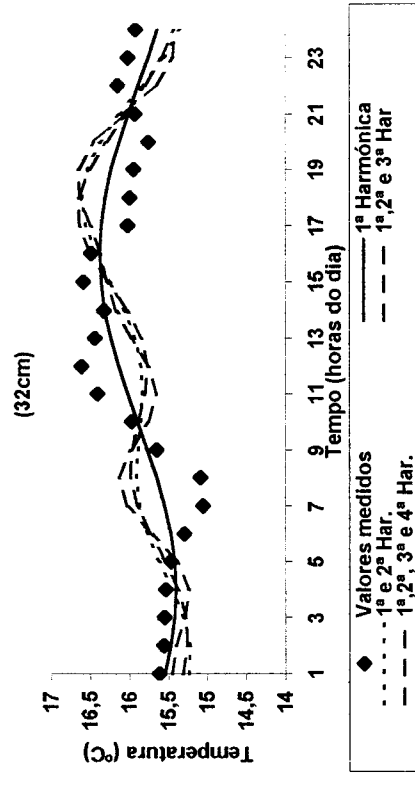
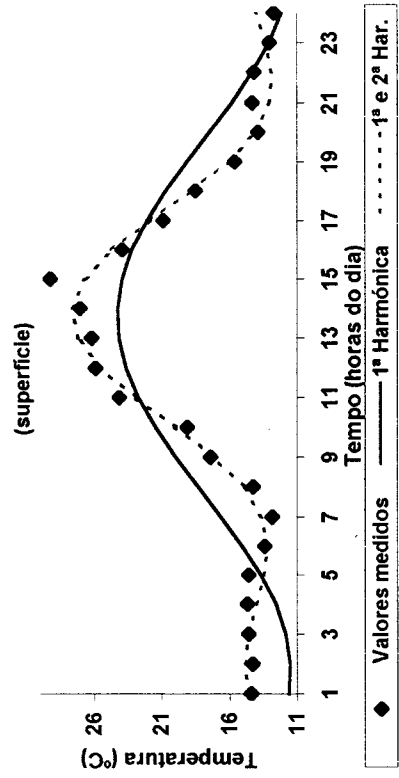
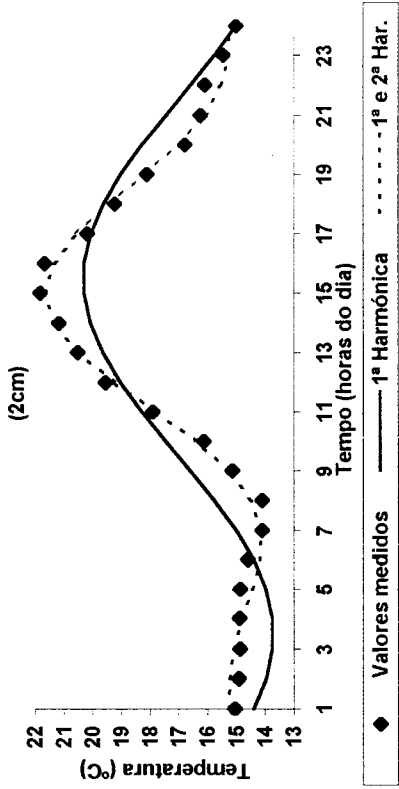


(b)

Fig. 4.1. Variação da temperatura média horária no solo às profundidades indicadas para o dia-tipo Médio-Humidade média: valores medidos e valores estimados pela análise harmônica: (a) solo Pmg; (b) solo Cb



(a)



(b)

Fig. 4.2. Variação da temperatura média horária no solo às profundidades indicadas para o dia-tipo P (céu pouco nublado) valores medidos e valores estimados pela análise harmónica: (a) solo Pmg; (b) solo Cb

Quadro 4.2. Percentagem de variação da temperatura do solo explicada por cada harmónica ou conjunto de harmónicas, a várias profundidades do solo em cinco dias-tipo ao longo do ano, definidos em função do comprimento do dia (C, curto; M, médio; L, longo) e do nível de humidade do solo (Hb, baixo; Hm, média; He, elevada) (a) solo Pmg; (b) solo Cb. (') variância total da temperatura em torno da temperatura média diária

Dia	Prof. (cm)	Variância (')	% de variância explicada pelas harmónicas					
			total	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª + 2ª
C-Hm	0	45,7	77,2	20,9	1,4	0,0	98,2	99,6
	2	17,4	79,4	19,1	1,3	0,0	98,5	99,8
	4	13,6	80,2	18,4	1,2	0,0	98,6	99,8
	6	9,2	81,7	17,1	1,0	0,0	98,8	99,8
	8	6,2	83,5	15,6	0,8	0,0	99,0	99,8
M-Hb	16	1,0	90,7	8,6	0,2	0,1	99,3	99,6
	32	0,1	15,3	75,2	2,4	1,9	90,6	94,9
M-Hm	0	92,6	88,2	10,6	0,1	0,8	98,8	99,8
	2	46,2	90,1	9,4	0,2	0,2	99,6	99,9
	4	31,8	90,8	8,8	0,2	0,2	99,7	100,0
	6	22,6	92,0	7,7	0,2	0,1	99,7	100,0
	8	16,0	93,2	6,5	0,2	0,1	99,7	100,0
M-He	16	4,3	96,0	3,5	0,3	0,1	99,5	99,9
	32	0,5	92,6	4,2	1,2	1,5	96,7	99,5
L-Hb	0	35,1	88,0	11,1	0,1	0,6	99,1	99,9
	2	19,0	89,3	9,6	0,8	0,2	98,9	99,9
	4	15,6	90,3	8,7	0,8	0,2	99,0	99,9
	6	10,3	91,5	7,6	0,7	0,1	99,1	99,9
	8	7,6	93,1	6,1	0,6	0,1	99,2	99,9
L-Hm	16	1,7	97,8	1,4	0,3	0,2	99,2	99,7
	32	0,1	47,9	38,5	0,1	9,1	86,4	96,6
L-He	0	32,0	87,2	11,8	0,2	0,6	99,0	99,7
	2	16,0	87,1	12,0	0,5	0,2	99,2	99,9
	4	13,1	88,0	11,3	0,4	0,1	99,3	99,9
	6	8,5	89,1	10,5	0,3	0,1	99,6	100,0
	8	6,1	90,5	9,2	0,2	0,0	99,7	100,0
L-Hb	16	1,4	95,8	4,1	0,1	0,0	99,9	100,0
	32	0,1	88,5	6,9	3,7	0,2	96,5	99,4
L-He	0	122,9	90,7	8,5	0,2	0,2	99,2	99,7
	2	43,7	94,2	5,6	0,1	0,1	99,8	99,9
	4	33,8	95,0	4,9	0,1	0,0	99,9	100,0
	6	30,4	95,0	4,8	0,1	0,0	99,8	100,0
	8	23,3	95,4	4,4	0,1	0,0	99,8	100,0
L-Hb	16	6,2	96,7	2,9	0,3	0,0	99,5	99,9
	32	0,1	1,7	16,9	58,8	7,3	18,6	84,7

(a)  
178

DIA	Prof. (cm)	Variação (°)	Harmônicas						
			total	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª + 2ª	1ª+2ª+3ª+4ª
C-Hm	0	12,6	74,6	21,7	3,3	0,0	96,3	99,6	
	2	3,8	85,3	12,8	1,7	0,1	98,1	100,0	
	4	2,7	86,9	11,5	1,3	0,1	98,4	99,8	
	6	2,3	88,6	10,4	1,0	0,0	99,0	100,0	
	8	1,8	89,4	9,7	0,8	0,0	99,1	100,0	
	16	0,2	94,5	2,7	2,1	0,1	97,2	99,3	
	32	0,1	72,0	19,7	5,8	0,3	91,7	97,8	
M-Hb	0	115,1	84,9	14,1	0,0	0,8	99,0	99,9	
	2	25,7	89,1	10,5	0,0	0,3	99,6	100,0	
	4	17,4	89,4	10,2	0,1	0,3	99,6	100,0	
	6	9,2	91,3	8,3	0,1	0,3	99,6	100,0	
	8	7,0	92,2	7,2	0,1	0,5	99,4	100,0	
	16	1,9	70,5	25,4	0,4	3,3	96,9	99,6	
	32	0,3	17,6	62,7	1,9	15,9	80,3	98,2	
M-Hm	0	31,0	85,0	13,8	0,8	0,3	98,8	99,8	
	2	7,8	90,0	9,3	0,5	0,1	99,4	99,9	
	4	3,0	93,5	5,7	0,4	0,2	99,2	99,8	
	6	2,8	92,3	7,0	0,3	0,3	99,4	99,9	
	8	2,2	93,1	6,2	0,2	0,3	99,4	99,9	
	16	0,4	79,2	18,4	0,4	1,4	97,5	99,3	
	32	0,2	73,7	21,3	0,6	2,8	95,0	98,5	
M-He	0	28,0	82,9	15,8	0,1	0,7	98,7	99,4	
	2	7,6	87,3	12,3	0,1	0,2	99,6	99,8	
	4	3,3	88,8	10,5	0,2	0,3	99,3	99,7	
	6	2,8	88,8	10,7	0,0	0,3	99,5	99,8	
	8	2,1	89,5	10,0	0,0	0,3	99,5	99,8	
	16	0,6	76,7	20,5	0,3	1,9	97,2	99,4	
	32	0,2	68,6	25,2	0,8	4,1	93,9	98,7	
L-Hm	0	190,7	92,5	6,6	0,4	0,3	99,1	99,7	
	2	31,7	96,1	4,6	0,0	0,1	99,7	99,9	
	4	19,9	96,3	4,5	0,0	0,1	99,7	99,9	
	6	10,8	96,9	2,5	0,2	0,2	99,4	99,8	
	8	9,2	97,0	2,2	0,2	0,3	99,2	99,8	
	16	2,2	86,6	8,5	2,8	1,1	96,2	99,1	
	32	0,8	77,9	10,6	5,5	3,2	88,5	97,3	

(b)



Quadro 4.3. Percentagem de variação da temperatura do solo explicada por cada harmónica ou conjunto de harmónicas, a várias profundidades do solo em quatro dias-tipo ao longo do ano, definidos em função da nebulosidade (I, céu limpo; P, céu pouco nublado; M, céu muito nublado; N, céu encoberto): (a) solo Pmg; (b) solo Cb. (¹) variância total da temperatura em torno da temperatura média diária

Dia	Prof. (cm)	Variância (¹)	% de variância explicada pelas harmónicas							
			total	1ª	2ª	3ª	4ª	1ª + 2ª	1ª+2ª+3ª+4ª	
N	0	122,41	82,6	15,7	0,1	1,1			98,4	99,5
	2	48,64	88,8	10,4	0,3	0,4			99,1	99,8
	4	40,64	90,0	9,2	0,3	0,3			99,2	99,8
	6	23,83	91,1	8,1	0,4	0,2			99,2	99,8
	8	15,17	92,7	6,2	0,5	0,4			98,9	99,8
	16	4,32	97,1	2,2	0,2	0,2			99,3	99,8
	32	0,37	67,8	23,8	0,1	5,1			91,7	96,9
			119,06	89,1	0,9	0,5	9,4			90,0
M	0	48,28	90,5	0,9	0,4	8,2			91,4	100,0
	2	41,42	91,3	0,8	0,4	7,5			92,0	100,0
	4	30,23	91,8	0,7	0,4	7,0			92,5	99,9
	6	21,29	92,6	0,6	0,4	6,3			93,2	99,9
	8	4,54	93,0	0,3	1,3	4,8			93,4	99,5
	16	0,10	6,7	5,9	61,0	12,9			12,6	86,5
	32	53,13	89,7	8,6	0,0	1,1			98,3	99,4
		26,84	90,6	8,3	0,6	0,3			98,9	99,8
P	0	21,85	91,5	7,5	0,5	0,3			99,0	99,8
	2	14,31	92,2	6,9	0,5	0,2			99,2	99,9
	4	10,33	93,6	5,7	0,4	0,2			99,3	99,9
	6	2,28	97,4	1,8	0,3	0,3			99,2	99,8
	8	0,10	62,1	23,2	2,3	8,4			85,3	96,0
	16	34,44	82,4	12,9	0,6	1,1			95,3	97,0
	32	15,40	90,3	7,7	0,6	0,5			98,0	99,1
		12,91	91,6	6,6	0,5	0,4			98,3	99,3
I	0	7,38	92,9	5,6	0,5	0,4			98,5	99,4
	2	4,13	94,8	4,0	0,4	0,3			98,8	99,5
	4	1,19	97,9	1,7	0,1	0,1			99,6	99,8
	6	0,09	78,4	13,4	1,4	2,0			91,8	95,2
	8									
	16									
	32									

(a)

Dia	Prof. (cm)	Variância (°)	Harmônicas					1ª+2ª+3ª+4ª
			1ª	2ª	3ª	4ª	1ª + 2ª	
Tipo		total						
N	0	18,5	65,1	16,5	7,7	5,4	81,6	94,7
	2	3,9	80,9	9,3	5,7	1,9	90,2	97,8
	4	2,2	80,6	8,7	6,3	2,0	89,3	97,5
	6	1,4	80,0	9,8	5,9	2,2	89,8	97,9
	8	1,0	79,8	10,5	5,5	2,3	90,3	98,2
	16	0,4	55,6	13,7	17,5	5,0	69,3	91,8
	32	0,1	15,3	34,5	29,1	13,2	49,9	92,1
M	0	44,0	79,2	15,8	0,9	1,8	95,0	97,8
	2	9,1	86,0	11,9	0,4	0,7	97,9	99,0
	4	4,6	87,8	9,6	0,7	0,9	97,4	99,0
	6	3,4	88,5	9,2	0,5	1,0	97,7	99,3
	8	2,7	89,9	7,9	0,5	1,1	97,8	99,4
	16	0,7	73,1	18,4	1,9	4,7	91,5	98,0
	32	0,3	72,7	14,5	1,4	9,0	87,2	97,5
P	0	27,0	75,8	21,0	0,6	0,7	96,8	98,1
	2	6,4	84,5	14,4	0,5	0,3	98,9	99,7
	4	-	-	-	-	-	-	-
	6	2,5	87,9	10,9	0,3	0,6	98,8	99,6
	8	2,0	89,5	9,2	0,2	0,6	98,7	99,6
	16	0,4	60,6	32,1	1,5	3,3	92,7	97,5
	32	0,2	61,3	26,1	2,1	7,0	87,4	96,5
I	0	82,5	84,4	14,6	0,8	0,1	99,0	99,9
	2	17,7	91,6	7,8	0,3	0,2	99,4	99,9
	4	-	-	-	-	-	-	-
	6	7,0	93,9	5,3	0,1	0,4	99,3	99,8
	8	5,4	94,8	4,4	0,1	0,5	99,2	99,8
	16	1,2	80,2	16,7	0,9	1,2	96,8	99,0
	32	0,4	75,0	17,9	1,0	3,9	92,9	97,7

(b)

e para o conjunto das quatro harmónicas. A contribuição conjunta das primeiras quatro harmónicas foi, de uma forma geral, superior a 95% (frequentemente superior a 99%) em qualquer dos dias-tipo analisados e a qualquer profundidade nos dois solos, mas a contribuição relativa de cada harmónica variou com a profundidade.

Para analisar a influência da insolação astronómica na oscilação diária da temperatura do solo ao longo dos perfis dos solos Pmg e Cb, foram comparados entre si os dias curtos, médios e longos quando foi médio o teor de humidade do solo, C-Hm, M-Hm e L-Hm (Quadros 4.2). No solo Pmg, a 1ª e a 2ª harmónicas explicaram, conjuntamente, mais de 98% da variância total em torno da temperatura média diária em todas as simulações relativas aos 16 cm superficiais do solo. Nesta camada, a importância relativa da 1ª harmónica aumentou em profundidade e com o aumento da insolação astronómica: as percentagens variaram entre 77,2% à superfície e 90,7% a 16 cm no dia curto (C), entre 88,0% e 97,8% no dia médio (M) e entre 90,7% e 96,7% no dia mais longo (L). A 32 cm de profundidade a 1ª e a 2ª harmónicas em conjunto explicaram, 90,6% no dia curto, 86,4% no dia médio e 18,6% no dia longo: a contribuição relativa da 1ª harmónica foi maior no dia M (47,9%), mais reduzida no dia C (15,3%) e quase insignificante no dia L (1,7%); para a segunda, variou entre 16,9% no dia L e 75,2% no dia C. As contribuições relativas das 3ª e 4ª harmónicas foram diminutas a qualquer profundidade, exceptuando as referentes a 32 cm no dia mais longo (58,8% e 7,3%, respectivamente) e no dia médio (9,1% para a 4ª harmónica): nos 16 cm superficiais não ultrapassaram 1,4%. A sobreposição das primeiras quatro harmónicas contribuiu sempre com mais de cerca de 95%, exceptuando a referente a 32 cm no dia mais longo, que foi de apenas 84,7%.

No solo Cb, a 1ª e a 2ª harmónicas explicaram, conjuntamente, mais de 95% da variância total em torno da temperatura média diária em todas as simulações relativas aos 16 cm superficiais do solo, e mais de 98% nas simulações para profundidades entre 2 e 8 cm. Até 8 cm, a importância relativa da 1ª harmónica aumentou com o comprimento do dia e em profundidade: as percentagens variaram entre 74,6% e 89,4% no dia curto, entre 85% e 93,1% no dia médio, e entre 92,5% e 97% no dia mais longo. A 16 cm de profundidade a 1ª harmónica explicou entre 79,2% no dia M e 94,5% no dia C. A 32 cm as percentagens acumuladas para a 1ª e 2ª harmónicas foram menores que às outras profundidades e variaram entre 88,5% no dia longo e 95% no dia médio. A qualquer profundidade, as contribuições relativas das 3ª e 4ª harmónicas foram pequenas: nos primeiros 16 cm foram, em regra, menores que 1%: a 32 cm, a 3ª

harmónica explicou cerca de 5% nos dias curtos e longos e a 4ª harmónica cerca de 3% nos dias médios e longos. A sobreposição das primeiras quatro harmónicas foi sempre superior a 97%.

Para avaliar a influência da humidade do solo na oscilação diária da temperatura do solo ao longo dos perfis dos solos Pmg e Cb, foram comparados entre si os dias de comprimento médio nos quais o solo apresentou teores de humidade baixos, médios e elevados (M-Hb, M-Hm e M-He) (Quadro 4.2). No solo Pmg, a 1ª e a 2ª harmónicas explicaram, conjuntamente, mais de 98,5% da variância total em torno da temperatura média diária em todas as simulações relativas aos 16 cm superficiais do solo. Nesta camada, a importância relativa da 1ª harmónica cresceu ligeiramente em profundidade e não pareceu ser influenciada pelo teor de humidade do solo: as percentagens variaram entre 88,2% à superfície e 96% a 16 cm no dia Hb, entre 88% e 97,8% no dia Hm, entre 87,2% e 95,8% no dia He. A 32 cm a 1ª e a 2ª harmónicas explicaram 96,7% no dia Hb, 86,4% no dia Hm e 96,5% no dia He: a contribuição relativa da 1ª harmónica foi maior no dia Hb (92,6%) e menor no dia Hm (47,9%); a da 2ª harmónica variou entre 4,2% (Hb) e 38,5% (Hm). A qualquer profundidade, as contribuições relativas das 3ª e 4ª harmónicas foram diminutas: nos 16 cm superficiais foram inferiores a 1%; a 32 cm só se destacou a percentagem relativa à 4ª harmónica no dia Hm (9,1%). A sobreposição das primeiras quatro harmónicas explicou 95,6% da variância total no dia Hm e mais de 99% nos dias Hb e He.

No solo Cb, as 1ª e 2ª harmónicas explicaram, conjuntamente, mais de 98,5% da variância total em torno da temperatura média diária em todas as simulações relativas aos 8 cm superficiais do solo, entre 95,9% (dia Hb) e 97,5% (dia Hm) a 16 cm e entre 80,3% (dia Hb) e 95% (dia Hm) a 32 cm de profundidade. Até 8 cm, a importância relativa da 1ª harmónica cresceu em profundidade e não pareceu ser influenciada pelo teor de humidade do solo: as percentagens variaram entre 84,9% e 92,2% no dia Hb, entre 85% e 93,1% no dia Hm ou entre 82,9% e 89,5% no dia He. A 16 cm de profundidade a 1ª harmónica explicou entre 70,5% (no dia Hb) e 79,2% (no dia Hm) da variância total da temperatura. A 32 cm, as contribuições relativas da 1ª e 2ª harmónicas foram, respectivamente, de 17,6% e 62,7% no dia Hb, de 73,7% e 21,3% no dia Hm e de 68,6% e 25,2% no dia He. As contribuições relativas das 3ª e 4ª harmónicas foram muito pequenas, excepto os 15,9% no dia Hb a 32 cm. A sobreposição das primeiras quatro harmónicas foi sempre superior a 96%.

Para estudar a influência da nebulosidade na oscilação diária da temperatura do solo ao longo dos perfis dos solos Pmg e Cb, foram comparados entre si os resultados das simulações obtidos para os dias I (céu limpo), P (céu pouco nublado), M (céu muito nublado) e N (céu encoberto) (Quadro 4.3). Na maior parte das simulações até 16 cm de profundidade no solo Pmg e até 8 cm no solo Cb, as 1ª e 2ª harmônicas explicaram, em conjunto, mais de 97% da variância total em torno da temperatura média diária; exceptuaram-se as relativas ao dia M no solo Pmg (entre 90% e 93,4%), ao dia N no solo Cb (entre 82% e 90%) e à superfície dos solos Pmg e Cb, respectivamente nos dias I e M (cerca de 95%). Contudo, em qualquer dos dias analisados a sobreposição das primeiras quatro harmônicas explicou mais de 97% da variância total. A contribuição relativa da 1ª harmónica aumentou em profundidade (entre 2 cm e 8-16 cm, cresceu até cerca de 7%) e, no solo Cb, parece diminuir com a nebulosidade (entre cerca de 84-96% no dia I e 65-80% no dia N). As contribuições relativas das 3ª e 4ª harmônicas foram geralmente reduzidas (a da 3ª harmónica ultrapassou 2% nas simulações do dia N no solo Cb e a da 4ª harmónica foi superior a 3% nas simulações para o dia M no solo Pmg).

Às profundidades maiores as contribuições relativas das 1ª e 2ª harmônicas foram menores e mais variáveis que às profundidades menores: conjuntamente, explicaram entre 12,6% (dia M) e 91,7% (dia I) a 32 cm no solo Pmg, entre 69,3% (dia N) e 96,8% (dia I) e entre 49,9% (dia N) e 92,9% (dia I), respectivamente a 16 cm e a 32 cm no solo Cb. A sobreposição das primeiras quatro harmônicas explicou entre 86,5% e 96,9% a 32 cm no solo Pmg, entre 91,8% (dia N) e 99% (dia I) e entre 92,1% (dia N) e 97,7% (dia I), respectivamente a 16 cm e 32 cm no solo Cb. A contribuição relativa da 3ª harmónica foi superior a 3% no dia M (a 32 cm no solo Pmg) e no dia N (a 16 e 32 cm no solo Cb); a contribuição relativa da 4ª harmónica foi superior a 3% nos dias N, M e P em ambos os solos (variou entre 3,3% e 13,2%) e no dia I a 32 cm de profundidade do solo Cb (3,9%).

Os resultados mostram que o curso diário da temperatura do solo até 16 cm de profundidade no solo Pmg e até 8 cm no solo Cb é bem descrito pela sobreposição das duas primeiras harmônicas, que explicam uma percentagem muito elevada da variância total da temperatura em torno do seu valor médio, independentemente da profundidade, da insolação astronómica, da nebulosidade e do teor de água no solo. Contudo, a contribuição relativa da primeira harmónica aumenta com a insolação astronómica e com a profundidade mas não parece depender nem da humidade do solo nem do nível

de nebulosidade em cada dia. Outros autores também recorreram a duas harmónicas para simular satisfatoriamente a variação térmica diária, como foi o caso de Ghuman e Lal (1982) a 5 cm de profundidade num solo de textura franco-arenosa e o de Gupta *et al.* (1984) ao longo dos 30 cm superficiais de um solo franco-limoso.

Para simular a variação térmica diária a profundidades maiores (16 cm no solo Cb e 32 cm em ambos os solos) foi necessário, com frequência, o recurso a harmónicas de 3ª e 4ª ordem, porque as amplitudes de flutuações “não-periódicas” foram pequenas e variáveis, nem sempre compatíveis com as amplitudes da primeira harmónica ou da 2ª harmónica. Esta alteração do comportamento térmico relativamente à camada mais superficial deve-se, provavelmente, à variação dos valores das propriedades térmicas do solo ao longo do perfil. Além disso, as amplitudes térmicas foram bastante reduzidas a 32 cm de profundidade, pelo que a sensibilidade dos termopares pode ser um factor a ter em conta na diferença entre os resultados obtidos a 16 e a 32 cm.

#### **4.2.2. Períodos de aquecimento**

Na secção anterior verificou-se que a utilização exclusiva da primeira harmónica de Fourier não é suficiente para descrever o curso diário da temperatura às profundidades menores em ambos os solos, nomeadamente até 8-16 cm de profundidade. A análise das Figs. 4.1 e 4.2 permite verificar que a duração do período de aquecimento do solo (PAq) é normalmente menor que o do período de arrefecimento ao longo de um ciclo diário, enquanto que a variação térmica simulada por uma única harmónica compreende períodos de aquecimento e de arrefecimento iguais, de 12 horas cada. Além disso, às profundidades maiores (a 32 cm em ambos os solos e a 16 cm no solo Cb) ocorreram, com frequência, vários períodos de aquecimento ao longo do mesmo ciclo diário. Aparentemente, a combinação de harmónicas melhora a descrição do curso diário de temperatura por aproximar os PAq simulados dos medidos, melhorando também a descrição das horas de ocorrência dos extremos térmicos

Os Quadros 4.4 e 4.5 apresentam as horas a que ocorreram os máximos e os mínimos térmicos em vários ciclos diários, medidos e calculados com as várias harmónicas, e os respectivos períodos de aquecimento (PAq) às profundidades de 2 cm, 8 cm, 16 cm e 32 cm e à superfície de ambos os solos. A gama horária na qual ocorreram os máximos térmicos em ambos os solos é menos extensa que a gama na qual ocorreram os mínimos térmicos, provavelmente porque o sentido do fluxo de radiação

Quadro 4.4. Horas do dia em que ocorreram valores térmicos extremos (máximos, Mín, e mínimos, Mín) e duração dos períodos de aquecimento (Paq.), observados a várias profundidades e calculados pela análise harmônica, para dias-tipo ao longo do ano, definidos em função do comprimento do dia (C, curto; M, médio; L, longo) e do nível de humidade do solo (Hb, baixo; Hm, média; He, elevada):

(a) solo Pmg; (b) solo Cb. N : ocorrência de mais de um período de aquecimento

Solo	Prof. (cm)	Valores extremos (horas)	Harmônicas	C-Hm			M-Hm			M-He			L-Hm								
				Mín	Máx	PAQ.	Mín	Máx	PAQ.	Mín	Máx	PAQ.	Mín	Máx	PAQ.						
0	0	Calc.	1ª Harmônica	Medido	8	14	6	6	14	8	6	13	7	7	14	7	8	16	8		
				1ª Harmônica	2	14	12	2	14	12	2	14	12	3	3	15	12	4	16	12	
				1 e 2ª Har.	6	14	8	5	14	9	5	14	9	5	5	14	9	7	16	9	
				1ª, 2ª e 3ª har.	7	14	7	5	14	9	5	14	9	5	5	14	9	6	16	10	
2	2	Calc.	1ª Harmônica	Medido	7	14	7	4	14	10	5	14	9	5	14	9	6	16	10		
				1ª Harmônica	8	15	7	6	15	9	7	14	7	7	7	15	8	8	17	9	
				1 e 2ª Har.	4	16	12	4	16	12	4	16	12	4	4	16	12	6	18	12	
				1ª, 2ª e 3ª har.	7	15	8	6	15	9	6	15	9	6	6	15	9	8	17	9	
8	8	Calc.	1ª Harmônica	Medido	8	15	7	6	15	9	7	14	7	6	15	9	7	17	10		
				1ª Harmônica	8	15	7	6	15	9	6	14	8	6	6	15	9	8	17	9	
				1 e 2ª Har.	9	16	7	8	16	8	8	16	8	8	8	16	8	9	18	9	
				1ª, 2ª e 3ª har.	5	17	12	6	18	12	5	17	12	5	5	17	12	7	19	12	
16	16	Calc.	1ª Harmônica	Medido	8	16	8	8	16	8	7	16	9	8	16	8	9	18	9		
				1ª Harmônica	8	16	8	8	16	8	7	16	9	8	8	16	8	9	18	9	
				1 e 2ª Har.	8	16	8	8	16	8	7	16	9	8	8	16	8	9	18	9	
				1ª, 2ª e 3ª har.	8	16	8	7	16	9	7	16	9	8	8	16	8	9	18	10	
32	32	Calc.	1ª Harmônica	Medido	9	17	8	10	18	8	9	18	9	9	18	9	9	19	11		
				1ª Harmônica	7	19	12	8	20	12	7	19	12	8	8	20	12	9	21	12	
				1 e 2ª Har.	8	17	9	10	19	9	8	19	11	9	9	19	10	8	22	14	
				1ª, 2ª e 3ª har.	9	17	8	10	19	9	9	18	9	9	9	19	10	8	23	15	
32	32	Calc.	1ª Harmônica	Medido	9	17	8	10	19	9	9	18	9	9	19	10	8	23	15		
				1ª Harmônica	19	12	N	14	23/24	9/10	15	24	N	14	14	1	11	8	12	N	
				1 e 2ª Har.	11	23	12	14	2	12	24	12	12	14	14	2	12	12	19	7	12
				1ª, 2ª e 3ª har.	8	1	N	15	24	10	4	11	N	15	15	24	9	17	10/11	N	
32	32	Calc.	1ª Harmônica	Medido	8	1	N	15	23	10	4	11	N	15	1	10	7	12	N		
				1ª Harmônica	8	1	N	14	23	11	3	11	N	15	15	1	10	8	11	N	
				1 e 2ª Har.	8	1	N	14	23	11	3	11	N	15	15	1	10	8	11	N	
				1ª, 2ª e 3ª har.	8	1	N	14	23	11	3	11	N	15	15	1	10	8	11	N	

(a)

**DIA-TIPO**

Solo	Prof. (cm)	Valores extremos (horas)	C-Hm			M-Hm			M-He			L-Hm		
			Mín	Máx	PAQ.	Mín	Máx	PAQ.	Mín	Máx	PAQ.	Mín	Máx	PAQ.
		Medido	7	14	7	2	14	12	7	15	8	5	14	9
		1ª Harmónica	3	15	12	2	14	12	2	14	12	2	14	12
	0	Calc. 1 e 2ª Har.	6	14	8	5	14	8	6	14	8	4	14	10
		1ª, 2ª e 3ª har.	7	14	7	5	14	9	4	14	8	3	14	11
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	7	17	10	5	15	10	4	14	10	4	14	10
		Medido	9	16	7	7	16	9	7	15	8	8	16	10
		1ª Harmónica	5	17	12	4	16	12	4	16	12	4	16	12
	2	Calc. 1 e 2ª Har.	8	16	8	7	15	8	7	15	8	6	15	9
		1ª, 2ª e 3ª har.	9	16	7	7	15	8	6	15	9	6	15	9
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	9	16	7	6	15	9	6	15	9	5	15	10
		Medido	10	17	7	8	16	8	7	16	9	8	17	10
		1ª Harmónica	7	19	12	5	17	12	5	17	12	5	17	12
	8	Calc. 1 e 2ª Har.	9	17	8	7	16	9	7	16	9	4	16	12
		1ª, 2ª e 3ª har.	9	17	8	7	16	9	7	16	9	6	16	10
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	9	17	8	6	16	10	6	15	9	7	15	8
		Medido	14	1	11	20	11	15	20	14	18	20	12	10/11 13/14
		1ª Harmónica	12	24	12	23	11	12	1	13	12	1	13	12
	16	Calc. 1 e 2ª Har.	11	1	14	20	12	16	1	9	8	1	9	12
		1ª, 2ª e 3ª har.	11	24	13	20	12	16	1	9	8	1	10	11
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	11	24	13	20	11	15	1	10	9	1	11	14
		Medido	17	11	N	8	11	N	8	14	6	8	15	17
		1ª Harmónica	18	6	12	16	4	12	4	16	12	4	16	12
	32	Calc. 1 e 2ª Har.	18	2	N	18	1	N	6	14	8	7	14	16
		1ª, 2ª e 3ª har.	17	3	N	18	1	N	6	14	8	6	15	14
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	17	3	N	19	1	N	6	14	8	6	14	13

(b)



Quadro 4.5. Horas do dia em que ocorreram valores térmicos extremos (máximos, Mín, e mínimos, Mín) e duração dos períodos de aquecimento (PAq.), observados a várias profundidades e calculados pela análise harmônica, para dias-tipo ao longo do ano, definidos em função da nebulosidade (l, céu limpo; P, céu pouco nublado; M, céu muito nublado; N, céu encoberto): (a) solo Pmg; (b) solo Cb

Solo	Prof. (cm)	Valores extremos (horas)	DIA-TIPO													
			I			P			M			N				
			Mín	Máx	PAq.	Mín	Máx	PAq.	Mín	Máx	PAq.	Mín	Máx	PAq.		
0	Medido		6	13	7	3	14	11	6	14	8	3	15	12	12	
		1ª Harmônica	1	13	12	1	13	12	2	14	12	2	14	12	12	
		1 e 2ª Har.	1	17	16	2	14	12	2	17	15	1	17	16	16	
		1ª, 2ª e 3ª har.	1	17	16	2	14	12	2	17	15	1	16	15	15	
	Calc.	1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	1	18	17	2	14	12	2	18	16	1	14	13	13	
			7	15	8	3	16	13	7	15	8	4	16	12	12	
		1ª Harmônica	3	15	12	3	15	12	3	15	12	2	14	12	12	
		1 e 2ª Har.	6	15	9	4	16	12	6	15	9	5	15	10	10	
	2	Calc.	1ª, 2ª e 3ª har.	6	15	9	3	15	12	6	14	8	4	15	11	11
			1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	6	15	9	5	15	10	6	14	8	5	14	9	9
				8	16	8	4	17	13	8	16	8	5	16	11	11
			1ª Harmônica	5	17	12	4	16	12	4	16	12	4	16	12	12
8	Medido		7	16	9	5	17	12	7	16	9	6	16	10	10	
		1 e 2ª Har.	7	16	9	4	16	12	7	16	9	6	16	10	10	
		1ª, 2ª e 3ª har.	7	16	9	4	16	12	7	16	9	6	16	10	10	
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	6	16	10	5	15	10	7	16	9	5	15	10	10	
	Calc.		8	18	10	8	18	10	8	18	10	8	18	10	10	
		1ª Harmônica	8	20	12	7	19	12	7	19	12	7	19	12	12	
		1 e 2ª Har.	9	19	10	7	18	11	9	19	10	8	18	10	10	
		1ª, 2ª e 3ª har.	9	19	10	8	17	9	9	18	9	8	18	10	10	
	16	Calc.	1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	10	19	9	6	16	10	10	19	9	9	19	10	10
				8	18	10	8	18	10	8	18	10	8	18	10	10
			1ª Harmônica	8	20	12	7	19	12	7	19	12	7	19	12	12
			1 e 2ª Har.	9	19	10	7	18	11	9	19	10	8	18	10	10
32	Medido		9	19	10	8	17	9	9	18	9	8	18	10	10	
		1ª, 2ª e 3ª har.	10	19	9	6	16	10	10	19	9	9	19	10	10	
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	15	23	8	20	5	14	24	15	23	8	22	8	8	
		1ª Harmônica	12	24	12	24	12	12	23	11	23	12	13	1	12	
	Calc.	1 e 2ª Har.	11	3	8	3	10	11	14	22	11	11	3	16	16	
		1ª, 2ª e 3ª har.	11	3	8	23	11	14	21	14	11	11	4	17	17	
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	11	2	9	15	11	14	23	14	11	11	2	15	15	
			11	2	9	15	11	14	23	14	11	11	2	15	15	

(a)

Solo	Prof.	Valores extremos	Harmónicas	DIA-TIPO											
				I			P			M			N		
(cm)	(horas)	Mín	Máx	PAq.	Mín	Máx	PAq.	Mín	Máx	PAq.	Mín	Máx	PAq.		
0	Calc.	Medido	7	14	7	15	8	3	16	13	2	13	11		
		1ª Harmónica	2	14	12	14	12	2	14	12	3	15	12		
		1 e 2ª Har.	6	14	8	14	8	1	14	13	1	17	16		
		1ª, 2ª e 3ª har.	6	14	8	14	8	1	14	13	1	17	16		
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	5	14	9	14	7	1	14	13	1	16	15		
2	Calc.	Medido	8	16	8	15	8	8	16	8	3	13	10		
		1ª Harmónica	4	16	12	15	12	3	15	12	4	16	12		
		1 e 2ª Har.	6	15	9	15	8	7	15	8	2	18	16		
		1ª, 2ª e 3ª har.	7	15	8	15	8	7	15	8	2	19	17		
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	6	15	9	15	9	6	15	9	1	16	15		
Cb	Calc.	Medido	8	16	8	16	8	8	17	9	8	13	5		
		1ª Harmónica	5	17	12	16	12	4	16	12	5	17	12		
		1 e 2ª Har.	7	16	9	16	9	6	16	10	6	15	9		
		1ª, 2ª e 3ª har.	7	16	9	15	8	6	15	9	8	14	6		
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	6	15	9	15	9	5	15	10	7	15	8		
16	Calc.	Medido	21	12	15	20	12	16	21	14	1	13	12		
		1ª Harmónica	24	11	11	24	12	23	11	12	1	13	12		
		1 e 2ª Har.	1	9	8	1	7	1	9	8	1	16	15		
		1ª, 2ª e 3ª har.	1	10	9	1	7	1	9	8	1	14	13		
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	1	10	9	1	9	2	10	8	24	14	14		
32	Calc.	Medido	8	14	6	12	N	8	11	3	8	13	N		
		1ª Harmónica	4	16	12	16	4	12	3	15	12	19	7	12	
		1 e 2ª Har.	2	18	16	18	2	N	6	14	8	16	10	N	
		1ª, 2ª e 3ª har.	2	17	15	18	2	N	6	14	8	16	10	N	
		1ª, 2ª, 3ª e 4ª Har.	3	19	16	19	4	N	5	14	9	15	11	N	

líquida à superfície durante o período nocturno é mais sensível a perturbações meteorológicas na atmosfera (inversões térmicas, nebulosidade,...) ou a variações bruscas da humidade à superfície do solo (Oke, 1978; Rosemberg *et al.*, 1983; Monteith e Unsworth, 1990). Por exemplo, os máximos térmicos à superfície do solo Pmg ocorreram entre as 13 horas (dias M-Hm e I) e as 16 horas da tarde (dia L-Hm) enquanto os mínimos ocorreram entre as 3 horas (dias P e N) e as 8 horas da manhã (dias C-Hm e L-Hm); à superfície do solo Cb os máximos ocorreram entre as 13 horas (dia N) e as 16 horas (dia M) e os mínimos entre as 2 horas (dias M-Hm e N) e as 7 horas da manhã (dias C-Hm, M-Hb, M-He, I e P).

Atendendo à influência da insolação astronómica, do teor de água no solo, da nebulosidade e da profundidade do solo sobre a variação da contribuição relativa da 1ª harmónica para a variância total em torno da temperatura média diária (secção 4.2.1), é de esperar que o PAq medido cresça com o aumento da insolação astronómica em perfis com teores médios de humidade (por exemplo, o PAq medido a 2 cm variou entre 7 horas em dias curtos e 9-10 horas em dias longos) e que aumente em profundidade na maior parte dos ciclos diários considerados; que o PAq medido não varie significativamente em função da nebulosidade nem do teor de humidade do solo.

De uma forma geral, até 16 cm de profundidade do solo Pmg e até 8 cm de profundidade do solo Cb, a adição da 2ª harmónica aproximou (e fez coincidir nalguns casos) os PAq estimados dos medidos. Exceptuaram-se algumas situações no solo Pmg (dias I, P, M e N à superfície, dias P e N a 2 cm, dia P a 8 cm e dia L-Hm a 16 cm de profundidade) e no Solo Cb (dia N à superfície e a 2 cm, dia L-Hm a 8 cm) em que o PAq de 12 horas é o mais próximo do medido. Por outro lado, a sobreposição da 3ª e 4ª harmónicas não melhorou significativamente o ajustamento. A 16 cm de profundidade no solo Cb, os PAq estimados pela 1ª harmónica subestimaram os PAq medidos, excepto no dia C-Hm e no dia N; a adição da 2ª harmónica aproximou os PAq estimados dos medidos apenas nos dias M-Hb e L-Hm.

Os resultados indicam que a desigualdade entre períodos de aquecimento e de arrefecimento constitui o principal factor responsável pela assimetria das séries de valores medidos relativamente ao modelo sinusoidal simples (períodos de aquecimento/arrefecimento iguais a 12 horas) sendo esta simetria globalmente resolvida pela utilização conjunta das duas primeiras harmónicas de Fourier. Mostram também a assimetria diminuir em profundidade e com o aumento da insolação astronómica, o que explica o acréscimo da contribuição relativa da 1ª harmónica para a variação total de

temperatura nestas condições, e não parece ser influenciada pelo nível de nebulosidade nem pelo teor de água no solo.

#### **4.2.3. Amortecimento da onda térmica em profundidade**

O amortecimento na propagação da onda térmica em profundidade no solo é visível (Fig. 4.3), quer no progressivo atraso na ocorrência dos extremos térmicos à medida que a onda penetra no solo (desfasamento da onda), quer na redução progressiva das amplitudes térmicas a maiores profundidades.

##### **4.2.3.1. Atraso ou desfasamento de onda na ocorrência dos extremos térmicos ao longo do perfil**

O desfasamento de onda ao longo do perfil é quantificável pelo atraso na ocorrência dos extremos de temperatura ou pela variação da fase de onda em profundidade. Os primeiros são apresentados nos Quadros 4.4 e 4.5 para vários dias-tipo, e os ângulos de fase das 1ª e 2ª harmónicas ajustadas a cada profundidade são apresentados no Quadros 4.6, para os mesmos dias-tipo nos dois solos. Só os primeiros são aqui discutidos.

Os Quadros 4.4 e 4.5 mostram que até 8 cm de profundidade os atrasos medidos na ocorrência dos mínimos térmicos relativamente à superfície variaram entre 1 hora e 2 horas no solo Pmg e entre 1 hora e 6 horas no solo Cb, enquanto que os atrasos na ocorrência dos máximos variaram entre 1 e 3 horas em ambos os solos. Apenas no dia N no solo Cb o atraso na ocorrência do máximo térmico foi inferior a 1 hora. A 16 cm de profundidade no Pmg, os atrasos na ocorrência dos máximos térmicos variaram entre 3 horas (dias C-Hm, L-Hm e N) e 5 horas (dias M-Hm e I) e a 32 cm os extremos térmicos ocorreram fora de fase relativamente aos ocorridos nos 16 cm superficiais apenas nos dias C-Hm, L-Hm e P. Na maior parte dos dias-tipo no solo Cb, os extremos térmicos a 16 cm e a 32 cm de profundidade estiveram fora de fase relativamente a 2 e a 8 cm. Esta alteração do comportamento térmico ao longo do perfil do solo Cb (diminuição da velocidade de propagação da onda térmica entre 8 e 16 cm) foi independente do estado hídrico do solo, da época do ano ou da nebulosidade. A 32 cm de profundidade foram medidos máximos térmicos relativos nos dias C-Hm, M-Hm, L-Hm, P e M no solo Pmg e nos dias C-HM, M-Hb e P no solo Cb.

A influência dos vários factores (insolação astronómica, teor de humidade do solo e nebulosidade) na ocorrência dos extremos térmicos foi analisada apenas para os 8

cm superficiais porque a variação térmica diária nesta camada é simulada satisfatoriamente apenas com o auxílio das duas 1<sup>as</sup> harmónicas, isto é, não há alteração visível do comportamento térmico no seu interior (secção 4.2.1).

Em dias M (insolação astronómica intermédia) os atrasos dos máximos térmicos até 8 cm de profundidade parecem ter diminuído com o aumento de humidade no solo Cb enquanto que no solo Pmg foram aparentemente maiores para teores de humidade do solo intermédios: os máximos térmicos atrasaram-se 2 (dias M-Hb e M-He) a 3 horas (dia M-Hm) no solo Pmg e 1 (dia M-He) a 2 horas (dias M-Hb e M-Hm) no solo Cb; os mínimos térmicos atrasaram-se entre 1 (dia M-He) a 2 horas (dias M-Hb e M-Hm) no solo Pmg e entre 1 (dias M-Hb e M-He) e 5 horas (dia M-Hm) no solo Cb.

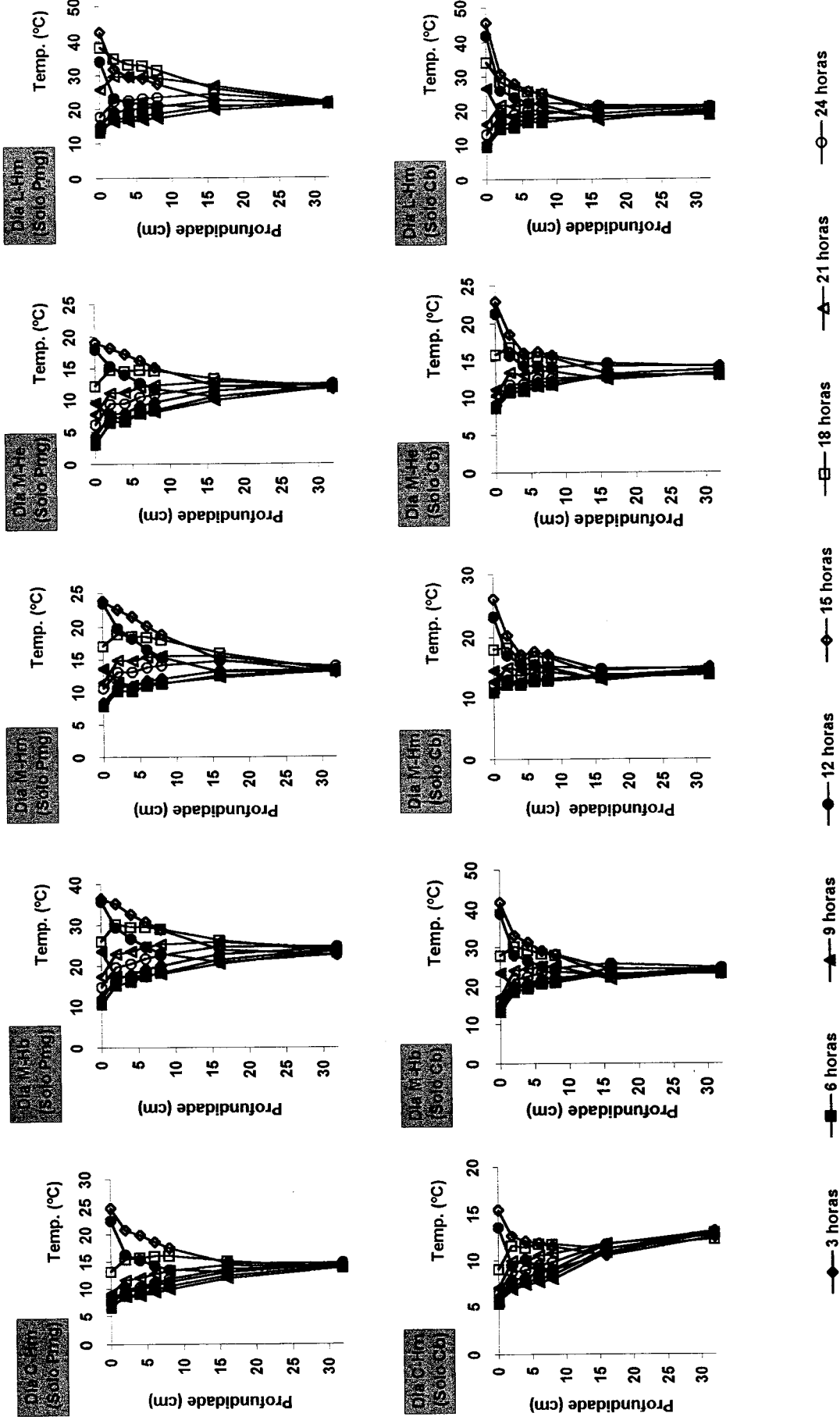
Em dias de humidade do solo intermédia, os atrasos dos máximos térmicos até 8 cm de profundidade não parecem depender do comprimento do dia: variaram entre 2 horas (dias C e L no solo Pmg e dia M no solo Cb) e 3 horas (dia M no solo Pmg e dias C e L no solo Cb). Os atrasos dos mínimos térmicos variaram entre 1 hora (dias C e L) a 2 horas (dia M) no solo Pmg e entre 2 horas (dia L) a 5 horas (dia M) no solo Cb.

Os atrasos dos máximos térmicos até 8 cm de profundidade diminuíram com o aumento da nebulosidade: variaram entre 1 hora (dia N) e 3 horas (dias P e I) no solo Pmg enquanto no solo Cb, ou ocorreram à mesma hora (dia N) ou se atrasaram 1 hora (dias P e M) a 2 horas (dia I). Os mínimos térmicos atrasaram-se entre 1 hora (dia P) a 2 horas (dias I, M e N) no solo Pmg e entre 1 hora (dias I e P) a 6 horas (dia N) no solo Cb.

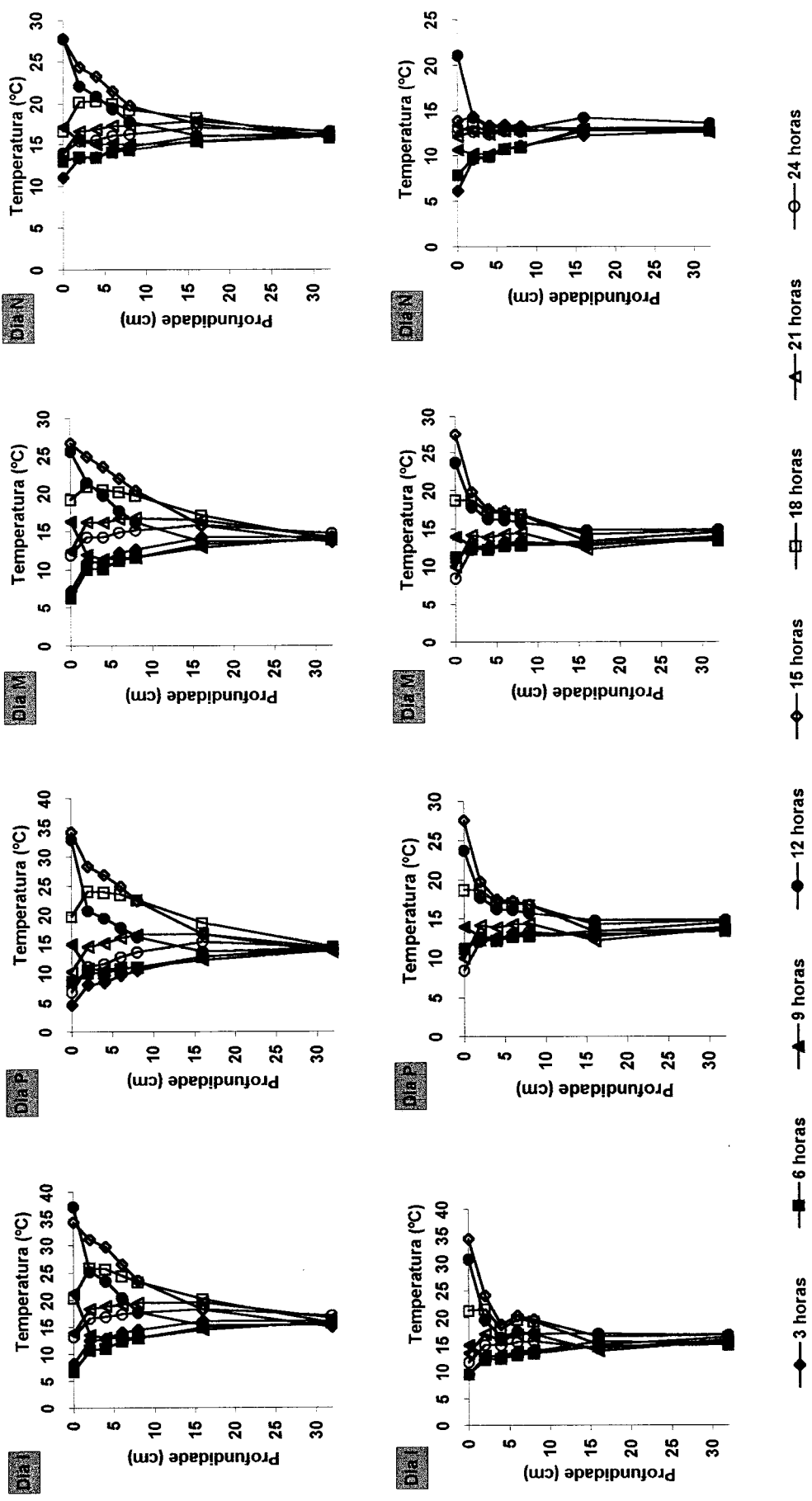
Os resultados mostram que os atrasos na propagação da onda térmica ao longo dos perfis do solo dependem do tipo de solo a partir de 16 cm de profundidade mas nos 8 cm superficiais é difícil distinguir qualquer efeito evidente causado quer pelo teor de humidade do solo, quer pelo comprimento do dia ou pela nebulosidade.

#### **4.2.3.2. Amplitudes térmicas**

A Figura 4.3 mostram as tautócronas referentes às médias horárias medidas às 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 e 24 horas ao longo dos perfis dos solos Pmg e Cb, em 8 ciclos diários (dias C-Hm, M-Hb, M-Hm, M-He, L-Hm, I, M e P). Em qualquer destes dias-tipo verificou-se que em ambos os solos as amplitudes térmicas decresceram com a profundidade, mais rapidamente à superfície que às profundidades maiores. Contudo, até 16 cm de profundidade o decréscimo das amplitudes é mais rápida no solo Cb que no solo Pmg, enquanto que de 16 a 32 cm é mais rápido no solo Pmg. Por exemplo, em



(a)



(b)  
 Fig. 4.3. Perfis térmicos (tautócronos) às horas indicadas nos solos Pmg e Cb em (a) 5 dias-tipo definidos em função da insolação astronômica (C, Curto; M, Médio; L, longo) e do nível de humidade do solo (Hb, baixo; Hm, médio; He, elevado) e em (b) 3 dias-tipo definidos em função do nível de nebulosidade (l, céu limpo; P, céu pouco nublado; M, céu muito nublado; N, céu encoberto)

dias Hm (teores de humidade intermédios) as amplitudes térmicas à superfície do solo Pmg atingiram 15-20°C nos dias C e M e 30°C no dia L, enquanto que à superfície do solo Cb foram de cerca de 10°C no dia C, de 15°C no dia M e de 35°C no dia L; a 16 cm do solo Pmg as amplitudes atingiram 3-4°C nos dias C e M e 6°C no dia L, enquanto que no solo Cb foram de cerca de 1,5°C no dia C, 2,5°C no dia M e 4°C no dia L; a 32 cm de profundidade, as amplitudes térmicas diárias foram mínimas nos dois solos (em geral, menores que 1,5°C) mas sistematicamente maiores no solo Cb que no solo Pmg. De uma forma geral, tanto em dias próximos dos equinócios (dias M) como em dias L e C, as amplitudes térmicas diárias nos 16 cm superficiais diminuíram à medida que o teor de água em ambos os solos e a nebulosidade aumentaram.

As amplitudes térmicas diárias à profundidade de 2 a 4 cm foram maiores no solo Pmg que no solo Cb, atingindo valores consideráveis quando o teor de água no solo e/ou o grau de nebulosidade foram baixos (Fig. 4.3). Em dias M (próximos das épocas normais de sementeira) as amplitudes no solo Pmg atingiram cerca de 12°C nos dias M-Hm, M-He e N e cerca de 20°C nos dias M-Hb, I e P; no solo Cb, variaram entre 5,0°C e 8°C nos dias M-Hm e M-He, N, M e I e foram superiores a 15°C no dia M-Hb. Em dias L (sementeiras tardias de algumas culturas de Primavera-Verão) as amplitudes térmicas na camada 2 - 4 cm foram de 6,8°C, 20°C e 23°C em condições de humidade do solo Pmg, respectivamente elevada, média e baixa, enquanto que no solo Cb, nas mesmas condições, foram de 8°C, 16°C e 22°C. Em dias C (sementeiras tardias de algumas culturas outono-invernais), as amplitudes no solo Pmg foram de 5°C e de cerca de 11-12°C quando a humidade do solo diminuiu, e de 2°C, 6°C e 11°C no solo Cb. Os resultados referidos para os dias C e L em condições de humidade diferentes da média estão representados no ANEXO I.

A meio do dia, registaram-se gradientes térmicos consideráveis ao longo da espessura de solo onde se encontra o sistema radical das culturas em fase de estabelecimento (até cerca de 8 cm de profundidade), nomeadamente em dias L ou em dias M quando a humidade do solo foi baixa (Hb): a meio do dia M-Hb as diferenças de temperatura média horária na camada ultrapassaram 8°C e 13°C, respectivamente nos solos Pmg e Cb, enquanto no dia L-Hm atingiram, respectivamente, 13°C e 22°C. Para teores de humidade superiores (Hm e He), as diferenças nos dias M variaram entre cerca de 4°C e 7°C no solo Pmg e entre 7°C e 9°C no solo Cb.

A redução das amplitudes térmicas em profundidade foi também simulada através das semi-amplitudes (C) relativas às duas primeiras harmónicas obtidas a partir



da equação (2.25) e apresentados nos Quadros 4.6. As semi-amplitudes estimadas decresceram consideravelmente entre a 1ª e a 2ª harmónica e, para cada harmónica, entre a superfície do solo e 32 cm de profundidade. Às profundidades maiores o decréscimo foi mais lento que às profundidades menores.

Os resultados mostram que o tipo de solo condiciona as amplitudes térmicas ao longo do perfil, nomeadamente nos centímetros superficiais, afectando a profundidade de penetração efectiva das ondas térmicas (Peixoto, 1992), e que as amplitudes térmicas diárias diminuem em profundidade e com os aumentos do teor de humidade do solo e do grau de nebulosidade. Além disso, as amplitudes térmicas aumentaram com o comprimento do dia.

#### **4.2.4. Profundidade de amortecimento no ciclo diário**

O amortecimento da onda térmica ao longo do perfil de um solo é geralmente caracterizado pela profundidade de amortecimento ( $D$ ). Esta profundidade foi estimada para cada solo a partir das amplitudes térmicas medidas e a partir das amplitudes térmicas simuladas na análise harmónica

##### **4.2.4.1. Profundidade de amortecimento a partir das amplitudes térmicas medidas**

Para o ciclo diário foram estimados valores de  $D$  a partir das amplitudes térmicas medidas,  $D_m$  (cm), em 86 dias no solo Pmg e 101 dias no solo Cb. A profundidade de amortecimento foi calculada para os PT1 e PT2 com o objectivo de avaliar a influência das medições à superfície e também para um perfil térmico (PT3) que compreende as medições de temperatura apenas a 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm e 16 cm de profundidade, porque anteriormente se mostrou que o comportamento térmico entre a superfície de ambos os solos e 32 cm de profundidade não foi igual em toda a sua extensão, sobretudo no solo Cb.

Uma condição fundamental para a representatividade de  $D$  (equação 2.25) é o decréscimo exponencial das amplitudes térmicas com a profundidade  $z$ , de tal forma que  $D$  é o inverso da relação linear entre o logaritmo das amplitudes e  $z$ . Os valores de  $D_m$  para os 187 dias e a significância estatística das respectivas regressões lineares são apresentadas no ANEXO J. Todas as regressões foram significativas para um nível de probabilidade de 95%. O nível de significância das regressões foi independente do tipo de solo e do seu teor de humidade, da altura do ano (insolação astronómica ou do grau

**Quadro 4.6. Semi-amplitudes (C, em °C) e ângulo de fase ( $\pi$  radianos) das duas primeiras harmônicas ajustadas à variação da temperatura a várias profundidades nos solos Pmg e Cb, em dias-tipo ao longo do ano definidos em função: a) do comprimento do dia (C, curto; M, médio; L, longo) e do nível de humidade do solo (Hb, baixo; Hm, média; He, elevada); (b) da nebulosidade (l, céu limpo; P, céu pouco nublado; M, céu muito nublado; N, céu encoberto).**

Prof.	Coef.	Solo Pmg												Solo Cb																							
		C-Hm						M-Hm						L-Hm						C-Hm						M-Hm						L-Hm					
		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas		Harmônicas							
1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª	1ª	2ª								
0 cm		8,4	4,4	12,8	4,4	7,9	2,8	7,5	2,7	14,9	4,6	4,3	2,3	14,0	5,7	7,3	2,9	6,8	3,0	18,8	5,0																
	Âng.fase	1,22	1,16	1,23	1,54	1,19	1,44	1,15	1,46	0,75	0,46	1,09	1,03	1,27	1,25	1,20	1,03	1,20	0,98	1,23	1,22																
2 cm		5,3	2,6	9,1	3,0	5,8	1,9	5,3	2,0	9,1	2,2	2,5	1,0	6,8	2,3	3,8	1,2	3,6	1,4	7,8	1,7																
	Âng.fase	0,89	0,72	0,81	0,85	0,86	1,02	0,80	1,00	0,28	-0,33	0,45	0,32	0,76	0,68	0,78	0,57	0,76	0,53	0,79	0,73																
4 cm		4,7	2,2	7,6	2,4	5,3	1,6	4,8	1,7	8,0	1,8	2,2	0,8	5,6	1,9	2,4	0,6	2,4	0,8	6,2	1,3																
	Âng.fase	0,81	0,62	0,68	0,68	0,77	0,89	0,71	0,87	0,17	-0,54	0,50	0,46	0,66	0,61	0,70	0,83	0,68	0,59	0,73	0,71																
6 cm		3,9	1,8	6,4	1,9	4,3	1,2	3,9	1,3	7,6	1,7	2,0	0,7	4,1	1,2	2,3	0,6	2,2	0,8	4,6	0,7																
	Âng.fase	0,69	0,47	0,51	0,44	0,63	0,65	0,55	0,62	0,13	-0,63	0,25	0,07	0,52	0,47	0,64	0,51	0,62	0,45	0,58	0,45																
8 cm		3,2	1,4	5,5	1,4	3,7	1,0	3,3	1,1	6,7	1,4	1,8	0,6	3,6	1,0	2,0	0,5	2,0	0,7	4,2	0,6																
	Âng.fase	0,55	0,32	0,34	0,20	0,49	0,46	0,40	0,43	0,04	-0,78	0,10	-0,10	0,43	0,46	0,58	0,47	0,56	0,41	0,60	0,64																
16 cm		1,4	0,4	2,9	0,5	1,8	0,2	1,6	0,3	3,5	0,6	0,7	0,1	1,6	1,0	0,8	0,4	0,9	0,5	1,9	0,6																
	Âng.fase	0,05	0,08	-0,38	-0,91	-0,08	-0,66	-0,27	-0,44	-0,44	1,51	-1,36	0,31	-1,01	-1,43	-1,46	1,40	-1,48	1,25	-1,35	-1,25																
32 cm		0,2	0,4	1,0	0,2	0,3	0,2	0,4	0,1	0,04	0,1	0,3	0,2	0,3	0,6	0,5	0,3	0,5	0,3	1,1	0,4																
	Âng.fase	-0,97	1,34	4,51	3,32	1,89	2,66	4,56	2,64	3,23	2,74	3,49	1,98	4,04	1,81	0,79	1,45	4,03	4,33	0,99	-0,92																

(a)

		Solo Pmg										Solo Cb									
Prof.	Coef.	DIAS-TIPO																			
		I		P		M		N		I		P		M		N					
		Harmónicas 1ª	Harmónicas 2ª	Harmónicas 1ª	Harmónicas 2ª	Harmónicas 1ª	Harmónicas 2ª	Harmónicas 1ª	Harmónicas 2ª	Harmónicas 1ª	Harmónicas 2ª	Harmónicas 1ª	Harmónicas 2ª	Harmónicas 1ª	Harmónicas 2ª	Harmónicas 1ª	Harmónicas 2ª				
0 cm	C	11,8	4,9	6,4	3,4	8,4	3,7	4,9	2,5	14,2	6,2	14,6	1,5	9,8	3,0	7,5	3,0				
	Áng.fase	1,18	1,15	1,38	1,12	1,31	0,71	1,13	-0,76	1,28	-1,47	1,32	1,34	1,13	-1,50	1,40	-1,54				
2 cm	C	5,7	1,7	3,3	1,4	4,0	1,5	2,5	0,8	9,3	3,2	9,3	0,9	7,0	2,1	5,3	1,5				
	Áng.fase	0,73	0,60	0,92	0,68	0,92	0,40	0,70	-1,42	0,81	0,98	0,87	0,24	0,81	1,11	0,97	0,96				
4 cm	C	-	-	-	-	2,8	0,9	1,9	0,6	8,5	2,7	8,7	0,8	6,3	1,8	4,9	1,3				
	Áng.fase	-	-	-	-	0,88	0,44	0,60	-1,42	0,72	0,87	0,80	0,17	0,73	0,97	0,89	0,84				
6 cm	C	3,6	0,9	2,1	0,7	2,5	0,8	1,5	0,5	6,6	2,0	7,4	0,7	5,1	1,4	3,7	0,9				
	Áng.fase	0,60	0,53	0,77	0,61	0,82	0,41	0,54	-1,51	0,58	0,64	0,69	0,01	0,58	0,70	0,76	0,65				
8 cm	C	3,2	0,7	1,9	0,6	2,2	0,7	1,3	0,5	5,3	1,4	6,3	0,5	4,4	1,1	2,8	0,6				
	Áng.fase	0,55	0,48	0,70	0,57	0,76	0,39	0,46	1,55	0,38	0,35	0,56	-0,15	0,44	0,49	0,61	0,50				
16 cm	C	1,4	0,6	0,7	0,5	1,0	0,5	0,7	0,3	2,9	0,4	2,9	0,2	2,1	0,3	1,5	0,2				
	Áng.fase	-1,39	1,41	-1,29	1,56	-1,39	1,23	1,53	-0,70	-0,17	-0,82	0,11	-0,28	-0,17	-0,58	0,00	-0,74				
32 cm	C	0,8	0,4	0,5	0,3	0,7	0,3	0,2	0,3	0,7	0,4	0,1	0,1	0,4	0,2	0,4	0,2				
	Áng.fase	4,03	1,58	3,94	1,71	1,01	1,32	1,06	-1,29	-1,36	-0,01	1,94	3,39	5,25	3,43	-1,53	-0,16				

(b)

de nebulosidade. Por consequência, é admissível que as amplitudes térmicas decrescem exponencialmente com a profundidade, sendo  $D$  um parâmetro representativo do amortecimento da onda térmica facilmente integrável em soluções analíticas globais da oscilação harmónica da temperatura à superfície do solo e sua propagação em profundidade (De Vries, 1975; Monteith, 1977; Buchan, 1982; Campbell, 1987; Hillel, 1998).

De uma forma sistemática, o nível de significância das regressões foi maior nos PT3 que nos perfis PT1 e PT2. Por exemplo, no solo Pmg os valores de  $R^2$  foram superiores a 0,78 em PT1, a 0,75 em PT2 e a 0,95 em PT3, enquanto que no solo Cb foram superiores a 0,76 em PT1 e PT2 e 0,79 em PT3. Este comportamento é provavelmente devido à qualidade das medições à superfície do solo (em PT1) e a diferenças no comportamento térmico em profundidade (entre PT2 e PT3).

Os valores de  $D_m$  (ANEXO J) variaram no solo Pmg entre 9 cm e 23,4 cm em PT1, entre 9 cm e 28,5 cm em PT2 e entre 7,2 cm e 16,4 cm em PT3; no solo Cb,  $D_m$  variou entre 9,8 cm e 18,9 cm em PT1, entre 10,8 cm e 23,5 cm em PT2 e entre 6,8 cm e 14,9 cm em PT3. As estimativas referentes ao PT3 são compatíveis com a gama de valores referida por van Wijk e de Vries (1963), de Vries (1975), Buchan (1982), Monteith e Unsworth (1990) e Hillel (1998), enquanto que as obtidas em PT1 e PT2 são visivelmente superiores a essa gama, respectivamente em 6 e 12 dias no solo Pmg e em 4 e 18 dias no solo Cb. De uma forma geral, os valores de  $D_m$  foram maiores em PT2 que em PT1 ou em PT3. Os diferentes valores de  $D_m$  em PT1 e PT2 sugerem que a medição da temperatura à superfície de cada solo sobrestima a temperatura real na maior parte dos dias analisados, enquanto as diferenças obtidas entre PT2 e PT3 indicam que a velocidade de propagação da onda térmica é menor até 16 cm de profundidade em ambos os solos e maior na camada subjacente, ou seja, que a difusividade térmica varia ao longo do perfil.

A gama de valores de  $D_m$  em cada solo e perfil sugere que é influenciada por outros factores. Por isso, foi também analisada a variação de  $D_m$  com a época do ano (insolação astronómica), com a nebulosidade, com o teor médio de humidade do solo e com o sentido predominante do gradiente de humidade ao longo do perfil. Só se utilizaram valores de  $D_m$  de perfis PT3 para evitar os problemas referidos nos PT1 e PT2.

#### **4.2.4.2. Influência da insolação astronómica e da nebulosidade na profundidade de amortecimento**

O Quadro 4.7 mostra os valores de  $D_m$  diários dos PT3 nos solos Pmg e Cb, para os dias-tipo curtos (C-Hb, C-Hm e C-He), longos (L-Hb, L-Hm e L-He) e de comprimento médio (M-Hb, M-Hm e M-He) e para os dias I, P, M e N. No solo Pmg, as diferenças entre as estimativas de  $D_m$  entre os dias C, M e L foram mínimas quando o teor de água no solo foi baixo, atingiram 4,2 cm em dias Hm e 3,7 cm em dias He; nos dias I, P, M e N a diferença atingiu 2,0 cm. No solo Cb, as diferenças de  $D_m$  entre dias C, M e L foram de 3,8 cm quando a humidade do solo foi baixa e de 2,4 cm nos dias He, enquanto que nos dias Hm foram mínimas; nos dias I, P, M e N,  $D_m$  variou entre 11,1 cm e 13,8 cm.

Em qualquer caso, as diferenças entre as  $D_m$  não foram significativas para um nível de probabilidade de 95% (Modelo de Regressão Múltipla). Por isso, a insolação astronómica e o nível de nebulosidade não podem ser considerados factores relevantes na gama de variação da profundidade de amortecimento.

#### **4.2.4.3. Influência do teor de humidade nos solos Pmg e Cb na profundidade de amortecimento**

Para analisar a influência do teor de humidade do solo na variação da profundidade de amortecimento ( $D_m$ ), estimada nos PT3 de ambos os solos, os dias foram classificados de acordo com o teor médio diário de humidade nos 25 cm superficiais. Definiram-se oito classes no solo Pmg, (An, A1...A8) e 10 classes no solo Cb (Bn, B1...B10); cada classe contém 20 elementos (o Quadro 4.8 mostra os valores médios diários de  $D_m$  e do teor de humidade do solo e respectivos desvios-padrão) e é caracterizada pelos valores médios dos elementos constituintes. Além disso, e no pressuposto que o padrão de distribuição de humidade ao longo do perfil de solo poderia afectar o amortecimento da onda térmica (ver Materiais e Métodos), os dias acima indicados foram, sempre que possível, reagrupados em classes do mesmo tipo, mas tendo em conta se o teor de humidade do solo aumentava ou não com a profundidade (perfil em fase de secagem, S), se diminuía em profundidade (perfil em fase de humedecimento, H) ou se se mantinha aproximadamente constante em profundidade (perfil uniforme, U). Foram definidas quatro classes de S, 4 de H e 8 de U no solo Pmg e 8 de S, 3 de H e 5 de U no solo Cb. As classes definidas no solo Pmg contém 5; as definidas no solo Cb contém 6 elementos. De acordo com o proposto por

**Quadro 4.7. Profundidades de amortecimento (em cm) da onda térmica nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa) em 13 dias-tipo: (a) 3 dias curtos (C-Humidade baixa, C-Humidade média, C-Humidade elevada), 3 dias longos (L-Hb, L-Hm, L-He) e 3 dias próximos dos equinócios (M-Hb, M-Hm, M-He); (b) quatro dias representativos de níveis diferentes de nebulosidade (dias I, céu limpo, P, céu pouco nublado, M, céu muito nublado e N, céu encoberto). NS – não significativo para uma probabilidade de 95%**

Insolação astronómica (Dias-Tipo)	Solos					
	Pmg			Cb		
	Hb	Hm	He	Hb	Hm	He
C	NS	10,4	11,2	11,0	10,2	12,1
M	11,4	11,2	10,9	12,7	10,9	12,1
L	11,3	14,6	14,6	8,9	10,8	9,7

(a)

Solos	Nebulosidade (Dias-tipo)			
	I	P	M	N
Pmg	10,8	11,8	10,9	9,8
Cb	11,1	11,4	13,8	NS

(b)

**Quadro 4.8. Valores médios e desvios-padrão (DP) da profundidade de amortecimento e dos teores de água das classes definidas nos solos Pmg e Cb**

Cada classe compreende 20 medições

Solos	Classes	Teor de água no solo		Profundidade de amortecimento	
		Média	DP	Média	DP
		(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )		(cm)	
Pmg	A1	0,077	0,022	10,3	1,1
	A2	0,115	0,005	11,2	1,7
	A3	0,141	0,009	11,7	1,0
	A4	0,183	0,014	11,5	2,3
	A5	0,216	0,007	11,2	1,4
	A6	0,235	0,006	11,2	1,6
	A7	0,256	0,008	11,2	2,0
	A8	0,292	0,014	11,1	2,0
Cb	B1	0,170	0,014	8,6	1,0
	B2	0,235	0,026	8,8	1,5
	B3	0,292	0,009	10,7	1,6
	B4	0,328	0,010	11,0	1,5
	B5	0,353	0,009	11,1	1,8
	B6	0,387	0,009	10,6	1,8
	B7	0,411	0,006	9,7	1,8
	B8	0,427	0,005	9,7	2,2
	B9	0,446	0,007	9,2	1,0
	B10	0,485	0,017	10,4	2,2

Stringer (1972), o número de classes não excedeu o quántuplo do logaritmo do número de observações.

Os teores de humidade e os valores de  $D_m$  dos dias constituintes das classes em perfis S, H e U estão apresentados no ANEXO J (86 dias no solo Pmg e 101 no Cb) e o dos restantes dias que não apresentam perfis tipo S, H ou U mas que também fazem parte das classes An e Bn, estão no ANEXO K (74 dias no solo Pmg e 99 no Cb). As características de cada classe estão sumariadas no Quadro 4.9 através dos valores da profundidade de amortecimento (médias e desvios-padrão) e do teor de humidade (médias e desvios-padrão) Em ambos os solos, as classes consideradas correm numa gama de teores de humidade do solo desde valores inferiores ao Coeficiente de Emurchecimento (C.E.) até valores superiores à Capacidade de Campo (C.C.).

**a) para qualquer padrão de distribuição de humidade ao longo do perfil**

A Fig. 4.4 apresenta a variação da profundidade de amortecimento ( $D_m$ ) com o teor médio de humidade do solo, para as classes An e Bn, definidos respectivamente nos solos Pmg e Cb. Os valores mais elevados de  $D_m$  corresponderam a teores de humidade intermédios da Capacidade Utilizável de cada solo (cerca de  $0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  no solo Pmg e de  $0,35 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  no solo Cb). Para teores de humidade inferiores a cerca de  $0,29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , os valores de  $D_m$  no solo Pmg parecem ser diferentes dos que foram obtidos no solo Cb. O Quadro 4.10 apresenta o significado estatístico das diferenças entre os valores de  $D_m$ , para um nível de probabilidade de 95% (testes de significância t de Student à igualdade entre médias dos valores de  $D_m$  de cada classe). Para teores de humidade próximos de  $0,29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  os valores de  $D_m$  no solo Pmg não foram significativamente diferentes dos obtidos no solo Cb; para teores de humidade inferiores a  $0,29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , os valores de  $D_m$  foram significativamente maiores no solo Pmg.

No solo Pmg, a profundidade de amortecimento aumentou de 10,3 cm para 11,7 cm enquanto o teor médio de humidade variou entre  $0,08 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e  $0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e diminuiu 0,6 cm enquanto o teor médio de humidade variou entre  $0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e  $0,29 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Entre A1 e A3 o aumento foi estatisticamente significativo para uma probabilidade de 95%, enquanto o decréscimo entre A3 e A8 não foi estatisticamente significativo para o mesmo nível de probabilidade. A média dos valores de  $D_m$  obtidos para teores de água superiores a  $0,14 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  foi de  $11,2 \pm 1,8$  cm; o intervalo de confiança respectivo para  $\alpha=0,05$  situou-se entre 10,9 cm e 11,6 cm. No solo Cb, a variação da profundidade de amortecimento não foi estatisticamente significativa até



**Quadro 4.9. Testes t de Student à igualdade dos valores medidos da profundidade de amortecimento ( $D_m$ ) em pares de classes com variâncias desiguais, para  $\alpha = 0,05$ ; A1...A8, classes no solo Pmg; B1...B10, classes no solo Cb.**

<b>Classes</b>	<b>t - Student</b>	<b>t crítico (<math>\alpha=0,05</math>) (intervalo)</b>		<b>Igualdade de médias</b>
A1 - A3	-4,088	<-2,024	>2,024	rejeitada
A3 - A6	1,227	<-2,035	>2,035	aceite
A3 - A8	1,281	<-2,045	>2,045	aceite
B1 - B2	-0,531	<-2,032	>2,032	aceite
B2 - B3	-4,000	<-2,024	>2,024	rejeitada
B1 - B5	-5,284	<-2,042	>2,042	rejeitada
B5 - B7	3,387	<-2,024	>2,024	rejeitada
B3 - B6	0,250	<-2,024	>2,024	aceite
B3 - B7	1,910	<-2,024	>2,024	aceite
B5 - B9	4,090	<-2,045	>2,045	rejeitada
B9 - B10	-2,388	<-2,056	>2,056	rejeitada
A4 - B1	5,387	<-2,045	>2,045	rejeitada
A6 - B2	5,184	<-2,023	>2,023	rejeitada
A8 - B3	0,536	<-2,026	>2,026	aceite

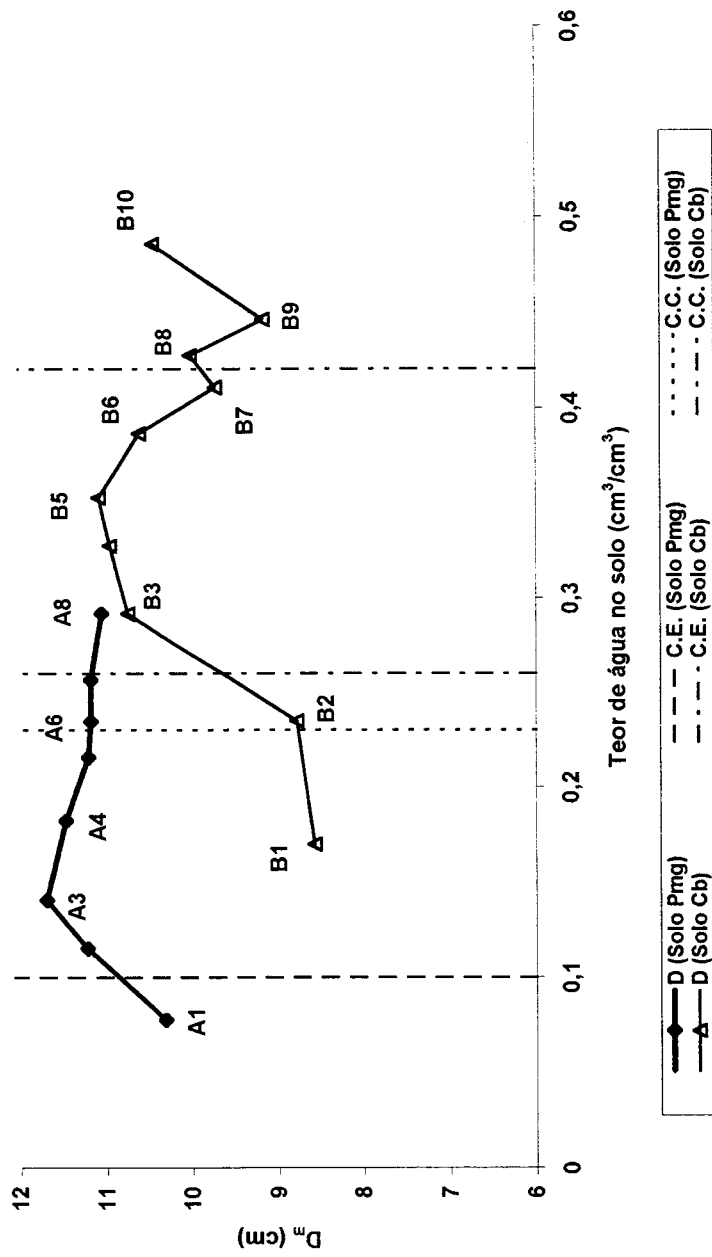


Fig. 4.4. Profundidade de amortecimento em função do teor médio de água nos solos Pmg e Cb  
 A1..A8 e B1..B10 são classes de dados relativos aos solos Pmg e Cb, respectivamente  
 C.E. - Coeficiente de Emurchecimento; C.C. - Capacidade de Campo

**Quadro 4.10. Profundidade de amortecimento (média, respectivos desvios-padrão e intervalos de confiança para um nível de probabilidade de 95%) em função do teor de água no solo em perfis U, H e S**

Cada classe compreende 5 medições no solo Pmg e 6 medições no solo Cb

Perfil	Classes	Teor de água no solo		Profundidade de amortecimento	
		Média	DP	Média	DP
		(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )		(cm)	
U	U1	0,080	0,038	11,4	3,0
	U2	0,119	0,006	10,5	0,8
	U3	0,143	0,007	11,4	1,0
	U4	0,166	0,014	11,1	1,2
	U5	0,199	0,012	10,6	2,3
	U6	0,225	0,004	10,8	1,1
	U7	0,237	0,006	11,5	2,0
	U8	0,266	0,010	12,2	2,9
H	H1	0,151	0,024	11,2	0,2
	H2	0,236	0,022	10,7	1,4
	H3	0,272	0,010	9,6	1,1
	H4	0,300	0,009	9,3	1,0
S	S1	0,083	0,008	10,3	1,0
	S2	0,101	0,007	10,2	2,2
	S3	0,150	0,038	11,8	1,7
	S4	0,225	0,024	12,8	1,5

(a)

Perfil	Classes	Teor de água no solo		Profundidade de amortecimento	
		Média	DP	Média	DP
		(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )		(cm)	
U	U1	0,238	0,097	9,7	2,0
	U2	0,412	0,018	9,8	1,0
	U3	0,433	0,004	10,2	1,2
	U4	0,445	0,003	8,7	0,8
	U5	0,483	0,020	10,7	2,3
H	H1	0,332	0,032	12,4	1,7
	H2	0,421	0,013	10,8	2,2
	H3	0,473	0,031	9,7	1,2
S	S1	0,159	0,013	8,9	1,4
	S2	0,190	0,006	8,8	0,8
	S3	0,212	0,011	8,2	0,8
	S4	0,260	0,011	9,2	0,5
	S5	0,285	0,005	9,9	1,2
	S6	0,306	0,015	9,4	0,6
	S7	0,366	0,020	10,6	1,1
	S8	0,417	0,030	11,6	1,7

(b)  
206

0,24 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> de teor de água no solo (8,7±1,3 cm) nem entre 0,33 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> e 0,39 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> (10,8±1,7 cm); ao invés, D<sub>m</sub> aumentou significativamente de 8,8 cm para 11,1 cm enquanto o teor de humidade do solo variou entre 0,24 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> e 0,33 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, decresceu para 9,2 cm a 0,45 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> e voltou a aumentar para valores superiores a 0,45 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>. A variação de D<sub>m</sub> em função do teor médio de água no solo Pmg é compatível com a apresentada por Monteith e Unsworth (1990) para gamas de humidade comparáveis; no solo Cb, o acréscimo de D<sub>m</sub> foi significativo apenas para valores superiores a 0,25 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, enquanto que estes autores indicam acréscimos significativos para teores de humidade de cerca de 0,20 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>.

Estes resultados mostram que a profundidade de amortecimento varia em função do teor médio de humidade do solo e do tipo de solo: D<sub>m</sub> aumentou significativamente entre 0,08 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> e 0,14 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> no solo Pmg e entre 0,24 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> e 0,33 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> no solo Cb; para teores de humidade inferiores a 0,29 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>, D<sub>m</sub> é significativamente diferente nos dois solos.

O amortecimento da onda térmica em profundidade depende do teor de água no solo porque as difusividades térmicas do ar e da água são diferentes (de Vries, 1975; Buchan, 1982; Monteith e Unsworth, 1990).

#### **b) para perfis U, H e S**

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam a variação da profundidade de amortecimento (D<sub>m</sub>) com o teor médio de humidade do solo, para as classes Un, Sn e Hn, definidas respectivamente nos solos Pmg e Cb. O Quadro 4.11 mostra os resultados dos testes de significância (t Student) para α=0,05, sobre a igualdade entre médias dos valores de D<sub>m</sub> correspondentes a cada classe, para ambos os solos.

No solo Pmg (Fig. 4.5), a variação da profundidade de amortecimento com o teor médio de humidade do solo foi visivelmente diferente consoante a distribuição da humidade ao longo do perfil. A variação de D<sub>m</sub> não foi estatisticamente significativa (Quadro 4.11) entre 0,08 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> (U1) e 0,27 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> (U8); neste intervalo, o valor médio de D<sub>m</sub> foi 11,2±0,55 cm. Em perfis H, D<sub>m</sub> diminuiu significativamente de 11,2 cm para 9,3 cm quando a humidade do solo variou entre 0,15 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> e 0,3 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>. Em perfis S a profundidade de amortecimento aumentou significativamente de 10,2 cm para 12,8 cm entre a C.E. (S2) e a C.C. (S4). Para teores de humidade do solo inferiores a C.E. ou superiores à C.C. os valores de D<sub>m</sub> estimados em perfis U foram maiores que os valores de D<sub>m</sub> estimados para os restantes perfis. Contudo, para teores de humidade

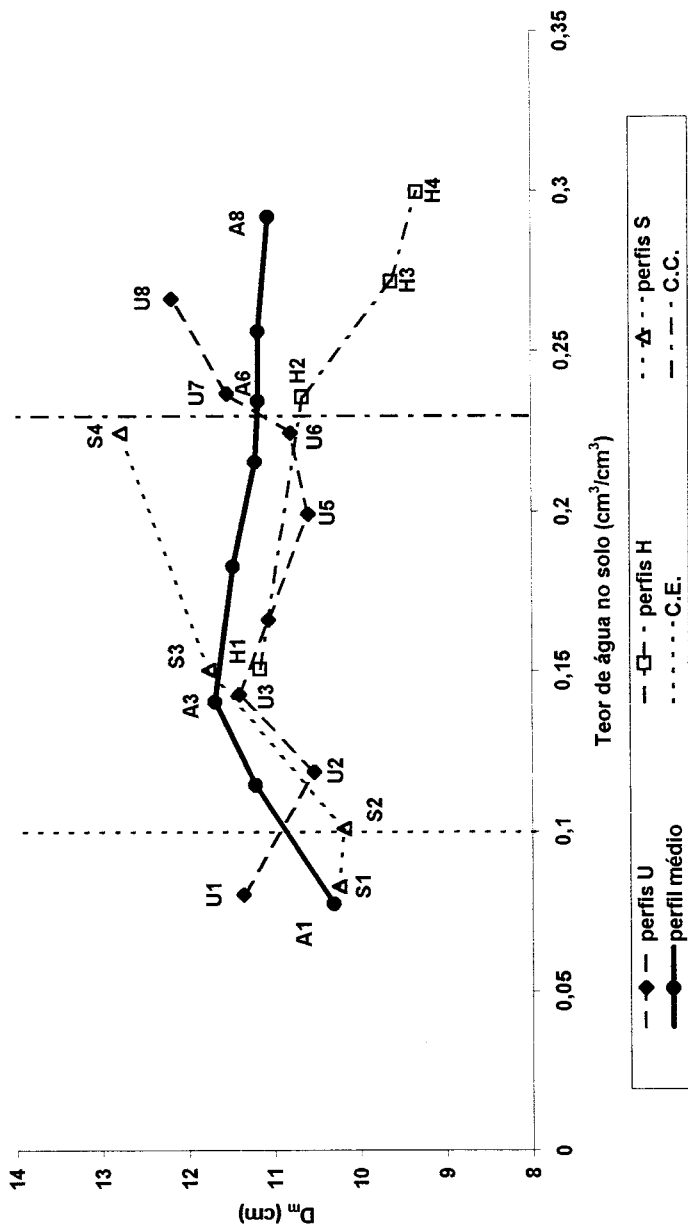


Fig. 4.5. Profundidade de amortecimento ( $D_m$ ) em função do teor médio de água do solo Pmg em perfis U, H e S U1..U8, H1..H4 e S1..S4 são classes de dados relativos a perfis U, H e S, respectivamente; A1..A8 são as classes representadas na Fig.3.3. C.E. - Coeficiente de emurhecimento; C.C. - Capacidade de Campo

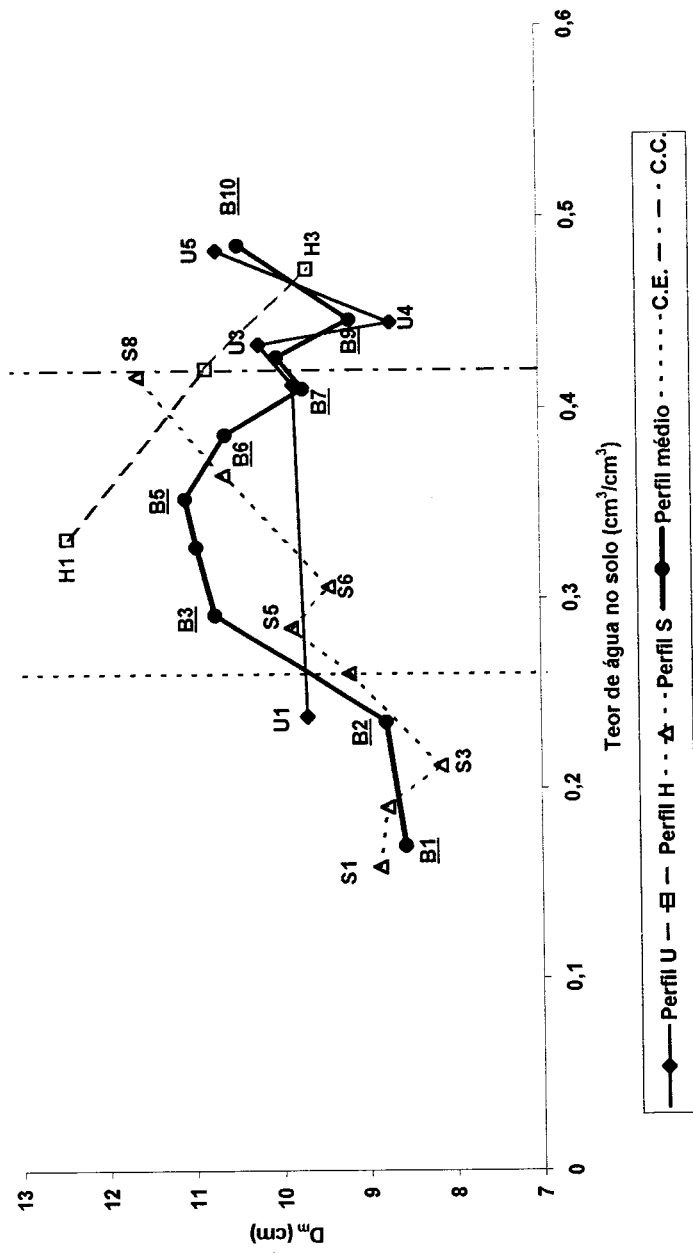


Fig. 4.6. Profundidade de amortecimento ( $D_m$ ) em função do teor médio de água do solo Cb em perfis U, H e S  
 U1..U5, H1..H3 e S1..S8 são classes de dados relativos a perfis U, H e S, respectivamente; B1..B10 são as classes representadas na Fig.3.3.  
 C.E. - Coeficiente de emurchecimento; C.C. - Capacidade de Campo

**Quadro 4.11. Testes t de Student à igualdade dos valores medidos da profundidade de amortecimento ( $D_m$ ) em pares de classes com variâncias desiguais, para  $\alpha = 0,05$ ) (a) Solo Pmg (b) solo Cb. U1...Un, classes de perfis uniformes; H1...Hn, classes de perfis em fase de humedecimento ; S1...Sn, classes de perfis em fase de secagem.**

Classes	t Student	t crítico ( $\alpha=0,05$ ) (intervalo)		Igualdade de médias
U1 - U2	0,595	<-2,571	>2,571	aceite
U3 - U5	0,707	<-2,571	>2,571	aceite
U5 - U8	-0,945	<-2,306	>2,306	aceite
H1 - H4	3,941	<-2,776	>2,776	rejeitada
H1 - H2	0,773	<-2,776	>2,776	aceite
H2 - H4	1,700	<-2,365	>2,365	aceite
S1 - S4	-3,112	<-2,365	>2,365	rejeitada
U1 - S1	0,787	<-2,571	>2,571	aceite
H1 - S3	0,793	<-2,776	>2,776	aceite
S4 - U6	-2,356	<-2,365	>2,365	aceite
H2 - U7	0,811	<-2,365	>2,365	aceite
H3 - U8	1,829	<-2,571	>2,571	aceite

(a)

Classes	t Student	t crítico ( $\alpha=0,05$ ) (intervalo)		Igualdade de médias
U1 - U3	-0,546	<-2,024	>2,024	aceite
U3 - U4	2,518	<-2,035	>2,035	rejeitada
U4 - U5	-2,015	<-2,045	>2,045	aceite
H1 - H3	3,348	<-2,262	>2,262	rejeitada
S1 - S3	1,053	<-2,306	>2,306	aceite
S3 - S8	-4,590	<-2,365	>2,365	rejeitada
S5 - S6	0,772	<-2,365	>2,365	aceite
H2 - S8	-0,695	<-2,262	>2,262	aceite
H2 - U2	-1,007	<-2,365	>2,365	aceite
U2 - S8	-2,293	<-2,306	>2,306	aceite
H3 - U5	-0,993	<-2,306	>2,306	aceite

(b)

semelhantes não foram estatisticamente significativas as diferenças obtidas entre as  $D_m$  estimadas para os perfis S, U e H.

No solo Cb (Fig 4.6), em perfis U a profundidade de amortecimento não variou significativamente (Quadro 4.11) entre o C.E. e a C.C. (o valor médio de  $D_m$  neste intervalo foi de  $9,9 \pm 1,4$  cm). Para valores superiores a C.C., foi significativo o decréscimo de  $D_m$  (de 10,2 cm para 8,7 cm) quando o teor de água variou entre  $0,43 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e  $0,45 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Em perfis H os valores de  $D_m$  diminuíram significativamente de 12,4 cm para 9,7 cm entre  $0,33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e  $0,47 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ . Em perfis S o valor médio de  $D_m$  para teores de humidade entre  $0,16 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e  $0,21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  foi  $8,6 \pm 1,0$  cm; para teores de humidade situados entre  $0,21 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  e  $0,42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,  $D_m$  aumentou significativamente de 8,2 cm para 11,6 cm. Para valores próximos da C.C. as diferenças entre os valores de  $D_m$  para perfis U, H e S não foram estatisticamente significativas.

Estes resultados mostram que a variação da profundidade de amortecimento (ou da difusividade térmica), com o teor de humidade do solo, em ambos os solos, depende do gradiente de humidade predominante (perfis S, U ou H), e nem sempre é coincidente com a variação esperada de  $D_m$  quando apenas o teor médio de humidade do solo é tido em conta.

### **c) profundidade de amortecimento e humidade do solo em PT1, PT2 e PT3**

Resultados anteriores (secção 4.2.4.1) mostraram que os valores da profundidade de amortecimento estimados para PT1, PT2 e PT3 diferem entre si. As diferenças de  $D_m$  entre PT2 e PT1 atingiram 5,1 cm no solo Pmg e 4,5 cm no solo Cb, enquanto que as diferenças entre PT2 e PT3 variaram entre 1,8 cm e 9,3 cm no solo Cb e atingiram 13,8 cm no solo Pmg; contudo,  $D_m$  foi maior em PT3 que em PT2 em 17 dias analisados no solo Pmg. Além disso, as diferenças  $D_{PT2}-D_{PT3}$  e  $D_{PT1}-D_{PT2}$  não parecem ser constantes. Como se concluiu que a duração do dia e a nebulosidade não parecem afectar a estimativa da profundidade de amortecimento (pelo menos  $D_m$ ) nos solos Pmg e Cb, avaliou-se a influência da humidade do solo na variação de  $D_{PT1}-D_{PT2}$  e  $D_{PT2}-D_{PT3}$  em ambos os solos. Para isso, as diferenças entre as profundidades de amortecimento estimadas dos perfis térmicos medidos foram classificadas em classes de humidade do solo com dimensão constante ( $n=5$ ), sendo cada classe representada pelos valores médios dos elementos componentes.

A Figura 4.7 mostra estas diferenças em função do teor médio de humidade do solo nos perfis hídricos U, H e S. De uma forma geral, verificou-se que as diferenças  $D_{PT1}-D_{PT2}$  e  $D_{PT3}-D_{PT2}$  tendem a aumentar em valor absoluto com o aumento do teor de



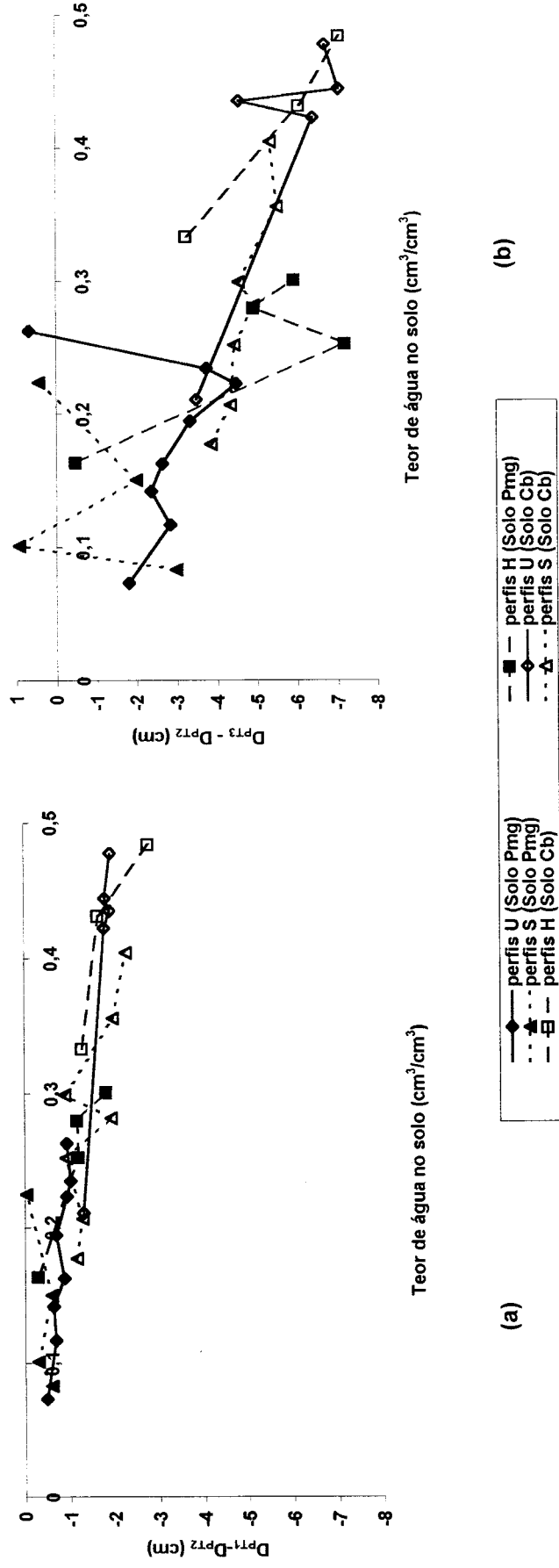


Fig. 4.7. Diferenças entre as profundidades de amortecimento dos perfis térmicos PT1 ( $D_{PT1}$ ), PT2 ( $D_{PT2}$ ) e PT3 ( $D_{PT3}$ ) em função do teor médio de água nos solos Pmg e Cb, em fase de secagem (S), humedecimento (H) e uniforme (U): (a)  $D_{PT1}-D_{PT2}$ ; (b)  $D_{PT3}-D_{PT2}$

humidade do solo, em qualquer padrão de perfil hídrico, mas esse aumento só é significativo em alguns perfis no solo Cb. Por outro lado, o aumento das diferenças parece mais rápido no  $D_{PT3}-D_{PT2}$  que no  $D_{PT1}-D_{PT2}$ , embora nos perfis H e S do Pmg a variabilidade seja grande.

Estes resultados parecem indicar que o aumento do teor de humidade do solo torna-o mais heterogéneo. Contudo, esta tendência é aparentemente contrariada em certas situações associadas ao tipo de distribuição de humidade ao longo do perfil, provavelmente porque a difusividade térmica do solos é máxima para teores de humidade que são menores que a Capacidade de Campo do solo Pmg (van Duin, 1963; van Wijk e de Vries, 1963) e/ou porque a condutividade térmica aumenta significativamente quando as temperaturas são elevadas (Campbell *et al.*, 1994).

#### **4.2.4. 4. Profundidade de amortecimento e análise harmónica**

A profundidade de amortecimento pode ser calculada a partir da análise harmónica,  $D_c$ , recorrendo às amplitudes térmicas simuladas ou aos ângulos de fase simulados. O conhecimento de  $D_c$  permite julgar sobre a uniformidade dos perfis e, por comparação com  $D$  medido, verificar se a análise harmónica permite obter boas representações da profundidade de amortecimento, visto que  $D_c$  tem de ser calculado separadamente para cada harmónica.

##### **4.2. 4. 4.1 Profundidades de amortecimento simuladas**

A profundidade de amortecimento simulada é a estimada a partir da análise harmónica, recorrendo às equações 2.25 e 2.27. Para os diferentes dias-tipo em ambos os solos e para PT1, PT2 e PT3, foram estabelecidas regressões lineares entre os logaritmos naturais das semi-amplitudes das duas primeiras harmónicas ( $C_{1^a}$  harmónica e  $C_{2^a}$  harmónica) e as profundidades respectivas (Eq. 2.25); foram também estabelecidas regressões lineares do mesmo tipo para os ângulos de fase estimados para a 1ª e 2ª harmónicas (Eq. 2.27), mas só no perfil PT3.

Os resultados apresentados no Quadro 4.12 mostram que os níveis de correlação das regressões são geralmente elevados e significativos para  $\alpha = 0,05$ , embora ocorram várias situações onde as regressões não são significativas a este nível, sobretudo no solo Cb. De uma forma geral, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das equações de regressão para a 1ª harmónica foram superiores aos das regressões para a 2ª harmónica. Em PT1 e PT2 e na maior parte dos ciclos diários, os valores de  $R^2$  no solo Pmg foram maiores que os obtidos no solo Cb; em PT3, os valores de  $R^2$  foram sempre superiores

Quadro 4.12. Profundidades de amortecimento da onda térmica nos solos Pmg e Cb obtidas a partir das equações de amplitude e de fase para as duas primeiras harmônicas (D<sub>1</sub> e D<sub>2</sub>) nos perfis térmicos PT1 (desde a superfície a 32 cm), PT2 (2 a 32 cm) e PT3 (2 a 16 cm), nos dias-tipo indicados. R<sup>2</sup> - coeficiente de determinação das regressões (ver texto)

NS - Regressão linear não significativa [ao nível (α) de 0,05]

Solo	Dia-Tipo	1ª Harmônica						2ª Harmônica									
		Eq. de amplitude			Eq. fase			Eq. de amplitude			Eq. fase						
		PT1	PT2	PT3	PT1	PT2	PT3	PT1	PT2	PT3	PT1	PT2	PT3				
		D <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	D <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	D <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	D <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	D <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	D <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	D <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>		
Pmg	C-Hm	8,5	0,99	8,6	0,99	10,2	0,99	16,3	0,99	13,1	0,84	14,5	0,83	7,5	0,99	22,1	0,95
	M-Hb	12,9	0,99	13,4	0,99	12,2	0,99	11,7	0,99	10,6	0,97	11,1	0,97	8,3	0,99	7,8	0,99
	M-Hm	9,5	0,99	9,4	0,99	11,8	0,99	14,6	0,99	12,1	0,82	12,9	0,79	6,3	0,99	8,1	0,99
	M-He	11,4	0,99	11,6	0,99	11,6	0,99	12,7	0,99	10	0,98	10,2	0,97	7,7	0,99	9	0,99
	L-Hm	5,7	0,92	5,6	0,92	14,4	0,98	19,4	0,98	9,8	0,98	10,4	0,99	10,7	0,98	NS	NS
Cb	I	11,2	0,99	11,6	0,99	11,7	0,99	13,9	0,99	12,3	0,80	14,1	0,79	6,9	0,99	7,5	0,99
	P	6,9	0,96	6,8	0,96	11,6	0,99	18	0,99	12,5	0,92	13,4	0,92	8,3	0,99	26,1	0,88
	M	9,9	0,99	10	0,99	11,4	0,99	14	0,99	11,8	0,88	12,4	0,86	8,9	0,99	8,1	0,99
	N	11	0,99	11,3	0,99	10,9	0,98	14	0,99	11,3	0,83	12,7	0,83	6,6	0,99	8	0,97
	C-Hm	13,1	0,95	14,1	0,96	10,5	0,97	7,3	0,94	12,9	0,69	15,5	0,67	6,4	0,96	NS	NS
Cb	M-Hb	9,2	0,97	9,9	0,99	9,8	0,99	7,7	0,94	18,7	0,65	25,6	0,79	NS	NS	6,4	0,9
	M-Hm	13,4	0,86	15,5	0,92	9,9	0,97	6	0,88	18,1	0,62	25,6	0,77	NS	NS	NS	NS
	M-He	13,9	0,88	16	0,94	10,9	0,97	6	0,88	18	0,71	23,7	0,87	15,3	0,84	NS	NS
	L-Hm	13,2	0,84	15,8	0,94	10,3	0,99	6,3	0,89	NS	NS	25,8	0,68	NS	NS	6,8	0,87
	I	13,2	0,87	15,7	0,93	9,9	0,99	NS	NS	16,8	0,62	25,9	0,77	NS	NS	NS	NS
Cb	P	13,3	0,85	15,7	0,88	8,9	0,99	NS	NS	17,1	0,68	24,5	0,82	NS	NS	NS	NS
	M	15	0,81	18	0,90	10,7	0,99	6,2	0,88	16,9	0,68	22,9	0,86	14,8	0,82	NS	NS
	N	10,9	0,95	11,9	0,99	10,9	0,99	NS	NS	20,2	0,57	30,7	0,8	16	0,91	NS	NS

a 0,97 para as duas harmónicas no solo Pmg e para a 1ª harmónica no solo Cb, e variaram entre 0,82 e 0,96 para a 2ª harmónica no solo Cb. Além disso, a qualidade de ajustamento das equações de fase (em PT3) no solo Cb foi sempre inferior à obtida através da equação de amplitude, enquanto que no solo Pmg foi semelhante.

#### 4.2.4.4.2 -Uniformidade dos perfis

As equações 2.25, 2.27 e 2.28 pressupõem que as camadas de solo analisadas sejam homogéneas e isotrópicas. Num solo uniforme, os valores de D estimados a partir das equações de amplitude e de fase devem ser semelhantes (equações 2.25 e 2.27); além disso, a razão entre as profundidades de amortecimento da 1ª harmónica ( $D_1$ ) e da 2ª ( $D_2$ ) deve ser igual a  $\sqrt{2}$  (eq. 2.28). A verificação destas proposições foi utilizada para avaliar o grau de uniformidade das camadas de solo correspondentes aos perfis térmicos PT1, PT2 e PT3.

O Quadro 4.13 mostra os valores de  $D_1/D_2$ , estimados a partir das equações de amplitude e de fase nos perfis PT1, PT2 e PT3 dos dois solos, para diferentes dias-tipo. No solo Pmg, a razão  $D_1/D_2$  estimada a partir da equação de amplitude em PT3 não foi significativamente diferente de  $\sqrt{2}$  para um nível de probabilidade de 95% (Modelo de Regressão Múltipla) em oito dos nove dias-tipo (apenas no dia M-Hm o foi); ao invés, os valores estimados em PT1 e PT2 foram, de uma forma geral, significativamente diferente de  $\sqrt{2}$  para o mesmo nível de probabilidade (exceptua-se o valor estimado nestes perfis no dia M-Hb). No solo Cb os valores de  $D_1/D_2$  estimados foram significativamente diferentes de  $\sqrt{2}$  em PT1, PT2 e em 5 dos 6 dias-tipo analisados em PT3 (exceptua-se o valor estimado neste perfil no dia C-Hm). A razão  $D_1/D_2$  estimada a partir da equação de fase não foi significativamente diferente de  $\sqrt{2}$  em cinco dos dez dias que apresentam valores (dias M-Hb, M-He, M e N no solo Pmg e no dia M-Hb no solo Cb).

Os resultados apresentados sugerem que o comportamento térmico até 16 cm de profundidade é aproximadamente uniforme no solo Pmg, mas não no solo Cb. Por esta razão, foram estimados valores da profundidade de amortecimento de ambos os solos para um outro perfil térmico, que compreende as profundidades de 2, 4, 6 e 8 cm (PT4). Para diversos dias-tipo nos solos Pmg e Cb, o Quadro 4.14 mostra os valores de D calculados a partir das amplitudes térmicas medidas ( $D_m$ ) e a partir das amplitudes térmicas ou dos ângulos de fase estimados pela análise harmónica ( $D_c$ ) e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das respectivas regressões.

**Quadro 4.13. Valores da razão entre profundidades de amortecimento nos solos Pmg e Cb estimadas a partir das equações de amplitude e de fase para a 1ª e 2ª harmónicas (D<sub>1</sub>/D<sub>2</sub>) nos perfis térmicos PT1, PT2 e PT3 e nos dias-tipo indicados.**

\* valores de D<sub>1</sub>/D<sub>2</sub> significativamente diferente de 2

Solo	Dia-Tipo	D <sub>1</sub> /D <sub>2</sub>			
		Eq. Amplitude			Eq. Fase
		PT1	PT2	PT3	P3
Pmg	C-Hm	0,65*	0,59*	1,36	0,74*
	M-Hb	1,22	1,21	1,47	1,50
	M-Hm	0,79*	0,73*	1,87*	1,80*
	M-He	1,14*	1,14*	1,51	1,41
	L-Hm	0,58*	0,54*	1,35	-
	I	0,91*	0,82*	1,70	1,85*
	P	0,55*	0,51*	1,40	0,69*
	M	0,84*	0,81*	1,28	1,73
	N	0,97*	0,89*	1,65	1,75
	Cb	C-Hm	1,02*	0,91*	1,64
M-Hb		0,49*	0,39*	-	1,20
M-Hm		0,74*	0,61*	-	-
M-He		0,77*	0,68*	0,71*	-
L-Hm		-	0,61*	-	0,93*
I		0,79*	0,61*	0,63*	-
P		0,78*	0,64*	0,59*	-
M		0,89*	0,79*	0,72*	-
N		0,54*	0,39*	0,68*	-

**Quadro 4.14. Profundidades de amortecimento da onda térmica (em cm) nos solos Pmg e Cb para o perfil parcial (PT4) (2 a 8 cm) em 9 dias-tipo, obtidas a partir das amplitudes térmicas medidas ( $D_m$ ) e a partir das equações de amplitude e de fase das duas primeiras harmônicas ( $D_1$  e  $D_2$ ), e respectivos valores de  $R^2$ . NS - Regressão linear não significativa para  $\alpha = 0,05$**

\* significativamente diferente de 2

Solo	Dia-tipo	Valores estimados												$D_1/D_2$	
		Valores medidos						2ª Harmônica							
		1ª Harmônica			2ª Harmônica			Eq. Fase			Eq. Fase				
Eq. Amplitude	$r^2$	$D_1$	Eq. Amplitude	$r^2$	$D_1$	Eq. Amplitude	$r^2$	$D_2$	Eq. Amplitude	$r^2$	$D_2$	Eq. Fase	$r^2$	Eq. de Amplitude	Eq. de Fase
Pmg	C-Hm	12,2	0,99	12,1	0,99	17,2	0,99	9,6	0,99	14,9	0,99	1,26	0,99	1,26	1,15
	M-Hb	11,7	1	11,7	0,999	12,7	0,995	8,4	0,999	9,2	0,99	1,39	0,99	1,39	1,38
	M-Hm	12,6	0,98	12,9	0,98	16,2	0,99	8,5	0,98	10,4	0,99	1,52	0,99	1,52	1,56
	M-He	12,4	0,98	12,5	0,98	14,7	0,99	9,5	0,98	10,11	0,99	1,32	0,99	1,32	1,45
	L-Hm	20,4	0,97	20,5	0,98	26,1	0,98	14,9	0,96	13,8	0,98	1,38	0,98	1,38	1,89
	I	10,2	0,97	10,3	0,97	14,2	0,97	7	0,97	9,5	0,96	1,47	0,96	1,47	1,49
Cb	P	13,8	0,97	14,8	0,97	19,1	0,98	10,3	0,99	14,8	0,97	1,44	0,97	1,44	1,29
	M	12,4	0,98	12,6	0,98	16	0,99	8,9	0,99	9,4	0,98	1,42	0,98	1,42	1,70
	N	8,8	0,95	9,2	0,95	16,6	0,99	6	0,96	12,9	0,99	1,53	0,99	1,53	1,29
	C-Hm	16,8	0,97	17,8	0,98	NS	NS	12	0,99	NS	NS	1,48	NS	1,48	-
	M-Hb	9,8	0,98	9	0,98	17,9	0,99	6,8	0,98	25	0,91	1,32	0,91	1,32	0,72*
	M-Hm	NS	NS	NS	NS	29,7	0,997	NS	NS	NS	NS	-	NS	-	-
Cb	M-He	NS	NS	NS	NS	31,6	0,995	NS	NS	NS	NS	-	NS	-	-
	L-Hm	10,2	0,96	9,4	0,96	NS	NS	5,6	0,95	NS	NS	1,68	NS	1,68	-
	M	10,6	0,91	10,6	0,93	36,8	0,99	7,7	0,94	NS	NS	1,38	NS	1,38	-
	N	8,8	0,97	8,8	0,98	25,1	0,99	10	0,95	NS	NS	0,88*	NS	0,88*	-

A maior parte das regressões foram significativas para um nível de probabilidade de 95%, excepto no solo Cb onde não foram significativas as regressões para amplitudes medidas ou calculadas nos dias M-Hm, M-He, I e P nem as relativas às equações de fase para os dias C-Hm e L-Hm (1ª e 2ª harmónicas) e para os dias M-Hm e M-He (2ª harmónica). Os valores de  $D_m$  variaram entre 8,8 cm (dia N) e 20,4 cm (dia L-Hm) no solo Pmg e entre 8,8 cm (Dia N) e 16,8 cm (dia C-Hm) no solo Cb. Em dias M testados no solo Pmg,  $D_m$  aumentou ligeiramente com a humidade do solo (entre 11,7 cm para o dia M-Hb e 12,4 cm para o dia M-Hm) e foi ligeiramente maior nos dias P (13,8 cm) e M (12,4 cm) que nos dias I (10,2 cm) ou N (8,8 cm). No solo Cb,  $D_m$  também foi mais elevada no dia M (10,6 cm) que no dia N (8,8 cm). A variação entre os valores de  $D_m$  em PT4 é superior à variação obtida em PT3 (Quadros 4.15). No solo Pmg,  $D_m$  em PT4 foi maior que  $D_m$  em PT3 nos dias C-Hm, M-Hb, M-Hm, M-He e L-Hm, P e M (as diferenças variaram entre 0,3 cm para o dia M-Hb e 5,8 cm para o dia M-Hm) e inferior nos dias I e N (em 0,6 cm e 1 cm, respectivamente). No solo Cb, os  $D_m$  em PT4 foram superiores aos de PT3 em 6,6 cm no dia C-Hm e inferiores nos restantes dias (entre 0,6 cm no dia L-Hm e 3,2 cm no dia M).

A profundidade de amortecimento estimada a partir da equação de amplitude referente à 1ª harmónica para PT4 variou, no solo Pmg, entre 9,2 cm no dia N e 20,5 cm no dia L-Hm e, no solo Cb, entre 8,8 cm no dia N e 17,8 cm no dia C-Hm. No solo Pmg, as diferenças entre os valores obtidos em PT3 e PT4 variaram entre 0,5 cm (dia M-Hb) e 3,2 cm (dia P) nos dias de comprimento médio e atingiram 6,1 cm no dia L-Hm; no solo Cb, variaram entre 0,1 cm (dia M) e 1,1 cm (dia N) nos dias de comprimento médio e atingiram 7,3 cm no dia curto (C) (Quadros 4.15).

De uma forma geral, os valores de  $D_c$  e de  $D_m$  estão contidos na gama definida por van Wijk e de Vries (1963), de Vries, 1975; Buchan (1982) e Monteith e Unsworth, 1990) para a harmónica fundamental da onda térmica diária, em solos minerais (exceptuam-se os valores de  $D_m$  e  $D_c$  relativos ao dia L-Hm no solo Pmg).

No solo Pmg, os valores de  $D$  obtidos a partir da equação de fase aplicada à 1ª harmónica foram superiores aos obtidos pela equação de amplitude, desde cerca de 1 cm (dia M-Hb) até 7,4 cm (dia N); no solo Cb, os valores de  $D_c$  da equação de fase são substancialmente maiores que os obtidos pela equação de amplitude. Quer a estimativa de  $D_c$  obtida para o dia L-Hm no solo Pmg, quer as obtidas em qualquer dos dias-tipo no solo Cb não se incluem na gama de valores referida na literatura (atrás referida) para

Quadro 4.15. Profundidades de amortecimento da onda térmica (em cm) estimadas pelos métodos 1, 2 e 3 (ver explicação no texto) no perfil completo (PT1) e nos perfis parciais (PT2, PT3 e PT4) nos dias-tipo indicados

Solo	Dia-Tipo	Método 1				Método 2				Método 3			
		PT1	PT2	PT3	PT4	PT1	PT2	PT3	PT4	PT1	PT2	PT3	PT4
Pmg	C-Hm	8,5	8,6	10,2	12,1	9,4	9,5	9,6	11,5	13,3	14,7		
	M-Hb	12,9	13,4	12,2	11,7	12,6	13,2	11,8	11,4	12	12,2		
	M-Hm	9,5	9,4	11,8	12,9	9,6	9,6	11,2	12,4	13,2	14,6		
	M-He	11,4	11,6	11,6	12,5	11,1	11,4	11,1	12,1	12,2	13,6		
	L-Hm	5,7	5,6	14,4	20,5	5,3	5,8	14,1	20,2	16,9	23,3		
	I	11,2	11,6	11,7	10,3	11,1	11,7	11,1	9,9	12,8	12,3		
P	P	6,9	6,8	11,6	14,8	5,7	6,3	10,6	13,6	14,8	17,0		
	M	9,9	10	11,4	12,6	9,8	10,1	11,1	12,2	12,7	14,3		
	N	11	11,3	10,9	9,2	10,7	11,2	10,3	8,9	12,5	12,9		
	C-Hm	13,1	14,1	10,5	17,8	12,7	14,0	9,8	16,9	8,9	-		
Cb	M-Hb	9,2	9,9	9,8	9	10,7	11,8	-	8,8	8,8	13,5		
	M-Hm	13,4	15,5	9,9	NS	13,7	16,4	-	-	8	-		
	M-He	13,9	16	10,9	NS	14,3	16,9	11,3	-	-	-		
	L-Hm	13,2	15,8	10,3	9,4	-	16,1	-	9,2	8,3	-		
I	I	13,2	15,7	9,9	-	11,4	13,7	8,2	-	-	-		
	P	13,3	15,7	8,9	-	11,5	14,0	7,7	-	-	-		
	M	15	18	10,7	10,6	14,5	17,9	10,8	10,4	8,45	23,7		
	N	10,9	11,9	10,9	8,8	10,1	12,3	10,2	8,8	-	17,0		



solos minerais. Assim é preferível obter  $D_c$  a partir da equação de amplitude que da equação de fase.

No solo Pmg os valores de  $D_1/D_2$  obtidos a partir das equações de amplitude e de fase em PT4 não foram significativamente diferentes de  $\sqrt{2}$ . No solo Cb, só no dia N os valores de  $D_1/D_2$  obtidos pela equação de amplitude foram significativamente diferentes de  $\sqrt{2}$ . Enquanto que em PT4 do solo Pmg os resultados obtidos não foram significativamente diferentes dos obtidos em PT3, foram-no no solo Cb em quatro dos cinco dias para os quais foram definidas estimativas de  $D_1/D_2$ .

Em síntese, o comportamento térmico parece ser uniforme até pelo menos 16 cm de profundidade do solo Pmg (PT3) mas, no solo Cb esta uniformidade não é garantida além dos 8 cm superficiais no solo Cb (PT4).

#### **4.2.4.4.3. Comparação das profundidades de amortecimento simuladas e medidas**

Verificou-se que a variação diária da temperatura em ambos os solos é bem descrita pela sobreposição das duas primeiras harmónicas de Fourier e que o comportamento térmico das camadas de solo consideradas não é uniforme ao longo do perfil. Com base nas profundidades de amortecimento estimadas a partir da análise harmónica ( $D_c$ ), concluiu-se que o perfil PT4 era o único uniforme no solo Cb, enquanto que no solo Pmg, os PT3 e PT4 eram suficientemente uniformes; verificou-se também que é preferível obter os  $D_c$  a partir das equações de amplitude que das de fase. Contudo, como  $D_c$  tem de ser estimado separadamente para cada harmónica, persiste o problema de qual o valor mais representativo das profundidades de amortecimento obtidas das amplitudes térmicas medidas ( $D_m$ ). Para comparação com  $D_m$ , os valores de  $D_c$  considerados como representativos da análise harmónica foram expressos:

- o valor de  $D$  das amplitudes da 1ª harmónica, por ser dominante (secção 4.2.4.4) – método 1

- a média dos valores de  $D$  das amplitudes da 1ª e 2ª harmónicas, ponderada pela contribuição relativa de cada harmónica para a variância total da temperatura – método 2;

- a média aritmética dos valores de  $D$  calculados para a 1ª harmónica pelas equações de amplitude e de fase, apesar da fraca representatividade dos  $D_c$  estimados das fases – método 3. Este método de cálculo foi usado por Gupta *et al.*, (1984).

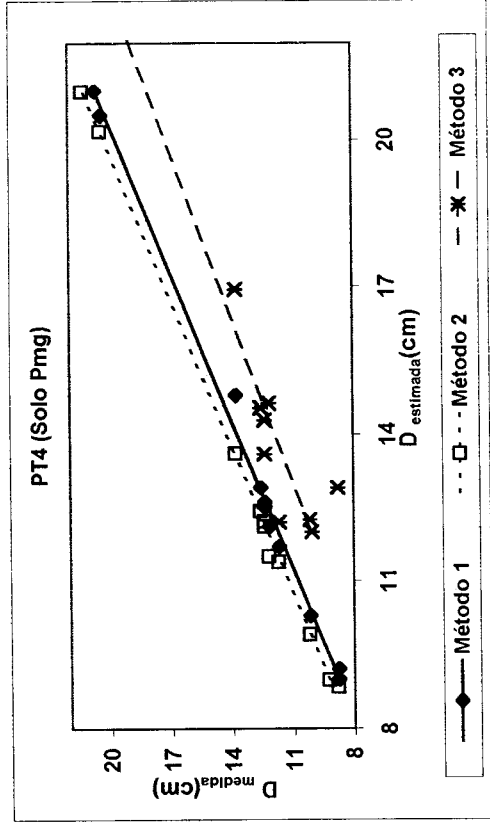
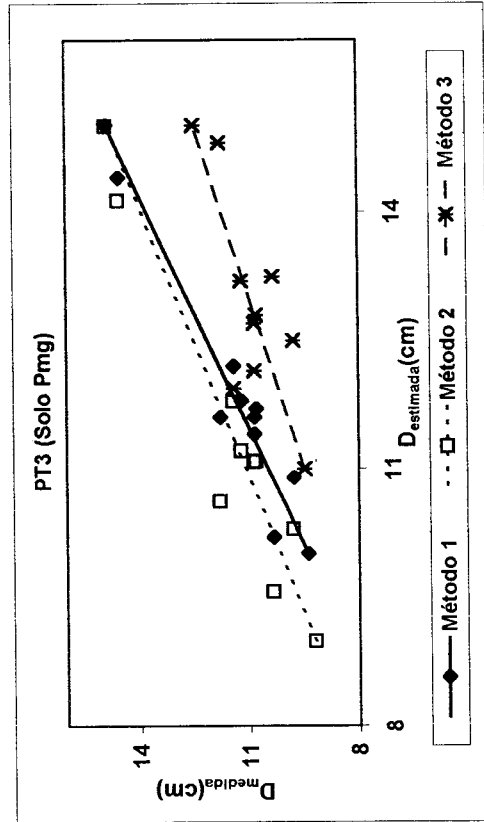
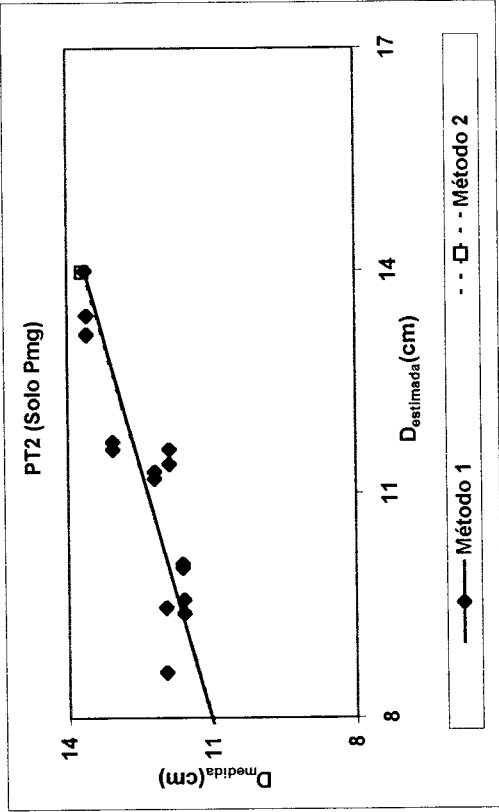
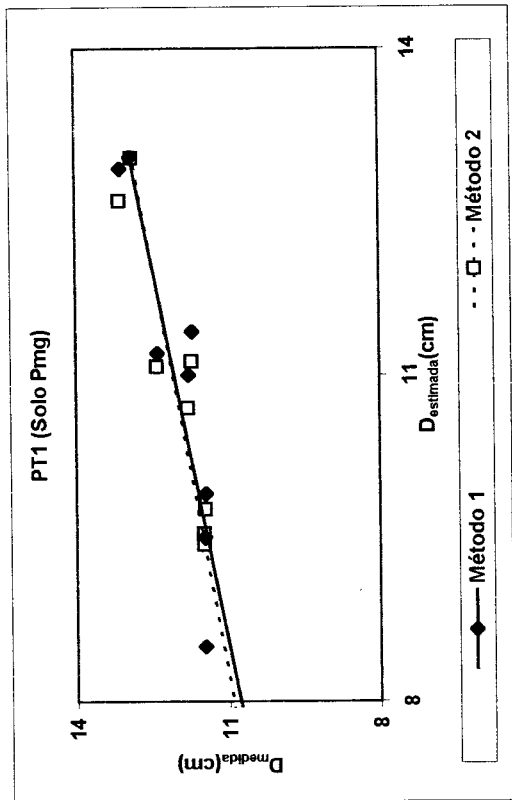
Os valores de  $D_c$  assim obtidos para todos os perfis térmicos (incluindo os PT1 e PT2, para comparação) e os vários dias-tipo nos solos Pmg e Cb são apresentados no Quadro 4.15. De uma forma geral verificou-se que:

- as diferenças entre os valores de  $D_c$  obtidos pelos métodos 1 e 2 foram inferiores a 1 cm nos vários perfis térmicos considerados, devido à elevada percentagem da variância total explicada pela 1ª harmónica, e que os valores de  $D_c$  obtidos pelo método 3 foram superiores aos obtidos pelos métodos 1 e 2, em PT4 e em PT3 do solo Pmg, enquanto que no solo Cb, os valores de  $D_c$  obtidos pelo método 3 foram inferiores aos obtidos pelos métodos 1 e 2 em PT4 e superiores em PT3.

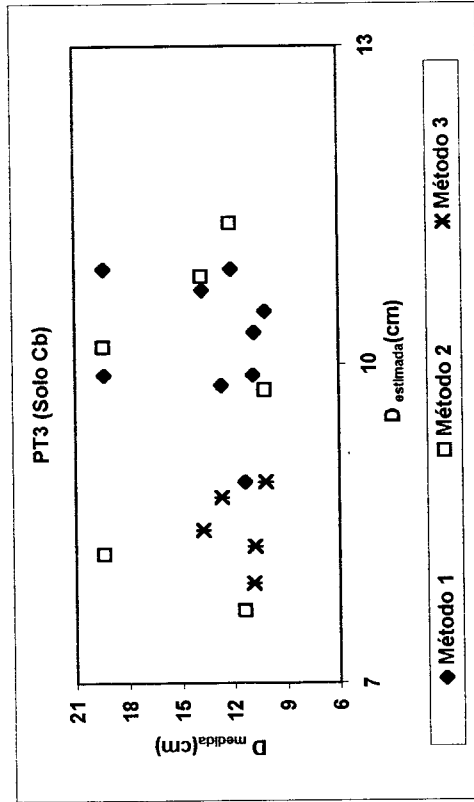
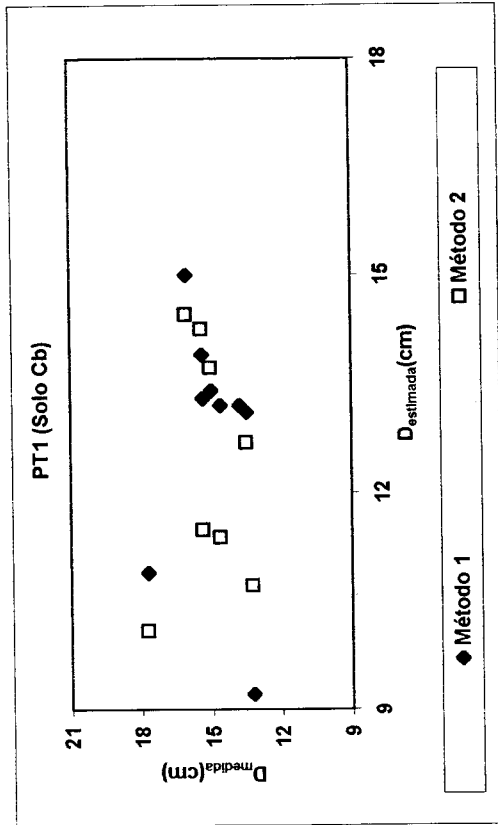
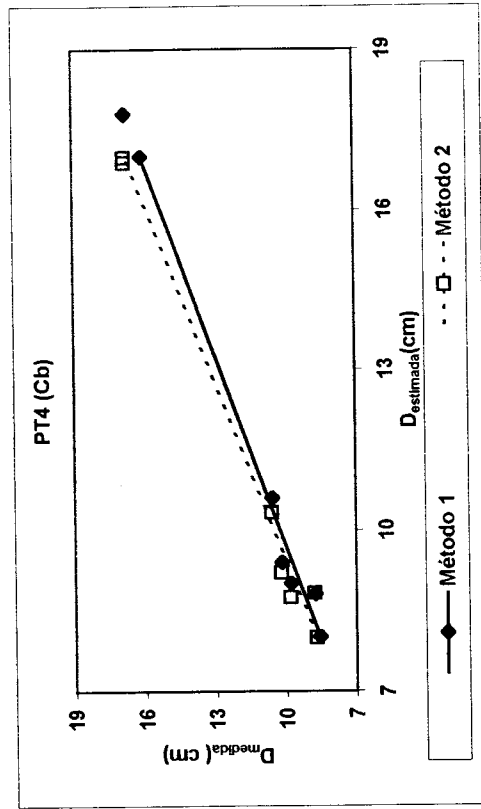
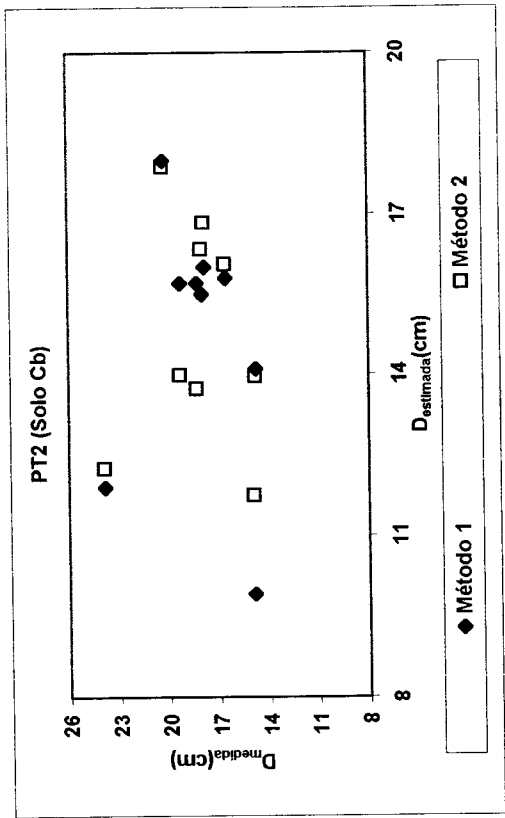
A Figura 4.8 apresenta a comparação dos valores de  $D_m$  com as estimativas de  $D_c$  dos métodos 1, 2 e 3 nos quatro perfis térmicos (PT1, PT2, PT3 e PT4) dos solos Pmg e Cb. Em qualquer perfil térmico do solo Pmg, a relação entre os valores medidos ( $D_m$ ) e os valores estimados ( $D_c$ ) foi aproximadamente linear; ao invés, no solo Cb a linearidade só foi evidente em PT4.

O Quadro 4.16 mostra as rectas de regressão estabelecidas entre  $D_c$  e  $D_m$ . Os valores de  $R^2$  são elevados (superiores a 0,98 em PT4 e superiores a cerca de 0,75 nos PT1, PT2 e PT3) e as regressões significativas a um nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05. Como as rectas de regressão devem ser do tipo 1:1, somente as regressões relativas aos perfis PT3 e PT4 são significativas, isto é, apenas os valores de  $D$  estimados a partir destes perfis são boas estimativas do  $D_m$ . Além disso, os resultados obtidos no solo Pmg mostram que os métodos 1 e 2 estimam melhor  $D$  que o método 3 e que a qualidade do ajustamento de qualquer dos métodos utilizados aumentou quando foi considerado PT4 em vez de PT3. Os resultados obtidos no solo Cb mostram que  $D_c$  apenas foi uma boa estimativa de  $D$  em PT4, isto é, quando a equação (2.25) foi utilizada numa espessura até 8 cm de profundidade, ao longo da qual é de esperar uma boa uniformidade das propriedades térmicas ( $D_1/D_2$  não diferem significativamente de  $\sqrt{2}$ ). Em ambos os solos, o método 2 não melhora a qualidade do ajustamento de  $D$  obtido pelo método 1.

Os resultados mostram também a necessidade de delimitar uma camada de solo ao longo da qual seja possível aplicar a teoria de condução de calor a meios semi-infinitos homogéneos (isto é, na qual a difusividade ou a profundidade de amortecimento sejam aproximadamente constantes), a partir do conhecimento prévio do comportamento térmico do solo ( $n^\circ$  de harmónicas necessárias para a simulação da



(a)  
222



(b)  
 Fig. 4.8. Relações entre as profundidades de amortecimento obtidas a partir das amplitudes térmicas medidas nos perfis indicados, e as profundidades de amortecimento estimadas a partir da análise harmônica (métodos 1, 2 e 3; ver texto): (a) solo Pmg; (b) solo Cb. As linhas representam rectas de regressão

Quadro 4.16. Regressões lineares entre as profundidades de amortecimento (cm) estimadas a partir da análise harmónica ( $D_c$ ) (métodos 1, 2 e 3) e as estimadas a partir das amplitudes térmicas medidas ( $D_m$ ) para o perfil completo (PT1) e para os perfis parciais (PT2, PT3 e PT4). NL - sem tendência definida entre a série de D estimados pela análise harmónica e a série de D estimados a partir das amplitudes térmicas medidas

Métodos	Solos	Perfis											
		PT1			PT2			PT3			PT4		
		Equação de regressão	R <sup>2</sup>	nº dias	Equação de regressão	R <sup>2</sup>	nº dias	Equação de regressão	R <sup>2</sup>	nº dias	Equação de regressão	R <sup>2</sup>	nº dias
1	Pmg	$y = 2,1x - 14,14$	0,87	9	$y = 1,9x - 12,90$	0,83	9	$y = 0,8x + 2,80$	0,87	9	$y = x + 0,24$	0,99	9
	Cb	NL			NL			NL			$y = 1,2x - 2,22$	0,99	5
2	Pmg	$y = 2,2x - 15,81$	0,86	9	$y = 1,9x - 12,41$	0,84	9	$y = 0,8x + 1,62$	0,82	9	$y = x - 0,17$	0,99	9
	Cb	NL			NL			NL			$y = 1,1x - 1,321$	0,98	5
3	Pmg	-	-	-	-	-	-	$y = x + 2,11$	0,74	5	$y = x + 2,03$	0,9	9
	Cb	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

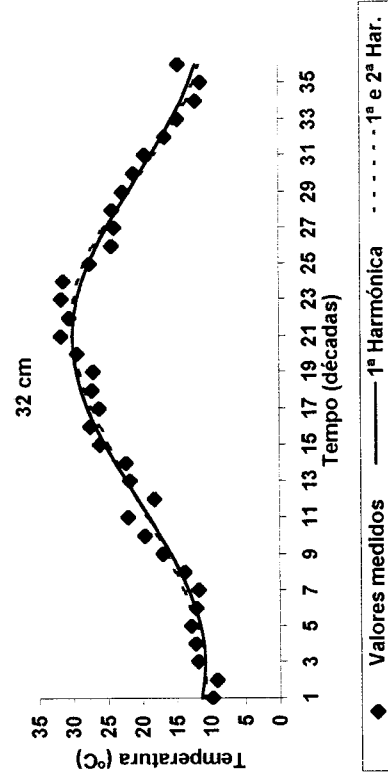
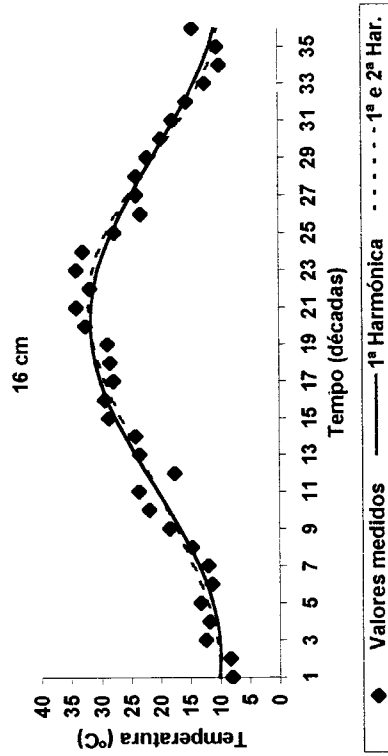
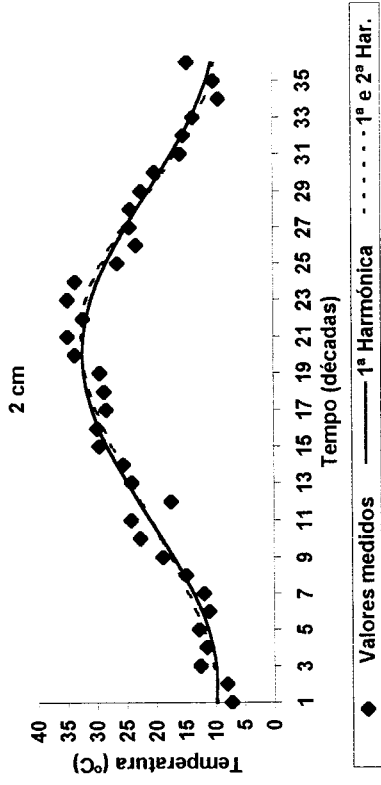
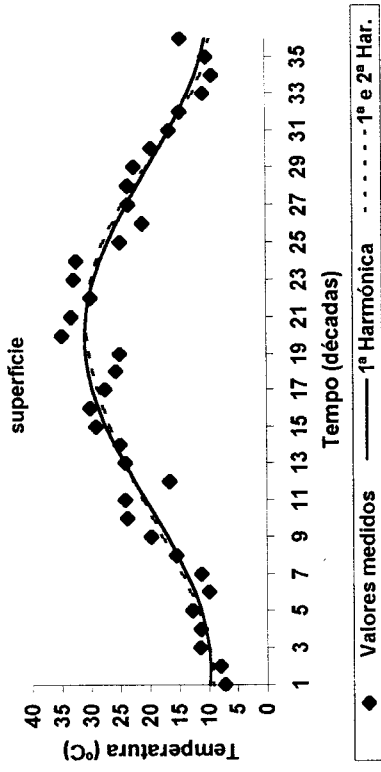
temperatura a várias profundidades e valores de  $D_1/D_2$ ). Nos solos em causa, essa camada estende-se até 16 cm de profundidade no solo Pmg e 8 cm no solo Cb.

### **4.3. Variação da temperatura nos ciclos anuais**

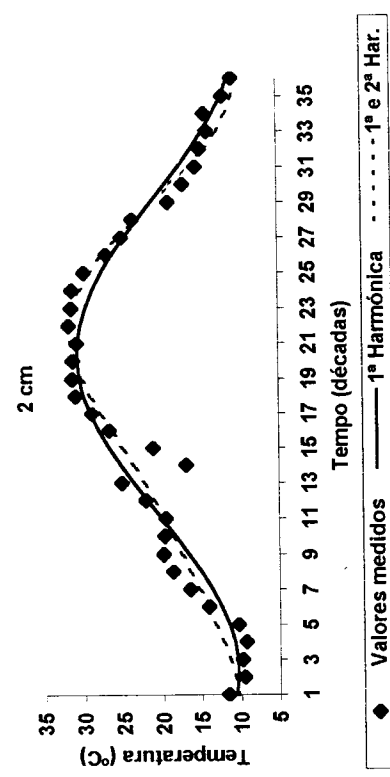
#### **4.3.1. Oscilação térmica anual**

A variação das temperaturas médias de dez dias (décadas) ao longo de cada um dos ciclos anuais estudados (1995 no Solo Pmg em Évora e 1994 e 1995 no solo Cb, em Lisboa) é apresentada na Figura 4.9. As variações de temperatura a 4, 6 e 8 cm de profundidade, durante o ano de 1995, não são apresentadas por terem um comportamento semelhante à variação térmica à superfície e a 2 cm. Para o ciclo anual de 1994 (Solo Cb) são apresentadas as variações térmicas a todas as profundidades consideradas no delineamento experimental (ver Materiais e Métodos). Durante 1994 (solo Cb), a temperatura média de cada década variou entre 31,7°C e 9,4°C à superfície do solo e entre 29,4°C e 10,2°C a 32 cm de profundidade; durante 1995, variou entre 34,8°C e 7,2°C à superfície do solo Pmg e entre 32°C e 11,6°C à superfície do solo Cb; a 32 cm de profundidade, variou entre 31,7°C e 9,2°C no solo Pmg e entre 28,2°C e 12,2°C no solo Cb.

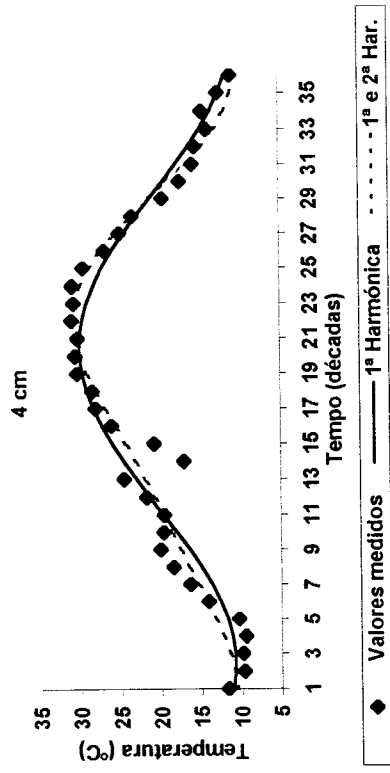
A variação térmica ao longo dos ciclos anuais é visivelmente harmónica na Fig. 4.9 a qualquer profundidade. Por isso, tal como no ciclo diário, foram ajustadas as primeiras quatro harmónicas a cada profundidade. O Quadro 4.17 mostra, para os três ciclos anuais, a percentagem da variância total explicada por cada harmónica ajustada aos valores medidos (equações 2.21 e 2.22) e as percentagens acumuladas para as primeiras duas e para o conjunto das quatro harmónicas estimadas. Para qualquer dos ciclos anuais estudados, a 1ª harmónica explicou cerca de 87% da variância total à superfície e mais de 90% entre 2 e 32 cm. A contribuição relativa da 1ª harmónica aumentou ligeiramente em profundidade, provavelmente porque a variação do teor de humidade do solo decresce com a profundidade: no ciclo anual de 1995, as percentagens variaram entre 87,5% à superfície e 94,9% a 32 cm no solo Pmg e entre 86,9% à superfície e 96,3% a 32 cm no solo Cb; em 1994 no solo Cb variaram entre 90,9% a 2 cm e 92,6% a 16 cm de profundidade. As contribuições das 2ª, 3ª e 4ª harmónicas foram sempre muito pequenas em qualquer dos solos: no ano de 1995, em apenas 3 simulações



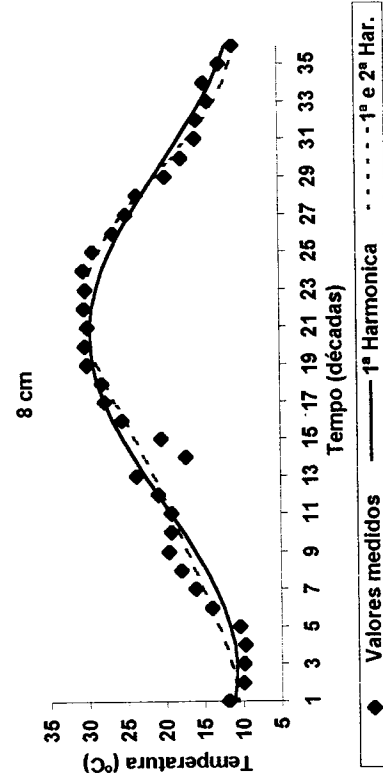
(a)



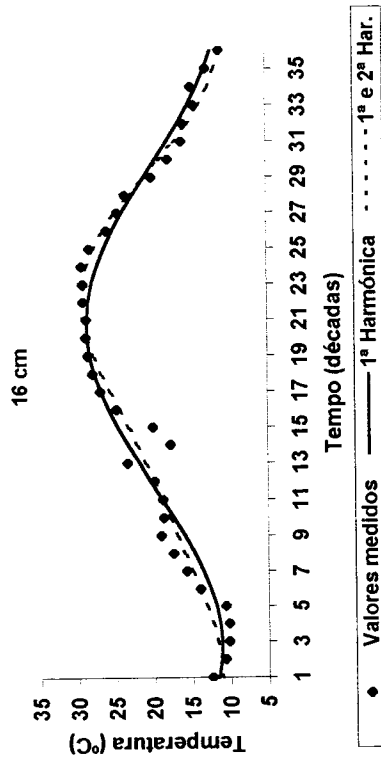
(a)



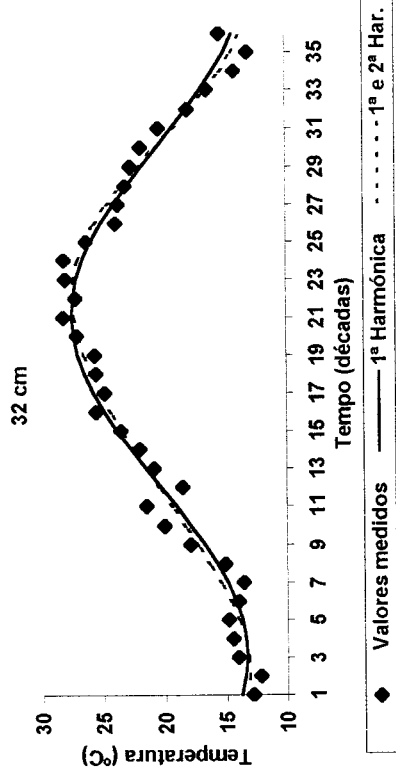
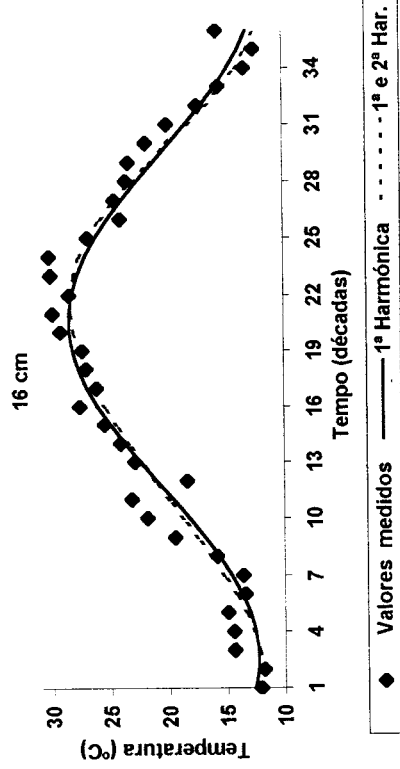
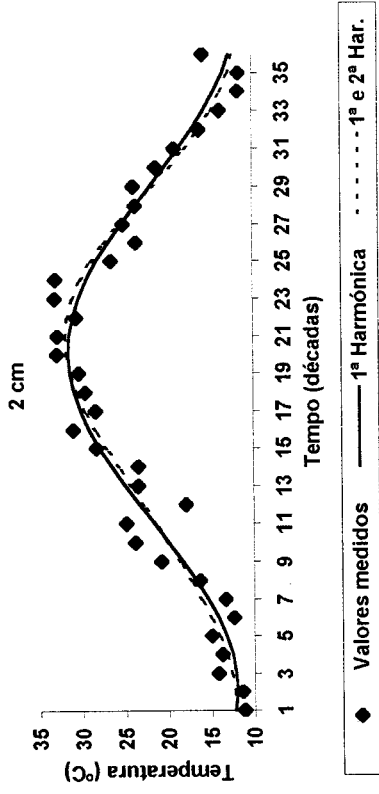
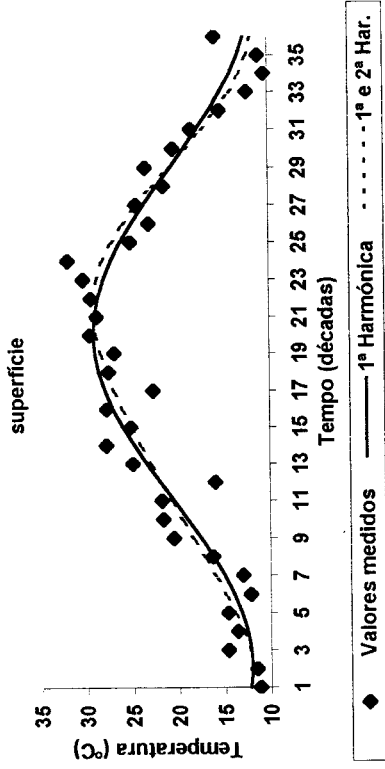
(b)



(b)







(c)

Fig. 4.9. Variação da temperatura média ao longo do ano no solo Pmg (Évora), 1995 (a), solo Cb, (Lisboa), 1994 (b) e 1995 (c), às profundidades indicadas

Quadro 4.17. Percentagem de variação da temperatura do solo explicada por cada harmónica ou conjunto de harmónicas para os ciclos anuais, nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa)

SOLO	ANO	Prof. (cm)	Variância total	% de variância explicada pelas harmónicas					
				1ª	2ª	3ª	4ª	1ª + 2ª + 3ª + 4ª	
Pmg	1995	0	64,4	87,5	0,6	0,3	0,7	88,1	89,1
		2	69,5	92,0	0,6	0,3	0,5	92,6	93,3
		4	68,4	90,2	0,7	0,6	1,6	90,9	93,2
		6	66,3	92,5	0,7	0,2	0,5	93,2	94,0
		8	63,8	92,7	0,8	0,2	0,5	93,5	94,2
Cb	1994	16	57,7	93,2	0,4	0,1	0,6	93,5	94,2
		32	48,2	94,9	0,5	0,1	0,5	95,4	96,0
		2	56,8	90,9	2,7	1,7	1,4	93,7	96,8
		4	50,8	91,0	2,9	2,0	1,3	93,8	97,1
		8	48,2	91,6	2,8	1,7	1,3	94,5	97,5
Cb	1995	16	41,6	92,6	2,4	1,2	1,3	95,0	97,5
		0	42,2	86,9	1,2	0,3	1,0	88,1	89,4
		2	52,3	91,1	0,6	0,1	0,6	91,7	92,4
		4	47,4	90,8	0,7	0,1	0,7	91,5	92,3
		6	44,2	92,1	0,4	0,0	0,7	92,5	93,2
Cb	1996	8	44,4	92,1	0,5	0,0	0,7	92,6	93,4
		16	35,2	93,6	0,7	0,0	0,6	94,3	94,9
		32	26,5	95,3	0,7	0,0	0,5	95,9	96,5

as percentagens explicadas por estas três harmónicas excederam 1%; no ano de 1994 a 2ª harmónica explicou entre 2,4% e 2,9% da variância total e a 3ª e 4ª harmónicas explicaram entre 1,3% e 2,0%.

No solo Cb e no ano de 1994, os valores estimados pela 1ª harmónica ou pela soma das duas primeiras harmónicas sobrestimaram visivelmente os valores medidos nas 14ª e a 15ª décadas (Fig. 4.9b); em 1995 as variações não-periódicas mais evidentes no solo Pmg registaram-se entre a 10ª e a 12ª décadas e entre a 23ª e a 27ª décadas (Fig. 4.9a) e no solo Cb entre a 11ª e a 14ª décadas e entre a 23ª e a 27ª décadas (Fig. 4.9c). Estas variações não periódicas não são acomodadas por qualquer das 4 primeiras harmónicas correspondem à ocorrência de precipitação associada a variações da energia disponível à superfície e a variações do teor de humidade superficial dos solos.

Os resultados obtidos em ambos os solos mostram que o modelo sinusoidal simples (1ª harmónica) descreve satisfatoriamente a variação da temperatura do solo ao longo do ano. As flutuações não periódicas responsáveis pelas pequenas assimetrias observadas relativamente a este modelo dispensam a utilização da 2ª harmónica, só sendo provavelmente simuladas por harmónicas de ordem muito superior.

#### **4.3.2. Períodos de aquecimento**

O Quadro 4.18 apresenta as décadas em que ocorreram os máximos e mínimos térmicos medidos e os estimados com as várias harmónicas, e os correspondentes períodos de aquecimento (PAq), para os vários ciclos anuais e às várias profundidades. No solo Pmg (em 1995) o período de aquecimento medido variou entre 20 décadas (à superfície) e 22 décadas (2 cm e 8 cm); no solo Cb variou entre 18 décadas (2 cm e 4 cm) e 21 décadas (16 cm) em 1994 e entre 19 décadas (32 cm) e 23 décadas (à superfície e a 8 cm de profundidade) em 1995. À superfície do solo, o modelo sinusoidal simples (1ª harmónica, com um PAq de cerca de 18 décadas) subestima o período de aquecimento entre duas (solo Pmg – 1995) e cinco décadas (Cb – 1995) e em quatro décadas (solos Pmg e Cb – 1995) a 2 cm de profundidade; entre 2 (Cb – 1994) e 5 décadas (Cb – 1995) a 8 cm de profundidade, de 3 (Cb – 1994) a 4 décadas (Cb – 1995) a 16 cm, e em quatro décadas (Pmg – 1995 e Cb – 1995) a 32 cm. A adição da segunda harmónica nem sempre aproxima os PAq medidos dos estimados. Fá-lo em uma a duas décadas no solo Cb e no solo Pmg para o ano de 1995, mas no ciclo anual de 1994 (solo Cb) os resultados não foram idênticos ao longo do perfil: a 2 e a 4 cm de profundidade a combinação das 1ª e 2ª harmónicas aumentou relativamente à

**Quadro 4.18. Décadas do ano em que ocorreram valores térmicos extremos (máximos e mínimos) e períodos de aquecimento (PAq.), observados e estimados para os ciclos anuais nos solos Pmg e Cb, às profundidades indicadas.**

*Nota: \* o mínimo absoluto foi registado na 34ª década*

Prof. (cm)	Valores extremos (décadas)	Harmónicas	ANOS								
			Pmg (1995)			Cb (1994)			Cb (1995)		
			Mín	Máx	PAq.	Mín	Máx	PAq.	Mín	Máx	PAq.
0	Medido		1	21	20	-	-	-	1*	23	23
	Calc.	1ª Harmónica	2	20	18	-	-	-	2	20	18
		1 e 2ª Har.	1	21	20	-	-	-	1	21	20
		1ª,2ª e 3ª har.	2	21	19	-	-	-	1	21	20
		1ª,2ª,3ª e 4ª Har.	2	21	19	-	-	-	1	21	20
2	Medido		1	23	22	4	22	18	1	23	22
	Calc.	1ª Harmónica	2	20	18	2	20	18	2	20	18
		1 e 2ª Har.	1	21	20	1	22	21	1	21	19
		1ª,2ª e 3ª har.	2	21	19	2	22	20	1	21	19
		1ª,2ª,3ª e 4ª Har.	1	21	20	1	22	21	1	21	19
4	Medido		-	-	-	4	22	18	-	-	-
	Calc.	1ª Harmónica	-	-	-	2	20	18	-	-	-
		1 e 2ª Har.	-	-	-	1	22	21	-	-	-
		1ª,2ª e 3ª har.	-	-	-	2	22	20	-	-	-
		1ª,2ª,3ª e 4ª Har.	-	-	-	1	22	21	-	-	-
8	Medido		1	23	22	4	24	20	1	24	23
	Calc.	1ª Harmónica	2	20	18	3	21	18	2	20	18
		1 e 2ª Har.	1	21	20	1	22	21	1	21	20
		1ª,2ª e 3ª har.	2	21	19	2	22	20	2	21	19
		1ª,2ª,3ª e 4ª Har.	1	21	20	4	22	18	1	21	20
16	Medido		-	-	-	4	24	20	2	24	22
	Calc.	1ª Harmónica	-	-	-	3	21	18	3	21	18
		1 e 2ª Har.	-	-	-	1	22	21	2	22	20
		1ª,2ª e 3ª har.	-	-	-	2	22	20	2	22	20
		1ª,2ª,3ª e 4ª Har.	-	-	-	1	22	21	1	22	21
32	Medido		2	23	21	-	-	-	2	24	22
	Calc.	1ª Harmónica	3	21	18	-	-	-	3	21	18
		1 e 2ª Har.	2	22	20	-	-	-	2	22	20
		1ª,2ª e 3ª har.	3	22	19	-	-	-	2	22	20
		1ª,2ª,3ª e 4ª Har.	2	22	20	-	-	-	1	22	21

primeira as diferenças entre os PAq medidos e estimados, a 8 cm diminuiu as diferenças e a 16 cm de profundidade os PAq medidos e estimados foram semelhantes. A sobreposição da 3ª e da 4ª harmônicas não alterou significativamente estas diferenças, excepto na simulação relativa a 8 cm de profundidade do solo Cb e para o ano 1994 onde a adição da 3ª harmónica tornou idênticos os PAq medidos e estimados.

Contrariamente ao verificado nos ciclos diários, a assimetria resultante da duração do período de aquecimento medido ao longo do ano não parece limitar a utilização do modelo sinusoidal simples.

### **4.3.3. Amortecimento da onda térmica em profundidade**

#### **4.3.3.1. Atraso ou desfasamento de onda na ocorrência dos extremos térmicos ao longo do perfil**

A onda térmica anual propagou-se em profundidade com atraso crescente (Quadro 4.18). Entre 2 cm e 32 cm de profundidade de ambos os solos, o atraso na ocorrência dos extremos térmicos no ciclo anual de 1995 foi geralmente da ordem de uma década: entre a superfície e 8 cm de profundidade de ambos os solos, os mínimos térmicos ocorreram durante a mesma década (1ª década do ano) e, às profundidades maiores, uma década mais tarde; no solo Pmg, o máximo térmico registado a 2 cm de profundidade ocorreu com atraso de duas décadas relativamente à superfície (21ª década) enquanto que, entre 2 cm e 32 cm, os máximos térmicos foram registados na mesma década; no solo Cb, os máximos ocorreram entre a 23ª (à superfície e a 2 cm) e a 24ª décadas (às profundidades maiores). Em 1994 (solo Cb), entre a ocorrência do máximo térmico a 2 cm (22ª década) e a 16 cm de profundidade o atraso foi de 2 décadas enquanto os mínimos foram registados durante a mesma década (4ª década). em todo o perfil térmico. As diferenças entre os valores medidos e os estimados são geralmente inferiores a 3 décadas no solo Pmg e da ordem das 3 décadas no solo Cb.

Tomando a década como unidade de tempo, os resultados parecem indicar que os atrasos na propagação em profundidade da onda térmica anual não são significativamente influenciados pelo tipo de solo.

#### **4.3.3.2. Amplitudes térmicas**

A Figura 4.10 mostra os perfis térmicos medidos em ambos os solos para as segundas décadas de cada mês, ao longo dos ciclos anuais. Em qualquer destes ciclos as amplitudes térmicas anuais decresceram ligeiramente em profundidade, muito menos

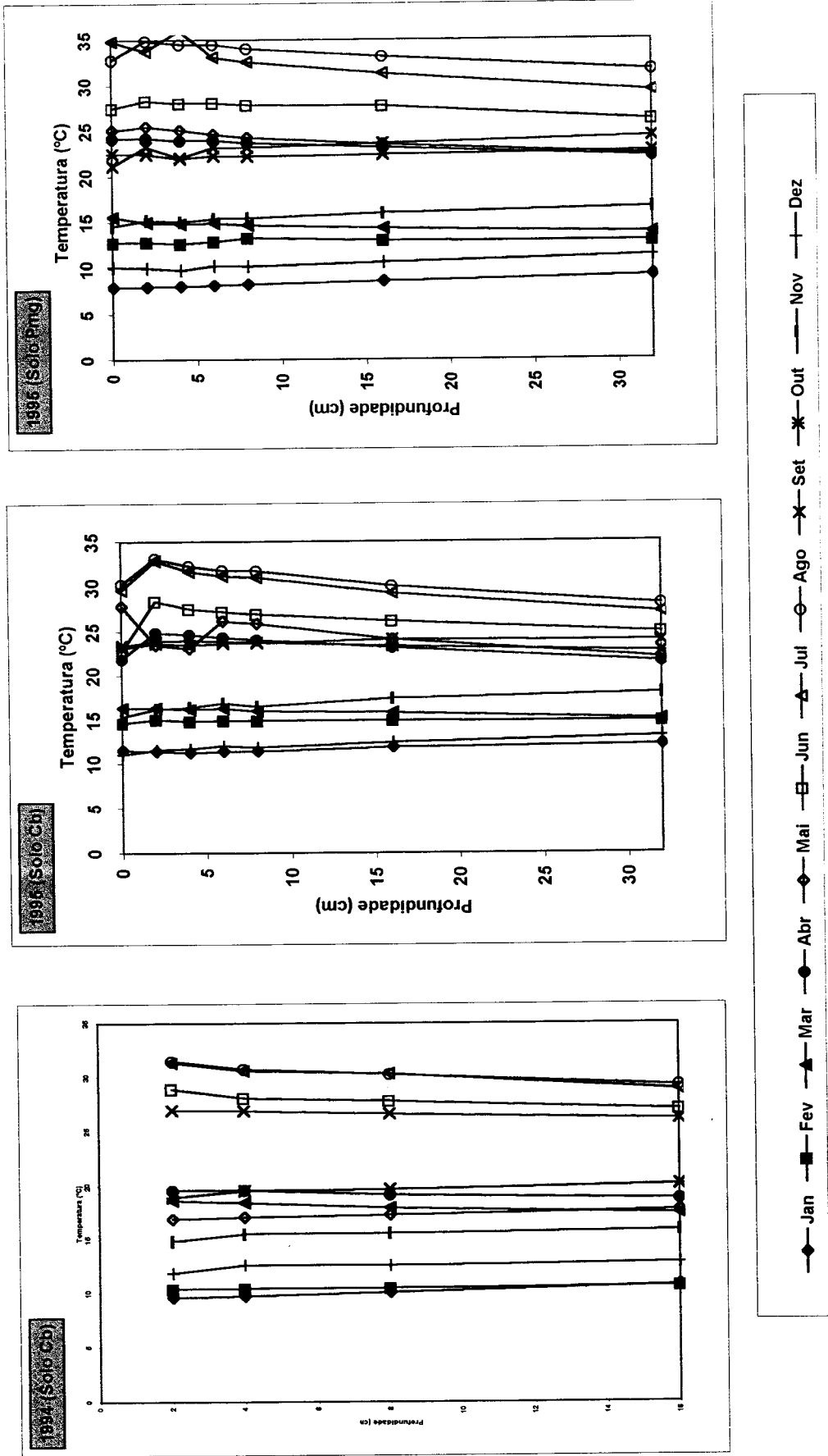


Fig 4.10. Perfis térmicos medidos em 1994 (Solo Cb), 1995 (Solo Cb) e 1995 (Solo Pmg). Nota: Atenção à escala das profundidades em 1994, no solo Cb, que é diferente das restantes

que o decréscimo observado para o ciclo diário. As amplitudes térmicas ao longo do perfil do solo Pmg foram maiores que no solo Cb. Em 1995 as amplitudes térmicas variaram, no solo Pmg, entre cerca de 27,5°C à superfície e 22°C a 32 cm de profundidade enquanto que no solo Cb variaram entre 21,5°C e 16°C, respectivamente. Em ambos os solos, as amplitudes térmicas foram maiores a 2 cm de profundidade que à superfície, provavelmente devido aos problemas de medição da temperatura à superfície referidos para o ciclo diário. Em 1994, as amplitudes térmicas variaram entre cerca de 22,5°C a 2 cm e 19°C a 32 cm de profundidade.

Para qualquer dos ciclos anuais estudados, os valores das semi-amplitudes estimadas para a 1ª harmónica (Quadro 4.19) decresceram entre 2 e 32 cm de profundidade: nos ciclos anuais de 1995 variaram entre 11,3°C e 9,6°C no solo Pmg e entre 9,8°C e 7,1°C no solo Cb; em 1994 (Solo Cb), variaram entre 10,2°C a 2 cm e 8,8°C a 16 cm de profundidade

#### **4.3.4. Profundidade de amortecimento no ciclo anual**

##### **4.3.4.1. Profundidade de amortecimento a partir das amplitudes térmicas medidas**

Foram estabelecidas regressões lineares entre os logaritmos das amplitudes térmicas anuais medidas e as correspondentes profundidades para PT1 e PT2 e PT3 (Quadro 4.20). As regressões nos dois solos foram estatisticamente significativas a um nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05, pelo que o decréscimo das amplitudes térmicas anuais ao longo do perfil foi exponencial. Os valores de  $D_m$  foram maiores no solo Pmg que no solo Cb em qualquer dos perfis considerados. As profundidades de amortecimento a partir das amplitudes térmicas medidas no solo Pmg nos perfis PT1 e PT2 (respectivamente 166,7 cm e 147,1 cm) são compatíveis com a gama de valores referida por de Vries (1975), Monteith e Unsworth (1990) ou por Hillel (1998), ( $\sqrt{365} = 19$  vezes os valores de  $D$  diária, isto é, entre 152 cm e 304 cm); ao invés, as restantes estimativas (no solo Cb e em PT3 do solo Pmg) foram visivelmente inferiores à gama apresentada por estes autores. As diferenças entre os valores de  $D_m$  estimados nos dois solos variaram entre 66,7 cm (em PT1) e 37,8 cm (em PT3) e foram significativas para um nível de probabilidade de 99%. Em cada solo, os valores de  $D_m$  foram maiores em PT1 e menores em PT3: no ciclo anual de 1995, as diferenças entre  $D_m(PT1)$  e  $D_m(PT3)$  foram de 47,6 cm no solo Pmg e de 18,7 cm no solo Cb. Os diferentes valores de

**Quadro 4.19. Semi-amplitudes (C, em °C) e ângulo de fase ( $\pi$  radianos) das duas primeiras harmónicas ajustadas à variação da temperatura a várias profundidades nos solos Pmg e Cb, em três ciclos anuais (1994 no solo Cb; 1995 nos solos Pmg e Cb).**

Profundidade (cm)	Coeficiente	Solos		
		Pmg	Cb	
		1995	1994	1995
		Harmónica		
		1ª	1ª	1ª
0 cm	C	10,6	-	8,6
	Ang.fase	1,42	-	1,38
2 cm	C	11,3	10,2	9,8
	Ang.fase	1,39	1,34	1,38
4 cm	C	11,1	9,6	9,3
	Ang.fase	1,39	1,31	1,36
6 cm	C	11,1	-	9,0
	Ang.fase	1,37	-	1,36
8 cm	C	10,9	9,4	9,0
	Ang.fase	1,36	1,29	1,36
16 cm	C	10,4	8,8	8,1
	Ang.fase	1,32	1,27	1,30
32 cm	C	9,6	-	7,1
	Ang.fase	1,24	-	1,20



$D_m$  calculados para PT2 e para PT3 relativos ao ano de 1995 indicam que a velocidade de propagação da onda térmica anual é menor até 16 cm de profundidade e maior na camada subjacente: as diferenças foram de 28 cm no solo Pmg e de 15 cm no solo Cb.

**QUADRO 4.20. Profundidades de amortecimento da onda térmica ( $D_m$ , em cm) para o perfil completo (PT1) e para os perfis parciais (PT2 e PT3) nos ciclos anuais indicados, obtidas a partir das regressões entre amplitudes térmicas medidas e profundidades (eq. 2.25).  $R^2$  é o coeficiente de determinação de cada regressão**

SOLOS	ANO	PT1		PT2		PT3	
		$D_m$	$R^2$	$D_m$	$R^2$	$D_m$	$R^2$
Pmg	1995	166,7	0,91	147,1	0,99	119,1	0,996
	1994	-	-	-	-	94,3	0,98
Cb	1995	100,0	0,98	96,2	0,99	81,3	0,98

#### 4.3.4.2. Profundidade de amortecimento a partir da análise harmónica

As profundidades de amortecimento ( $D_c$ ) para os ciclos anuais de 1994 (Solo Cb) e 1995 (Solos Pmg e Cb) foram calculadas a partir das regressões estabelecidas entre as semi-amplitudes térmicas anuais estimadas para a 1ª harmónica e as respectivas profundidades (Eq. de Amplitude) (Quadro 4.21). Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram elevados e as regressões significativas para um nível de probabilidade de 95%.

Nos ciclos anuais estudados,  $D_c$  sobrestimou  $D_m$  em ambos os solos. As diferenças entre  $D_c$  e  $D_m$  foram maiores no solo Pmg que no solo Cb e menores nos PT3 que nos restantes perfis térmicos (PT1 e PT2). Em PT1,  $D_c$  foi superior a  $D_m$  em cerca de 50 cm no solo Pmg (1995) e em cerca de 20 cm no solo Cb (1995) enquanto que em PT2 foi superior em 35 cm no solo Pmg (1995) e em 3 cm no solo Cb (1995); em PT3 foi superior em 45 cm no solo Pmg (1995), em 11 cm no solo Cb em 1994 enquanto que em 1995,  $D_m$  e  $D_c$  foram iguais no solo Cb.

**QUADRO 4.21. Profundidades de amortecimento da onda térmica ( $D_c$ , em cm) para o perfil completo (PT1) e para os perfis parciais (PT2 e PT3) nos ciclos anuais indicados, obtidas a partir das regressões entre amplitudes térmicas estimadas para a 1ª harmónica e respectivas profundidades (eq. 2.25).  $R^2$  é o valor do coeficiente de determinação associado de cada regressão**

SOLO	ANO	PT1		PT2		PT3	
		$D_c$	$R^2$	$D_c$	$R^2$	$D_c$	$R^2$
Pmg	1995	217,4	0,81	181,8	0,995	163,9	0,99
	1994	-	-	-	-	105,3	0,94
Cb	1995	119,0	0,80	99,0	0,98	81,3	0,96



## 5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

### 5.1 . Estabelecimento das culturas

Em culturas anuais, o sucesso do estabelecimento de uma população de plantas requer que a germinação, a emergência e a formação inicial do coberto vegetal sejam rápidas e uniformes e que o número de plantas seja suficientemente elevado. Os resultados obtidos mostraram que a velocidade e a dispersão de cada uma das fases de desenvolvimento das culturas (germinação, emergência e produção de folhas) são influenciadas pela temperatura e pela humidade do solo, assim como a germinação e a emergência finais e o crescimento foliar. Mostraram também que o tipo de solo influencia directamente a velocidade e a dispersão da emergência, assim como a produção e o crescimento foliares.

#### 5.1.1 Influência da temperatura no estabelecimento das culturas

A influência da temperatura no estabelecimento é discutida com base nos resultados obtidos em condições hídricas no solo consideradas favoráveis.

##### 5.1.1.1. Dimensão da germinação e emergência

O sucesso do estabelecimento requer emergências finais superiores aos mínimos agronomicamente aceitáveis (*m.a.a.*). De uma forma geral, as emergências finais mantiveram-se elevadas até temperaturas médias da ordem de 18-19°C entre as culturas outono-invernais e de 20-21°C entre as culturas primaveris, mas decresceram para temperaturas superiores e, para algumas culturas, diminuíram também a temperaturas próximas da temperatura-base correspondente (Figs.3.4 e 3.11). A gama de temperaturas ao longo da qual a germinação e a emergência finais permaneceram elevadas foi mais extensa para a germinação que para a emergência. Como a germinação foi estudada a temperaturas constantes enquanto que a emergência foi analisada no campo, a temperaturas flutuantes, a redução desta gama na emergência pode ser apenas devida à exposição das sementes e/ou das plântulas pré-emergentes ao efeito negativo de temperaturas instantâneas elevadas, superiores à temperatura óptima de germinação,  $T(G)_{opt}$ , ou à temperatura máxima que garante uma germinação elevada,  $T(G)'_m$ . De facto, as diferenças entre  $T(G)'_m$  e a temperatura média acima da qual a  $E_f$  é inferior aos *m.a.a* ( $T(E)'_m$ ) parecem aumentar com o tempo de exposição.

Para temperaturas médias incluídas nos respectivos intervalos sub-óptimos, a germinação e a emergência acumuladas ao longo do tempo térmico são descritas satisfatoriamente por uma curva Normal Cumulativa, isto é, a distribuição dos respectivos tempos térmicos em torno dos seus valores mais prováveis ( $\theta_1$  para  $0,5G_f$  ou para  $0,5E_f$ ) é aproximadamente Normal (Figs. 3.3 e 3.16). A dispersão dos tempos térmicos foi maior para a emergência que para a germinação (Quadros 3.3 e 3.9), e em qualquer caso, a análise *probit* pareceu ajustada à descrição da dispersão, quer da germinação quer da emergência.

#### 5.1.1.2. Temperaturas cardinais

As temperaturas cardinais estimadas para as diferentes fases do estabelecimento não foram significativamente diferentes ao longo das diferentes fracções da população. Por isso, os lotes usados ao longo das diferentes experiências terão sido homogêneos (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982a), não sendo evidente qualquer polimorfismo somático (Mayer e Poljakoff-Mayber, 1975) ou diferentes graus de dormência entre as sementes (Thompson e Fox, 1976).

#### Temperatura-base

Os resultados sintetizados no Quadro 5.1 mostraram que a  $T_{base}$  pode ser considerada conservativa ao longo do estabelecimento, tal como os resultados obtidos por Garcia-Huidobro *et al.* (1982a) e por Mohamed *et al.* (1988a) no estudo do milho painço, por Slafer e Savin (1991) no estudo do trigo, por Ellis *et al.* (1986b) no estudo de diferentes leguminosas, entre as quais o grão de bico e a fava, e por Washitani (1985) para *Geranium carolinianum* L.. Contudo, resultados obtidos por Leong e Ong (1983) para o amendoim, por Fyfield e Gregory (1989) no estudo de uma variedade de feijão (*Vigna radiata* L), por Lawlor *et al.* (1990) para diferentes genótipos de sorgo, ou por Angus *et al.* (1981a) e por Hsu e Nelson (1986) para um número significativo de culturas agrícolas, indicaram valores de  $T(E)_{base}$  superiores aos valores estimados para  $T(G)_{base}$ . Estes autores justificam as diferenças obtidas por quebras devidas a patogénicos e/ou à exaustão de reservas. Contudo, Leong e Ong (1983) classificam os valores obtidos para as  $T_{base}$  de emergência como anómalos enquanto Angus *et al.* (1981a) e Lawlor *et al.* (1990) sugerem o uso da  $T_{base}$  de emergência para a estimativa de fases posteriores do desenvolvimento.

A conservação dos valores da  $T_{base}$  ao longo do estabelecimento (Quadro 5.1) permite usar um valor único para cada cultura (1,9°C, 3,5°C, 1,5°C, 1,2°C, 4,6°C, 7,3°C e 9,8°C são os valores médios das  $T_{base}$  das várias fases, respectivamente da ervilha,

Quadro 5.1. Temperaturas-base (em °C) para a germinação, a emergência e o aparecimento das primeiras cinco folhas das diferentes culturas e correspondentes valores médios ( $T_{base}$  de estabelecimento). As temperaturas-base para a germinação e para a emergência são as médias estimadas para os decis estudados (20%, 50% e 80% de sementes germinadas e 50% e 80% das plântulas emergidas); para o aparecimento de folhas, são as médias das temperaturas-base estimadas para cada uma das primeiras cinco folhas.

Culturas	Temperatura-base (°C) (Germinação)	Solo		Temperatura-base (°C)		$T_{base}$ (°C) comum durante o estabelecimento
		Pmg	Cb	Emergência	Produção de folhas	
Ervilha	2,1	Pmg	-1,9	0,6	1,9	
		Cb	5,1	3,5		
Tremocilha	2,3	Pmg	0,8	-	3,5	
		Cb	5,8	-		
Grão	-2,3	Pmg	0,8	-	1,5	
		Cb	5,9	-		
Fava	-1,7	Pmg	1,3	1,3	1,2	
		Cb	3,4	1,9		
Girassol	4,0	Pmg	3,4	-	4,6	
		Cb	5,3	5,5		
Milho	9,0	Pmg	6,8	6,7	7,3	
		Cb	7,6	6,3		
Sorgo	9,0	Pmg	10	-	9,8	
		Cb	11	9,3		

tremocilha, grão, fava, girassol, milho e sorgo), além de simplificar o cálculo do tempo térmico (Leong e Ong, 1983). Contudo, a assunção da hipótese de uma  $T_{base}$  comum para as diferentes fases do estabelecimento requer a realização de mais experiências, seja porque as amplitudes dos intervalos de confiança (para 95% de probabilidade) foram bastante amplas, sobretudo as relativas às  $T(E)_{base}$ , seja porque as diferenças entre as  $T(E)_{base}$  obtidas no solo Cb e as correspondentes  $T(G)_{base}$  foram, para qualquer das culturas outono-invernais, iguais ou superiores a 3,0°C, sendo mesmo estatisticamente significativas no caso do grão.

### **Temperatura óptima**

Não foi possível estimar temperaturas óptimas de emergência nem de produção de folhas de qualquer das culturas estudadas (secções 3.3.2.3 e 3.4.2). Contudo, as temperaturas médias do solo a que foram medidas as  $R_{máx}$  de emergência ou de produção de folhas de cada cultura (chamemos-lhes  $T_{opt}$  medidas) foram menores que as correspondentes  $T(G)_{opt}$  e foram aparentemente diferentes nos solos Pmg e Cb. Nas culturas outono-invernais, estas diferenças variaram entre 3°C e 12°C no solo Pmg e entre 2°C e 9°C no solo Cb e atingiram 10°C a 15°C entre as culturas primaveris (10-11°C no solo Pmg e entre 11°C e 15,5°C no solo Cb).

Os resultados mostraram (secção 3.3.2.1) que o aumento das amplitudes térmicas atrasa a emergência de uma cultura se o curso térmico daí resultante incluir temperaturas instantâneas inferiores à respectiva  $T_{base}$  ou tempos de exposição a temperaturas excessivamente elevadas relativamente à temperatura óptima. Mostraram também que o atraso da emergência parece aumentar com a amplitude térmica, o que acontece sobretudo se as temperaturas médias forem próximas da  $T(G)_{opt}$ , devido ao aumento do tempo de exposição a temperaturas elevadas superiores à  $T(G)_{opt}$ . Logo, a temperatura óptima de emergência e as amplitudes dos intervalos térmicos sub-óptimo e supra-óptimo de emergência parecem depender da oscilação da temperatura durante o dia.

As amplitudes térmicas variam com o regime térmico dos solos e, em cada solo, com a profundidade (secção 4.2.3.2). O tempo de exposição da plântula a temperaturas elevadas aumenta à medida que o caulículo/coleótilo se alonga em direcção à superfície, devido ao aumento das amplitudes térmicas. Logo, as  $T_{opt}$  medidas para a emergência (ou para a produção de folhas) variam consoante o regime térmico dos solos, não sendo por isso fácil definir uma temperatura óptima de emergência (ou de produção de folhas) característica de cada cultura. Admite-se por isso que as diferenças

entre as  $T(E)_{\text{opt}}$  medidas para a emergência (ou para a produção de folhas) e as  $T(G)_{\text{opt}}$  sejam tanto maiores quanto maiores forem as amplitudes diárias (isto é, quanto maior for o tempo de exposição da plântula a temperaturas extremas). Nestas condições, é possível aumentar aparentemente a  $T(E)_{\text{opt}}$  medida através da redução das amplitudes térmicas, nomeadamente através do aumento da profundidade de sementeira, de irrigação ou do uso, onde apropriado, de técnicas de controle térmico exequíveis. Estas práticas podem ser úteis em regiões mediterrâneas, onde as amplitudes térmicas diárias à superfície do solo são por vezes apreciáveis nas épocas normais de sementeira das culturas primaveris (durante o período experimental foram frequentemente superiores a 20°C no solo Pmg e a mais de 15°C no solo Cb), contribuindo para garantir um estabelecimento adequado das culturas.

### **Temperatura máxima**

Foram obtidos valores para a  $T(G)_{\text{máx}}$  mas não foi possível obter os das  $T(E)_{\text{máx}}$  e  $T(F)_{\text{máx}}$  (secções 3.3.2.3 e 3.4.2). A qualidade do ajustamento linear entre taxa de germinação e temperatura foi sistematicamente mais elevada no intervalo sub-ótimo que no intervalo supra-ótimo porque neste, os pontos regredidos referem-se a taxas obtidas a partir de germinações finais que decrescem com a temperatura. Assim, a dificuldade em obter uma estimativa altamente significativa de  $T(G)_{\text{máx}}$  parece limitar o uso dos valores obtidos, nomeadamente em estudos sobre o efeito das temperaturas elevadas na emergência ou na produção de folhas. Além disso, a qualidade do ajustamento linear entre taxa e temperatura para temperaturas médias superiores à  $T(E)_{\text{opt}}$  medida é ainda menor que o relativo à germinação (secções 3.1.2.1 e 3.3.2.2), sobretudo devido a problemas associados às amplitudes térmicas. Por estas razões é difícil obter em pleno campo resultados de emergência fiáveis para temperaturas médias na gama supra-ótima, assim como estimativas razoáveis de  $T(E)_{\text{máx}}$  (e provavelmente de  $T(F)_{\text{máx}}$ ).

#### **5.1.1.3. Tempo térmico**

Cada fase de desenvolvimento incluída no estabelecimento das culturas (germinação, emergência e produção de folhas) pode ser analisada, em condições hídricas favoráveis, com base no conceito de um tempo térmico constante, (i.e, as culturas desenvolvem-se ao longo do tempo cronológico a uma taxa que é modificada pela temperatura). A partir do conhecimento dos tempos térmicos de germinação, emergência e produção de folhas é possível simular o estabelecimento de uma cultura e



integrar esta simulação em modelos de desenvolvimento que compreendem todo ou parte do respectivo ciclo vegetativo.

O Quadro 5.2 resume os valores dos tempos térmicos mais prováveis de cinco das culturas estudadas, para a germinação,  $\theta_1(G)$ , e a emergência,  $\theta_1(E)$ , o início da produção e da expansão foliares, a produção da primeira  $\theta(F_1)$  e da quinta folhas  $\theta(F_5)$  em condições hídricas não limitantes. Os Quadros 3.1 e 3.6 mostram também os valores dos tempos térmicos da germinação e da emergência para a tremocilha e para o grão. A análise dos quadros mostra que os tempos térmicos variam com a cultura e com o tipo de solo; além disso, a sequência cronológica das diferentes fases não é idêntica para todas as culturas (ver secção 5.1.3 e 5.1.4).

Os valores de  $\theta(G)_i$  estimados para 50% da população germinada foram, de uma forma geral, menores que os obtidos por diversos autores para as mesmas culturas: grão (Ellis *et al.*, 1986b), fava (Bierhuizen e Wagenvoort, 1974; Ellis *et al.*, 1987c), girassol (Abreu *et al.*, 1994), milho (Itabari *et al.*, 1993; Abreu *et al.*, 1994), sorgo (Lawlor *et al.*, 1990) e ervilha (Bierhuizen e Wagenvoort, 1974). Contudo, são dificilmente comparáveis os valores obtidos neste trabalho e os obtidos por estes autores, seja porque as medições se referem a uma percentagem de sementes germinadas relativamente ao total semeado e não ao total germinado, seja porque se referem a 100% de sementes germinadas, porque foram usadas diferentes variedades ou ainda porque foram diferentes os critérios de medição ou o substracto usados. Por exemplo, Itabari *et al.* (1993) consideraram uma semente germinada quando a radícula atingiu 5 mm de comprimento e Bierhuizen e Wagenvoort (1974) quando foram visíveis os cotilédones, enquanto Lawlor *et al.* (1990) usaram 11 variedades de sorgo e mediram o tempo  $t$  entre a sementeira e a germinação da última semente.

Os tempos térmicos obtidos para a emergência do milho e do sorgo são comparáveis aos referenciados em diferentes trabalhos: para a emergência mais provável do milho, Warrigton e Kanemasu (1983) obtiveram um  $\theta_1$  de  $62,5 \pm 5,4^\circ\text{Cd}$ , enquanto Kanemasu *et al.* (1975) obtiveram, para diferentes variedades de sorgo, valores de  $\theta_1$  entre  $58,2^\circ\text{Cd}$  e  $72,9^\circ\text{Cd}$  e Itabari *et al.* (1993), para diferentes profundidades de sementeira do milho e teores iniciais de humidade do solo, obtiveram valores de  $\theta_1$  entre  $87,6^\circ\text{Cd}$  e  $131,3^\circ\text{Cd}$ .

Quadro 5.2. Tempos térmicos (em °Cd desde a sementeira) para a germinação de 50% do total de sementes germinadas, a emergência nos solos Pmg e Cb (50% do total de plântulas emergidas), o início da produção foliar e da expansão foliar e a produção da 1ª e da 5ª folhas nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa), para as culturas indicadas. \* os tempos térmicos para a produção da 5ª folha foram calculados a partir dos tempos térmicos para a produção da 1ª folha e dos valores do filocrão; (1) 1º par de folhas; (2) 3º par de folhas

Culturas	T. térmico (°Cd)		Tempo térmico (°Cd)					Filocrão (°Cd)
	Germinação (0,5G <sub>t</sub> )	Solo	Emergência (0,5E <sub>t</sub> )	Início da produção foliar	Início da expansão foliar	Produção de folhas 1ª	5ª	
Ervilha	24	Pmg	137	139,7	172	244	357	56
		Cb	76	85,6	141	149	370	59
Fava	50	Pmg	137	135,4	194	227	526	69
		Cb	125	113,9	197	213	370	67
Girassol	29	Pmg	127	82,8	135	135 <sup>(1)</sup>	224 <sup>(2)</sup>	22
		Cb	89	70,3	150	147 <sup>(1)</sup>	302 <sup>(2)</sup>	39
Milho	19	Pmg	95	47,5	143	133*	404	68
		Cb	76	54,5	123	149*	459	78
Sorgo	13	Pmg	72	15,1	79	74*	258	46
		Cb	48	13,6	90	69*	307	60

A acumulação de temperatura entre diferentes fases do estabelecimento varia com o tipo de cultura e, para cada cultura, varia com o tipo de solo (Quadro 5.2): por exemplo, entre a germinação e a emergência, o girassol necessita de acumular 98°Cd no solo Pmg e 60°Cd no solo Cb enquanto o sorgo necessita, respectivamente, de 76°Cd e 57°Cd; entre a emergência e a produção da 1ª folha (ou do primeiro par de folhas), o girassol necessita de acumular 8°Cd no solo Pmg e 58°Cd no solo Cb e o sorgo necessita, respectivamente, de 2°Cd e 20°Cd. De uma forma geral, é necessário acumular menos temperatura entre a germinação e o início da produção foliar que entre este e a produção da primeira folha, sendo esta tendência mais nítida nas gramíneas (no caso do sorgo, de 1°C a 2°Cd entre a germinação e o início da produção foliar e de 55°Cd a 59°Cd entre este início e a produção da 1ª folha e, no caso do milho, de 29°Cd a 36°Cd na 1ª etapa e de 85°C a 94°Cd na 2ª etapa) que nas restantes culturas (por exemplo, no caso do girassol, de 41°C a 54°Cd entre a germinação e o início da produção foliar e de 52°Cd a 74°Cd entre este início e a produção da 1ª folha, enquanto que a ervilha acumula entre 62°Cd e 116°Cd na 1ª etapa e entre 63°C e 104°Cd na 2ª etapa).

Por outro lado, os tempos térmicos do início da expansão e da produção foliares, assim como da produção da 1ª e da 5ª folhas parecem menos dependentes do tipo de solo que os tempos térmicos de emergência (Quadro 5.2); por exemplo, os tempos térmicos da produção da primeira folha da fava e das culturas primaveris são ligeiramente maiores no solo Cb que no solo Pmg (as diferenças não ultrapassaram 16°Cd), enquanto que o tempo térmico de emergência é, para todas as culturas, substancialmente maior no solo Pmg que no solo Cb (as diferenças estimadas variaram entre cerca de 19°Cd no caso do milho e cerca de 60°Cd no caso da ervilha). Estes resultados indicam que qualquer atraso ocorrido até à emergência devido ao tipo de solo parece ser “recuperado” até à produção da primeira folha, parecendo relativizar a importância para o sucesso do estabelecimento da velocidade da emergência relativamente à da velocidade de produção da primeira folha e do filocrão.

Numa população homogénea ( $T_{base}$  única) os tempos térmicos de germinação variam com as diferentes fracções germinadas, isto é, as sementes constituintes não germinam simultaneamente. Desta forma, a população é protegida contra flutuações acidentais do ambiente térmico (Washitani, 1985), correspondendo assim a uma estratégia de sobrevivência das espécies (Hsu *et al.*, 1984).

A qualidade do ajustamento *probit* para descrever a progressão da germinação acumulada em função do tempo térmico foi elevada para as várias culturas, confirmando os resultados obtidos por Covell *et al.* (1986a) e por Ellis *et al.* (1986b, 1987c) para a fava e para o grão de bico. A exclusão de séries relativas a temperaturas próximas da  $T(G)_{base}$  diminuiu o desvio-padrão dos tempos térmicos de germinação e melhorou substancialmente a qualidade deste ajustamento. Por isso, é razoável admitir a existência de uma temperatura  $T(G)_{base}$  a partir da qual o desvio-padrão de  $\theta$  não varia significativamente, enquanto a qualidade do ajustamento *probit* se mantém elevada. Acima de  $T(G)_{base}$  a dispersão da germinação é mínima, o que garante maior uniformidade no comportamento de uma população de sementes.

A qualidade do ajustamento *probit* para o curso da emergência acumulada foi boa, mas inferior à qualidade do ajustamento para o curso da germinação acumulada. Para algumas culturas, o modelo *probit* descreve satisfatoriamente o curso da emergência, se o tempo térmico e a temperatura (média) forem tomadas como variáveis independentes e não apenas o tempo térmico. Provavelmente a temperatura indica, para cada experiência, a acção de diversos factores que afectam em grau diverso a linearidade da relação taxa de emergência/temperatura (nomeadamente as temperaturas próximas da temperatura-base, a amplitude de temperaturas associada a cada temperatura média ou factores associados a experiências efectuadas em pleno campo).

Trabalhos futuros deverão avaliar a sensibilidade do modelo *probit* a diversos factores que possam afectar a linearidade entre taxa de emergência e temperatura, nomeadamente os efeitos do teor de água no solo ou da exposição das sementes e plantas pré-emergentes a temperaturas elevadas. Desta forma se poderá avaliar com mais rigor, através da dispersão dos tempos térmicos, os intervalos térmico e hídrico ao longo dos quais a uniformidade do estabelecimento é máxima.

### **5.1.2. Influência da humidade do solo no estabelecimento**

Os resultados mostraram que o estabelecimento das diferentes culturas é marcadamente afectado por teores extremos de humidade do solo, sobretudo por situações de deficiência hídrica.

#### **Emergência**

Ao longo de uma gama de humidades mais ou menos extensa, variável com o tipo de solo e com o tipo de cultura, as emergências são rápidas e elevadas (Fig. 3.15 e 3.17); teores de água no solo próximos do Coeficiente de Emurchecimento reduzem as

taxas de emergência, diminuem a  $T_{base}$  de emergência e aumentam o tempo térmico de emergência (Figuras 3.12 e 3.15); teores de humidade inferiores a 50% da C.U. são responsáveis pela diminuição da emergência final (Fig. 3.17) e aumentam o tempo que decorre entre a emergência das 1<sup>as</sup> e das últimas plântulas (Fig. 3.11) Teores de humidade superiores à Capacidade de Campo aumentaram ligeiramente o tempo térmico de emergência das diferentes culturas, sobretudo no solo Cb, mas não parecem afectar a emergência final (Figuras 3.15 e 3.17). Os resultados parecem indicar que os teores de água do solo à sementeira ou durante o período de germinação caracterizam melhor as condições hídricas do solo durante a emergência que teores médios de humidade medidos desde a sementeira à emergência, i.e., mostram que a germinação é mais sensível às variações de humidade do solo que o alongamento do caulículo/coleóptilo em direcção à superfície. No intervalo sub-ótimo de temperaturas, os tempos térmicos da emergência foram menores entre cerca de 50% da C.U. e a C.C. e, de uma forma geral, menos variáveis que nos extremos da gama de humidades. Estes resultados são semelhantes aos obtidos por Rao e Dao (1987) para a emergência de cinco cultivares de *Brassica sp.* à temperatura de 7,5°C e para cinco níveis de humidade do solo (entre -10kPa e -500kPa), por Feddes (1971) para a emergência de rabanetes, espinafres e favas, cujos tempos térmicos cresceram rapidamente para teores de humidade inferiores a cerca de 70% da C.C., e por Abreu e Clark (1993) no estudo do amendoim, cujos tempos térmicos foram independentes da temperatura do solo e do teor de humidade do solo para teores de humidade acima de 40-45% da C.C. e para temperaturas do solo entre 20°C e 32°C. Por outro lado, não foi evidente a existência de um teor de humidade do solo óptimo correspondente a um tempo térmico mínimo da emergência.

As estimativas da temperatura-base da emergência de culturas para quaisquer condições hídricas do solo foram estatisticamente menos significativas e foram inferiores às obtidas em condições hídricas não limitantes, sugerindo uma melhor tolerância das espécies a temperaturas mais baixas quando a humidade é deficitária durante o tempo de emergência, i.e., as plântulas compensam o aumento do *stress* hídrico pela diminuição de exigências térmicas mínimas (Livingston e de Jong, 1990).

As condições hídricas deficientes são frequentes nas condições agrometeorológicas mediterrâneas e não garantem nem emergências rápidas, nem um elevado grau de cobertura do solo ou uma cobertura uniforme deste. As condições hídricas deficientes estão geralmente associadas à ocorrência de temperaturas médias

elevadas na camada mais superficial do solo e de amplitudes térmicas frequentemente consideráveis. O controle hídrico do solo é por isso indissociável do controle térmico do solo. A deficiência hídrica pode ser superada com o recurso a dotações de rega que mantenham durante o período de germinação no solo (fase mais sensível às variações do teor de água no solo), teores de água incluídos na gama óptima de humidades intermédia, e que simultaneamente conduzem à redução da temperatura média e das amplitudes térmicas do solo.

Estudos futuros deverão quantificar, para cada cultura, a gama de humidades que em cada solo garanta simultaneamente tempos térmicos mínimos de emergência e, com recurso a *análise probit*, uma dispersão mínima da emergência.

### **Produção e expansão foliares**

Teores de água no solo próximos do Coeficiente de Emurchecimento reduzem as taxas de produção de folhas (Fig. 3.19), atrasam, ou limitam em situações extremas, o crescimento foliar (Fig. 3.21), aumentam o filocrão das diferentes culturas (Fig. 3.20 e Quadro 3.16); teores de humidade inferiores a 50% da C.U., quando persistentes, são responsáveis pela diminuição do número de folhas produzidas e aumentam o tempo que decorre entre a produção da 1ª folha e a da 5ª folha (Fig. 3.18 e ANEXO A). Teores de humidade superiores à Capacidade de Campo não parecem afectar a produção de folhas e o crescimento foliar (ANEXO A).

Após a emergência, a relação entre o teor médio de água no solo e a produção e a expansão foliares foi menos clara (sobretudo a relação entre a humidade no solo e a área foliar) que a relação entre o teor de humidade do solo e a emergência. São disto exemplo, a variabilidade das respostas das culturas ao longo das respectivas populações. Embora os efeitos negativos da falta de água sejam visíveis em qualquer caso, nem sempre os menores crescimentos foliares para diferentes culturas corresponderam aos mais baixos teores de água no solo. Provavelmente, as plântulas em *stress* hídrico crónico evoluem ao longo do tempo sem desvios bruscos tanto na produção de folhas como na área foliar enquanto que a evolução da produção e do crescimento foliar das plântulas que sofrem *stress* hídrico momentâneo pode sofrer desvios bruscos, sobretudo na área foliar (Kramer e Kozlowki; 1960; Larcher, 1977; Milthorpe, e Moorby, 1979; Hsiao *et al.*, 1985)

Estudos futuros, em ambiente controlado, devem avaliar a influência de diferentes variações do teor de água no solo desde a sementeira ao fim do

estabelecimento. A gama hídrica imposta deve incluir, sobretudo, teores médios de humidade que se revelaram restritivos à emergência e à produção e crescimento foliares.

### **5.1.3. Influência do tipo de solo no estabelecimento**

Os resultados mostraram que o tipo de solo influencia características importantes do estabelecimento das culturas, quer da emergência, quer da produção e da expansão foliares: os tempos térmicos da emergência e da produção de folhas, sobretudo das primeiras folhas (Quadro 5.2), as taxas de emergência (Fig. 3.13), o valor do filocrão (Fig. 3.20 e Quadro 3.14), a dispersão da emergência (Fig. 3.16) e a forma como o tempo térmico de emergência varia em função do teor de água no solo (Fig. 3.15). A influência do tipo de solo foi mais visível no comportamento de algumas das culturas que no de outras, em parâmetros do estabelecimento como a emergência final (Fig. 3.17), a expansão foliar (Quadro 3.16) ou as temperaturas-base de emergência e de produção de folhas (Quadros 5.1). Contudo, para a maioria das culturas, o tipo de solo parece influenciar menos a produção e a expansão foliares que a emergência (Quadro 5.2); por outro lado, o tipo de solo não parece influenciar a temperatura-base para a produção de folhas (Quadro 5.1).

De uma forma geral, a emergência é mais favorecida no solo Cb que no solo Pmg quando as condições hídricas no solo são favoráveis (teores de humidade do solo intermédios): os tempos térmicos são mais elevados no solo Pmg que no solo Cb (as diferenças entre os valores medidos para 50% das plântulas emergidas variaram entre cerca de 12°Cd para a fava e de 60°Cd para a ervilha); a  $T_{opt}$  medida foi mais elevada no solo Cb que no solo Pmg. Contudo, a dependência do tempo térmico relativamente ao teor em água no solo parece ser mais vincada no solo Cb que no solo Pmg (secção 3.3.2.5), porque a gama de humidade que favorece a obtenção de tempos térmicos mínimos para a emergência é menos ampla no solo Cb que no solo Pmg. Embora o armazenamento de água disponível para as plantas seja maior em solos de textura mais fina (como o solo Cb), a retenção de água nestes solos também é maior que em solos de textura mais grosseira, sobretudo a potenciais mais baixos (Richards e Marsh, 1961; Larcher, 1977; Ghildyal e Tripathi, 1987). Por outro lado, é natural que a taxa de difusão de oxigénio no solo Cb seja mais facilmente restringida por redução da porosidade disponível para o ar quando os teores de humidade do solo são mais elevados (Hanks e Thorp, 1956). Estes aspectos parecem indicar que em solos de textura mais fina, como o Cb, o controle de humidade deverá ter em conta a extensão da

gama de humidades que garante as condições mais favoráveis à emergência, enquanto que em solos como o Pmg, deverá observar sobretudo a velocidade com que o solo perde água, maior que em solos de textura mais grosseira.

O contacto solo-semente é mais favorecido em solos com texturas mais finas que em solos com texturas mais grosseiras (Bewley e Black, 1994), sendo nos primeiros facilitada a mobilização de água pela semente e acelerado o processo germinativo, com consequente redução do tempo de emergência. Além disso, a resistência mecânica ao alongamento do caulículo/coleóptilo em direcção à superfície é provavelmente maior no solo Pmg, cujas características estruturais e texturais favorecem a formação de crostas superficiais (Ghydial e Tripathi, 1987; Brar e Stewart, 1994 e Bresson, 1995), contribuindo para o aumento da duração da emergência. Esta influência é maior quando as condições são favoráveis a uma secagem rápida da camada superficial, o que explicará as maiores diferenças obtidas entre as taxas de emergência na gama de temperaturas mais elevadas. Por isso, as emergências finais das culturas primaveris foram, para uma gama térmica mais ou menos extensa, menores no solo Pmg que no solo Cb, enquanto que as culturas outono-invernais não parecem ser afectadas pelo tipo do solo. O aumento do tempo de permanência no solo das plântulas pré-emergentes, torna-as mais vulneráveis aos patogénicos do solo, com consequente redução do número de plantas emergidas.

A taxa de emergência máxima medida correspondeu a uma temperatura média maior no solo Cb que no solo Pmg ( $T_{opt}$  medidas) (Fig. 3.12), provavelmente porque as amplitudes térmicas observadas na camada superficial do solo associadas a esta gama térmica, sendo maiores em Pmg que em Cb (secção 4.2.3.2), implicam naquele solo tempos de exposição mais elevados das sementes e/ou das plântulas a temperaturas superiores à  $T(G)_{opt}$  de germinação relativamente ao solo Cb. Por isso, em condições hídricas favoráveis deverá ser possível semear o girassol, o milho ou o grão mais tarde em Lisboa (solo Cb) que em Évora (solo Pmg).

As temperaturas-base de emergência de seis das espécies estudadas, não foram significativamente diferentes nos dois solos. Contudo, a  $T(E)_{base}$  do grão para o solo Cb é significativamente maior que a estimada no solo Pmg e que a estimada para a germinação, pelo que a influência do tipo de solo na temperatura-base das culturas deverá ser pormenorizada em experiências futuras.



#### 5.1.4. Culturas

Entre as culturas primaveris e entre as culturas outono-invernais também foram observadas diferenças significativas no comportamento térmico e hídrico entre a sementeira e o fim do estabelecimento, assim como nos dois solos utilizados (Pmg e Cb). Por exemplo, são diferentes os respectivos intervalos de tolerância térmica, as temperaturas cardinais, as taxas e os tempos térmicos de cada fase do estabelecimento (Quadros 3.1, 5.1 e 5.2), o filocrão (Quadro 3.15), a dispersão da germinação e da emergência (Figs. 3.3 e 3.16), a germinação e a emergência finais (Fig. 3.4 e 3.17), o crescimento foliar e a área foliar no fim do estabelecimento (Fig. 3.22 e Quadros 3.15 e 3.16) e a sensibilidade aos teores de água no solo mais extremos (Fig. 3.15) e às diferentes características de cada solo (por exemplo, a emergência e o início da expansão foliar da fava parecem ser menos dependentes do tipo de solo que a das restantes culturas). Além disso, o início estimado da produção foliar nas monocotiledóneas (milho e sorgo) é anterior à emergência enquanto nas dicotiledóneas ocorre sensivelmente na mesma altura (ligeiramente antes da emergência nos casos do girassol e da fava e posterior à emergência no caso da ervilha) (Quadro 5.2). Por outro lado, não foi clara qualquer relação entre o tempo térmico e o peso das sementes (maior na fava e menor no sorgo e no girassol), não se confirmando por isso, resultados obtidos por Lafond e Baker, (1986) e por Qiu *et al.* (1995).

##### **Culturas outono-invernais**

As culturas outono-invernais toleram temperaturas próximas de 0°C e apresentam  $T(G)_{opt}$  inferiores a 30°C. O grão e a fava apresentam intervalos de tolerância térmica mais extensos e maior tolerância a temperaturas mais baixas ( $T_{base}$  do estabelecimento igual a 1,5°C e a 1,2°C, respectivamente) que a ervilha ( $T_{base} = 1,9°C$ ) e a tremocilha ( $T_{base} = 3,5°C$ ). Contudo, as germinações finais da ervilha e da fava foram superiores aos valores mínimos de germinação agronomicamente aceitáveis (*m.a.a.*) apenas para temperaturas superiores a cerca de 6°C e de 12°C, respectivamente, enquanto que no caso da tremocilha e do grão os *m.a.a.* são alcançadas a partir de, pelo menos, 3°C (Fig. 3.4). Além disso, o grão e a tremocilha parecem ser mais sensíveis ao excesso e ao défice de água no solo, respectivamente, que as restantes culturas (Fig. 3.15). Tendo em conta o comportamento térmico e hídrico médio dos solos durante a época normal de sementeira das culturas outono-invernais estudadas (ausência de temperaturas elevadas que limitem a germinação, a emergência ou a produção de folhas,

riscos de formação de geada, sobretudo em Évora - Solo Pmg-, e teores de humidade do solo normalmente suficientes para um adequado estabelecimento), verifica-se que a variedade de grão usada nas experiências parece adaptar-se satisfatoriamente às condições agro-meteorológicas mediterrâneas nos dois locais, assim como a variedade de tremocilha usada no solo Cb; ao invés, as exigências térmicas das variedades de fava e de ervilha para uma germinação final elevada parecem não ser facilmente satisfeitas a temperaturas mais baixas. Por isso, as datas de sementeira da ervilha e da fava requerem mais atenção à variação térmica do solo que as do grão e da tremocilha.

Os desempenhos das culturas outono-invernais no estabelecimento e nos solos Pmg e Cb foram diferentes nas gamas térmicas que garantem as  $G_f$  elevadas e entre temperaturas médias de cerca de 9°C e 17-20°C onde se verificaram as  $E_f$  mais elevadas para cada cultura. A ervilha e a tremocilha germinam e emergem mais rapidamente que o grão e a fava (Quadro 5.2), embora a tremocilha e o grão não atinjam nestes solos os *m.a.a* (Quadro 2.5); o filocrão da fava é superior ao da ervilha (Quadro 5.2), mas a velocidade do crescimento foliar e a área foliar total no fim do estabelecimento são consideravelmente maiores na fava que na ervilha (Quadros 3.15 e 3.16). A germinação da tremocilha ao longo do intervalo sub-ótimo foi menos dispersa ( $\sigma = 6,4^\circ\text{Cd}$ ) que a das restantes culturas enquanto o progresso da germinação da fava foi o mais disperso ( $\sigma = 28,5^\circ\text{Cd}$ ) em torno do tempo térmico mais provável (Quadro 3.3). O comportamento do grão parece ser mais afectado pelo tipo de solo (mais sensível às características do solo Pmg) que a das restantes culturas, enquanto o da fava parece ser o menos afectado (Quadro 5.2).

Os resultados mostram que a variedade de grão utilizada, embora bem adaptada às exigências térmicas e hídricas próprias das condições agrometeorológicas mediterrâneas, parece ser menos competitiva que a ervilha e a tremocilha nestes solos (Pmg e Cb) pois nem a emergência é tão uniforme quanto as destas culturas, nem a emergência final é tão elevada quanto a da ervilha. A ervilha e a fava garantem maior cobertura do solo que as restantes culturas (se apenas forem tidas em conta a área foliar e a emergência final, ambas mais elevadas), mas a tremocilha garante uma cobertura do solo relativamente uniforme (i.e., o estabelecimento é menos disperso no tempo). A ervilha parece ser mais competitiva que a fava, pois é mais rápida a emergir e a produzir as primeiras folhas, além de garantir uma cobertura do solo mais uniforme que esta; contudo, os resultados também mostram que as plântulas pré-emergentes de fava parecem resistir bem aos factores que mais contribuem para as quebras à sementeira

(secção 3.3.4) pois, embora com uma emergência mais lenta, garante em ambos os solos emergências elevadas numa gama considerável de temperaturas médias.

Estudos futuros sobre estas culturas deverão comparar o desempenho das variedades usadas com o de outras variedades e tornar possível, por exemplo, a selecção de variedades de ervilha ou de fava que garantam germinações elevadas a temperaturas próximas das respectivas temperaturas-base ou de variedades de tremocilha e grão que garantam emergências mais elevadas neste tipo de solos.

### **Culturas primaveris**

As culturas primaveris apresentam  $T_{base}$  entre 4°C e cerca de 10°C e  $T(G)_{opt}$  superiores a 30°C. O girassol apresenta um intervalo de tolerância térmico mais extenso e uma tolerância maior a temperaturas mais baixas ( $T_{base}$  de estabelecimento de 4,6°C) que o milho e o sorgo ( $T_{base}$  iguais a 7,3°C e 9,8°C respectivamente). A gama de temperaturas que garante germinações finais superiores aos *m.a.a.* estende-se, em qualquer das culturas, até temperaturas próximas da respectiva  $T_{base}$ , mas não excede cerca de 33°C para o girassol e 38-39°C para o milho e o sorgo. O girassol e o sorgo são mais tolerantes a condições hídricas deficientes que o milho sobretudo em solos de textura mais grosseira, enquanto o girassol parece mais sensível ao excesso de água no solo que o sorgo ou o milho (Fig.3.17).

Tendo em conta as condições térmicas e hídricas do solo durante as épocas normais de sementeira das três culturas primaveris estudadas, com frequentes variações por vezes acentuadas do teor de água no solo e temperaturas superiores às respectivas  $T_{opt}$  de germinação, e riscos de geadas tardias, sobretudo em Évora (Solo Pmg), verifica-se ser o girassol a que parece mais enquadrada nas condições agrometeorológicas dominantes nos locais estudados; as suas características permitem, por exemplo, antecipar a sementeira de forma a usufruir melhores condições de humidade nas primeiras etapas do desenvolvimento. No entanto, podem ocorrer efeitos negativos do excesso de humidade do solo no estabelecimento do girassol, sobretudo em solos de textura mais fina (Cb, por exemplo). Por outro lado, a data de sementeira do sorgo parece depender mais das variações térmicas do solo, que da variação diária do teor de água no solo; enquanto que as maiores exigências térmicas e hídricas do milho requerem uma selecção criteriosa da data de sementeira.

Os desempenhos das culturas primaveris no estabelecimento e nos solos Pmg e Cb foram diferentes nas gamas térmicas que garantem as  $G_f$  e as  $E_f$  mais elevadas (entre cerca de 13°C e de 16-23°C, no caso da emergência). O sorgo germina e emerge mais

rapidamente que o milho e que o girassol (Quadro 5.2), embora as  $E_f$  do sorgo não atinjam nestes solos os *m.a.a.*; contudo, o estabelecimento do girassol após a emergência é mais rápido que o do milho e do sorgo pois o filocrão é menor (no caso do girassol, foi 22°Cd no solo Pmg e 39°Cd no solo Cb enquanto que para o milho e o sorgo foram superiores a 46°Cd nos dois solos) e o crescimento foliar mais rápido (Quadro 3.16). Por outro lado, a área foliar (por planta) no fim do estabelecimento é maior no milho e no girassol que no sorgo (Quadro 3.15). A dispersão da germinação do sorgo ao longo do intervalo sub-ótimo foi maior ( $\sigma = 16^\circ\text{C}$ ) que a do milho ( $\sigma = 9^\circ\text{C}$ ) ou a do girassol ( $\sigma = 9,1^\circ\text{C}$ ). Além disso, a sensibilidade das emergências do girassol e do sorgo ao tipo de solo é maior que a da emergência do milho.

Embora a emergência do sorgo seja mais rápida (menores tempos térmicos) que a das restantes culturas primaveris, sendo por isso competitiva ante as infestantes e estando menos tempo exposta aos patogénicos do solo, os resultados mostraram que nestes solos as emergências do milho e do girassol são mais elevadas e menos dispersas que o sorgo (não tendo em conta a densidade de sementeira usada). O desempenho de diferentes variedades de sorgo deve ser estudado, de forma a garantir uma redução drástica das quebras à sementeira verificadas para a variedade utilizada (oásis) nos solos Pmg e Cb.

#### **5.1.5. O sucesso do estabelecimento**

As condições térmicas e hídricas do solo (e térmicas do ar, no caso da produção de folhas nas dicotiledóneas) favoráveis ao estabelecimento adequado de uma cultura ocorrem:

- numa gama de temperaturas, ao longo da qual a germinação e a emergência são máximas, rápidas e uniformes e a produção e a expansão foliares são rápidas;
- numa gama de humidades, ao longo da qual o tempo térmico de cada fase do estabelecimento é mínimo.

Contudo, os resultados parecem indicar que não há uma relação clara entre a velocidade de emergência das culturas e o tempo necessário à produção das primeiras folhas, isto é, que uma emergência mais lenta não implica necessariamente maior atraso na produção das primeiras folhas. Depois de garantida uma elevada dimensão da emergência, o sucesso do estabelecimento parece depender mais do tempo necessário à produção das primeiras folhas que do tempo necessário à emergência.

No estudo da germinação do milho painço, Garcia-Huidobro *et al.* (1982a) definiram um intervalo térmico ao longo do qual a germinação é elevada, limitado inferiormente por  $T(G)_{base}$  e superiormente por  $T(G)_{máx}$ . Contudo, estes limites térmicos não parecem suficientes para garantir o sucesso da germinação pois não têm em conta a sua dispersão, parâmetro que assegura uniformidade, nem as percentagens mínimas de germinação agronomicamente aceitáveis.

Os resultados mostram que os parâmetros (duração, dimensão e dispersão) que caracterizam cada uma das fases do estabelecimento (germinação e emergência) variam ao longo dos respectivos intervalos de tolerância térmica e hídrica; além disso, sugerem a existência de uma  $T_{base''}$ , acima da qual a dispersão da germinação ou da emergência são mínimas (secção 3.3.3), e é aparentemente superior à  $T(G)_{base}$  definida por Garcia-Huidobro *et al.* (1982a) ou a uma  $T_{base}$  correspondente para a emergência ( $T(E)_{base}$ ). Então, se for  $T_{base}' < T_{base''} < T_{ópt} < T_{máx}'$ , as diferentes combinações entre os valores dos parâmetros que caracterizam a germinação e a emergência permitem definir quatro sub-intervalos térmicos ao longo dos respectivos intervalos de tolerância (Fig. 5.1):

**1º Sub-intervalo ( $T_{base}' < T < T_{base''}$ )** - as taxas de germinação e de emergência são pequenas, a germinação e a emergência finais são médias ou elevadas (superiores aos *m.a.a.*), a dispersão dos tempos térmicos (ou das durações cronológicas) ao longo da amostra é ainda considerável;

**2º Sub-intervalo ( $T_{base''} < T < T_{ópt}$ )** - as taxas aumentam com a temperatura até ao valor máximo respectivo ( $T_{ópt}$ ), as percentagens finais da germinação e da emergência são elevadas e a dispersão dos tempos térmicos (ou das durações cronológicas) ao longo da amostra é mínima e mais ou menos constante;

**3º Sub-intervalo ( $T_{ópt} < T < T_{máx}'$ )** - as taxas são elevadas mas decrescem com o aumento da temperatura, a germinação e a emergência finais são elevadas enquanto que a dispersão das durações cronológicas se mantêm a um nível baixo e aproximadamente constante;

**4º Sub-intervalo ( $T_{máx}' < T < T_{máx}$ )** - as taxas são baixas (e decrescem com a temperatura), a germinação e a emergência finais são inferiores aos *m.a.a.*, enquanto que a dispersão das durações cronológicas é mínima ou tende a aumentar ligeiramente.

Entre  $T_{base''}$  e  $T_{máx}'$  (2º e 3º sub-intervalos reunidos) as germinações e as emergências são elevadas e pouco dispersas e a respectivas taxas variam linearmente com a temperatura. Entre  $T(E)_{base''}$  e  $T(E)_{máx}'$  o estabelecimento é adequado se não ocorrerem temperaturas instantâneas inferiores a  $T(G)_{base''}$  nem superiores a  $T(G)_{máx}'$ .

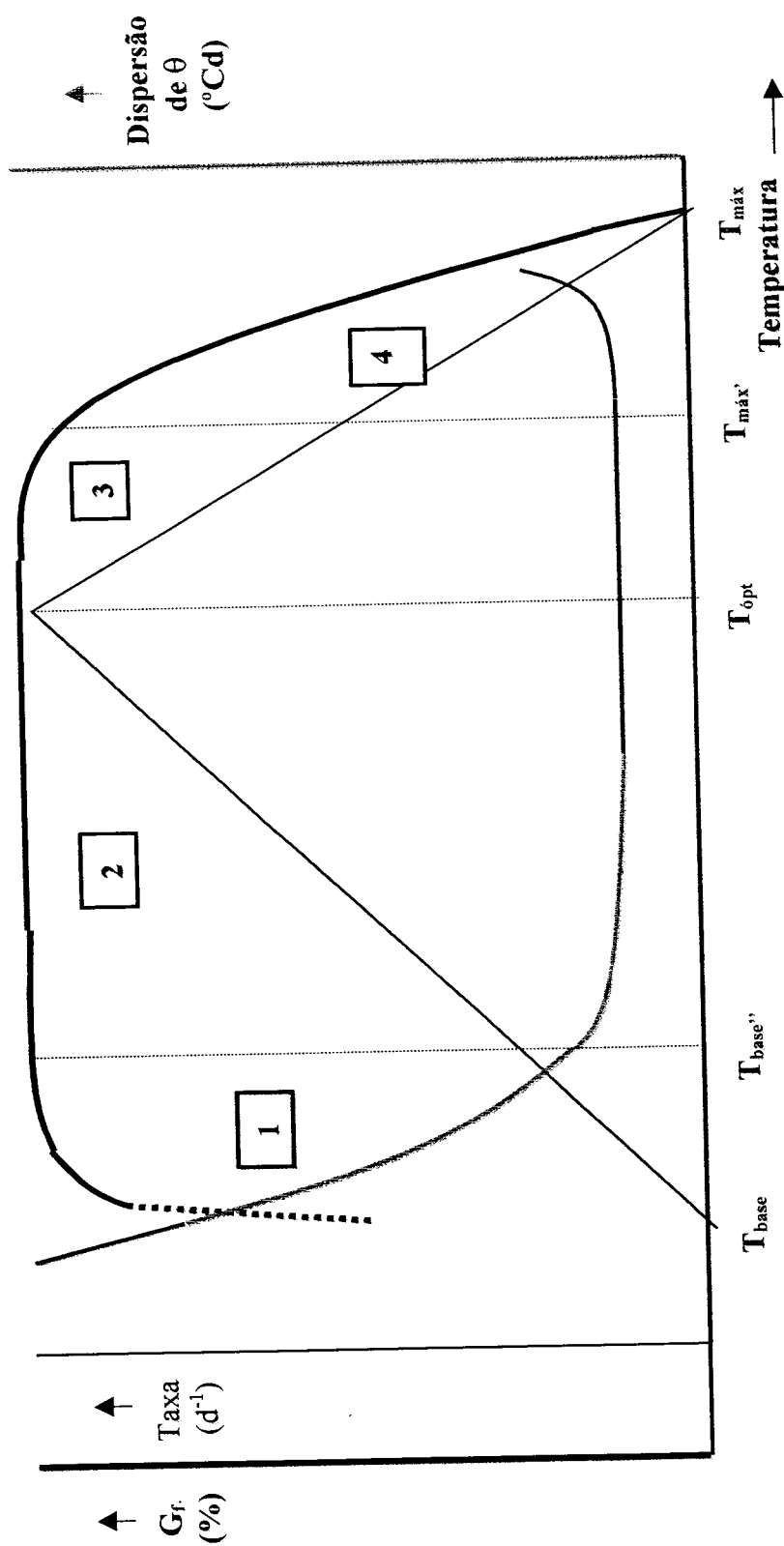


Fig. 5.1. Variação dos parâmetros que definem a germinação e a emergência no intervalo de tolerância térmica (modelo geral, a partir dos resultados obtidos):          Percentagem de germinação;          Taxa de germinação;          Dispersão dos tempos térmicos para uma população inteira de sementes germinadas ou de

         plântulas emergidas; 1 2 3 4 são os sub-intervalos térmicos definidos no texto, entre a  $T_{base}$  e a  $T_{max}$

$T_{base}$  é a temperatura mínima a partir da qual a dispersão da germinação ou da emergência é mínima;  $T_{max}$  é a temperatura acima da qual as percentagens finais de germinação ou de emergência são inferiores aos *m.a.a.*;  $T_{base''}$ ,  $T_{opt}$ ,  $T_{max'}$  são as temperaturas cardinais da germinação ou da emergência

$T_{base}$ ,  $T_{opt}$  e  $T_{máx}$  têm os significados habituais, i.e., são as temperaturas cardinais para a germinação ou para emergência. Para cada cultura, a extensão de cada sub-intervalo relativo à emergência é variável e depende sobretudo do regime térmico de cada solo. Ao contrário do que sucede com  $T_{base}'$ , a  $T_{base}''$  não depende da duração das experiências e ganha significado agronómico em vez de predominantemente fisiológico. A sua estimativa pode ser feita através da análise *probit* (secção 3.3.3).

Se  $T_{base}'$  for superior a  $T_{base}''$ , o 1º Sub-intervalo varia entre  $T_{base}$  e  $T_{base}'$  e o 2º Sub-intervalo entre  $T_{base}'$  e  $T_{opt}$ . Neste caso, o intervalo térmico que garante um estabelecimento adequado é o que se estende entre a  $T_{base}'$  e a  $T_{máx}'$ , i.e., coincide com o intervalo térmico definido por Garcia-Huidobro *et al.* (1982a). Se  $T_{máx}'$  for inferior a  $T_{opt}$ , o 2º Sub-intervalo varia entre  $T_{base}''$  e  $T_{máx}'$  e o 3º entre  $T_{máx}'$  e  $T_{opt}$ . Neste caso, o intervalo térmico que garante um estabelecimento adequado estende-se entre a  $T_{base}''$  e a  $T_{máx}'$ , mas não garante taxas máximas nem de germinação, nem de emergência.

As gamas de humidade e de temperatura que garantem o sucesso do estabelecimento dependem da cultura e do tipo de solo. Para qualquer combinação solo  $\times$  cultura, a extensão da gama térmica é menor se forem consideradas temperaturas médias diárias decorrentes do regime térmico dos solos, em vez de temperaturas constantes impostas em experiências feitas em ambientes controlados.

Em síntese, o estabelecimento adequado de uma cultura requer temperaturas médias do solo (ou do ar, no caso do aparecimento de folhas nas dicotiledóneas) próximas das  $T_{opt}$  de emergência ou de produção de folhas, temperaturas instantâneas superiores a  $T(G)_{base}''$  e inferiores a  $T(G)_{m}'$  e teores de água do solo à sementeira próximos da Capacidade de Campo. Além disso, o período de tempo em que as sementes e as plântulas pré-emergentes se expõem a temperaturas superiores à  $T(G)_{opt}$  não deve implicar redução da taxa de emergência relativamente à taxa estimada a partir do valor de  $\theta_1$ .

Em zonas mediterrâneas, o sucesso do estabelecimento das culturas de primavera depende principalmente da disponibilidade de água na camada superficial, nem sempre garantida devido às elevadas taxas de evaporação, e da exposição das sementes e plântulas pré-emergentes a temperaturas elevadas. A escolha de variedades mais tolerantes a temperaturas baixas de forma a antecipar a data de sementeira e o aumento da profundidade de sementeira são soluções alternativas razoáveis. Contudo, as temperaturas mínimas diárias na camada superficial do solo não devem ser inferiores às respectivas  $T(G)_{base}''$ , estabelecendo desta forma limites para a antecipação da data de

sementeira. O cálculo das dotações de rega, quando necessária, deve ter em conta a relação entre a taxa de evaporação e a extensão da gama de humidades na qual o tempo térmico é mínimo; ao mesmo tempo, esta relação serve de critério para optar entre solos e entre culturas. Nas sementeiras de Outono-Inverno, não é frequente haver exposição de sementes e plântulas pré-emergentes das culturas estudadas a temperaturas elevadas, sobretudo em Lisboa (Solo Cb) pelo que a disponibilidade de água no solo pode, na maior parte dos casos, definir a data de sementeira; contudo, o conhecimento dos valores de  $T(G)_{base}$  e de  $T(E)_{base}$  de cada cultura permite definir limites para o adiamento da data das sementeiras.

## **5.2. Comportamento térmico dos solos**

As variações térmicas observadas nos solos Pmg e Cb apresentam características marcadamente mediterrâneas. Durante o período experimental as temperaturas médias diárias dos perfis estudados nos solos Pmg e Cb ultrapassaram os 30°C durante os meses de Verão mas raramente foram inferiores a 10°C nos meses de Inverno; à superfície do solo, as temperaturas máximas ultrapassaram frequentemente 50°C em dias de Verão e raramente foram inferiores a 0°C. A meio do dia, os gradientes verticais de temperatura nos 8 cm superficiais do solo, directamente em contacto com o sistema radical das pequenas plantas das culturas primaveris, atingiram frequentemente 1,3°C/cm e, por vezes, 2,5°C/cm, enquanto que nas culturas outono-invernais, raramente ultrapassaram 0,5°C/cm.

### **5.2.1. Simulação harmónica da temperatura do solo com séries de Fourier**

Os resultados mostraram que o comportamento térmico dos dois solos, Pmg e Cb, localizados a uma latitude aproximada de 38°N, é satisfatoriamente simulado através do desenvolvimento de séries de Fourier (Análise Harmónica) e que, em determinadas condições, a teoria de condução de calor em meios semi-infinitos homogéneos é aplicável a solos reais.

#### **5.2.1.1. Ciclo diário**

Numa camada superficial mais ou menos extensa dos solos Pmg (até 16 cm de profundidade) e Cb (até 8 cm), a variação térmica diária a uma dada profundidade,  $T(t)$ , foi simulada satisfatoriamente pela sobreposição de duas harmónicas, isto é:

$$T(t) = T_{\text{méd}} + C_1 \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_1) + C_2 \cdot \text{sen}(2\omega t + \phi_2) \quad (5.1)$$



onde  $T_{\text{méd}}$  é a temperatura média diária da profundidade considerada,  $\omega$  a frequência angular do movimento ondulatório dada por  $2\pi/P$  ( $=7,3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ),  $C_1$  e  $C_2$  são as semi-amplitudes térmicas e  $\phi_1$  e  $\phi_2$  os ângulos de fase da 1ª e 2ª harmónicas, respectivamente. A descrição da variação térmica através da equação (5.1) parece ser independente do teor de humidade do solo, da insolação astronómica ou do nível de nebulosidade. Contudo, em dias longos e às profundidades maiores a solução sinusoidal simples (1ª harmónica) parece ser suficiente para descrever a temperatura do solo pois a contribuição relativa da 1ª harmónica foi superior a 95%.

Também Gupta *et al.* (1984) usaram duas harmónicas para descrever a variação térmica diária nos 30 cm superficiais de um solo de textura franco-limosa, enquanto Ghuman e Lal (1982) usaram duas harmónicas para descrever a variação térmica diária a 5 cm de um solo de textura franco-arenoso, mas apenas uma harmónica para descrever o curso de temperatura a 35 cm, provavelmente porque em solos de textura grosseira as amplitudes térmicas a estas profundidades são maiores que em solos de textura mais fina (Monteith e Unsworth, 1990). A duração do período de aquecimento no ciclo diário, normalmente inferior a 12 horas, é o principal factor responsável pela assimetria das séries de temperaturas médias horárias medidas relativamente ao modelo sinusoidal simples (1ª harmónica). Estas assimetrias foram também encontradas, entre outros, por Flucker (1958), Jansson (1991) e Andrade *et al.* (1993). A adição de uma segunda harmónica aproxima os PAq e os extremos térmicos estimados dos medidos, e resolve estas limitações.

Perturbações meteorológicas diárias de grande amplitude, como é o caso de inversões térmicas nocturnas ou de nebulosidade mais ou menos persistente parecem ser detectáveis pela adição da 2ª harmónica; ao invés, as flutuações não periódicas de pequena amplitude, visíveis sobretudo à superfície do solo (por ex, o curso diário da temperatura nos dias P e M à superfície do solo Cb e no dia N à superfície de ambos os solos) não parecem compatíveis com a 2ª harmónica. Além disso, a compressão de dados aumenta a utilidade das harmónicas de ordem inferior (1ª e 2ª) porque minimiza o efeito das pequenas perturbações; por isso, nos dias-tipo representativos das combinações possíveis entre comprimento do dia e humidade do solo a importância relativa da 1ª harmónica foi, de uma forma geral, maior que nos dias-tipo representativos de diferentes níveis de nebulosidade.

Contudo, os resultados mostraram que o comportamento térmico de ambos os solos não foi constante ao longo dos respectivos perfis, pois as duas primeiras harmónicas não foram suficientes para descrever o curso diário da temperatura a 32 cm de profundidade do solo Pmg, e a 16 cm e 32 cm do solo Cb. O comportamento térmico dos solos a 32 cm de profundidade poderá dever-se ao facto de os erros associados às medições nestas profundidades serem da ordem de grandeza das amplitudes térmicas, pelo que a sensibilidade dos sensores de temperatura pode ser um factor a ter em conta. Por outro, as amplitudes térmicas são maiores em solos de textura grosseira (Monteith e Unsworth, 1990; Andrade *et al.*, 1993) como é o caso do solo Pmg - por exemplo, Ghuman e Lal (1982) necessitaram de apenas uma harmónica para descrever a variação térmica a 32 cm de profundidade de um solo franco-arenoso -, e em solos de textura fina que apresentem propriedades vérticas (Andrade, 1991) como é o caso do solo Cb. Logo, é razoável admitir-se que a descontinuidade do comportamento térmico ao longo dos perfis se deverá fundamentalmente à variação das propriedades físicas ao longo do perfil. Esta hipótese é compatível com os resultados obtidos a 16 cm de profundidade do solo Cb, cujas variações térmicas poderão também estar associadas ao transporte convectivo de energia devido ao fendilhamento característico em solos cuja fracção mineral é dominada por minerais de argila de natureza montemorilonítica (Andrade, 1991) ou à heterogeneidade resultante de usos anteriores (ver secção 2.1.3 dos Materiais e Métodos).

Em síntese, o uso exclusivo das primeiras duas harmónicas é suficiente para simular o curso diário da temperatura do solo numa espessura de solo mais ou menos homogénea, na qual as propriedades térmicas permaneçam relativamente constantes e os erros associados à medição da temperatura do solo (por ex, erros instrumentais) sejam relativamente desprezáveis.

#### 5.2.1.2. Ciclo anual

A solução sinusoidal simples (1ª harmónica) foi suficiente para simular a variação térmica anual até 32 cm de profundidade dos solos Pmg e Cb. Por isso, a temperatura uma dada profundidade do solo,  $T(t)$  pode ser estimada pela seguinte expressão:

$$T(t) = T_{\text{méd}} + C_1 \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_1) \quad (5.2)$$

onde  $T_{\text{méd}}$ ,  $\omega$  ( $=2 \times 10^{-7} \text{s}^{-1}$ ),  $C_1$  e  $\phi_1$  têm significados semelhantes aos da eq. (5.1) habituais, aplicados ao ciclo anual da temperatura do solo.

A utilização da 1ª harmónica para simular a variação anual da temperatura do solo também foi suficiente num solo da região de Bragança (Figueiredo e Gonçalves, 1991), num solo na região da Califórnia, EUA (Persaud e Chang, 1985) e noutra na Zona dos Grandes Lagos, EUA (Carson, 1963); ao invés, foi insuficiente para descrever o curso anual da temperatura do solo numa região da Índia (Khrishnan e Kushwaha, 1972), a partir de médias semanais medidas entre 1965 e 1968. Enquanto a variação da radiação líquida em zonas temperadas (EUA e Portugal) é unimodal (um só período de aquecimento), na zona intertropical é frequente a existência de mais que um período de aquecimento, sendo por isso necessário mais que uma harmónica para descrever a oscilação térmica anual (por exemplo, em número de duas no caso do solo estudado por Khrishnan e Kushwaha).

A importância relativa das restantes harmónicas (2ª, 3ª 4ª harmónicas) foi diminuta (inferior a 3%). Irregularidades de pequena amplitude associadas à evolução das condições meteorológicas são apenas detectáveis por harmónicas de ordem muito superior à 4ª. A evolução destas condições parece influenciar sobretudo a contribuição relativa da 1ª harmónica para a variância total da temperatura em torno da temperatura média: no solo estudado por Carson (1963) na Zona dos Grandes Lagos, EUA, onde não há estação seca nem as variações de humidade do solo são tão irregulares e frequentes como na região mediterrânea, a contribuição da 1ª harmónica foi maior (entre 93-99,8%) que nos solos Pmg e Cb, onde as flutuações não periódicas da temperatura do solo estão sobretudo associadas à irregularidade das precipitações.

Quando a amplitude das irregularidades é menor, seja devido à natureza das perturbações meteorológicas registadas, cujos efeitos tendem a diminuir em profundidade, seja devido à compressão dos dados de temperatura utilizados (valores médios mensais em vez de semanais ou relativos a 10 dias e valores Normais ou referentes a vários anos em vez de valores relativos a 1 ano, minimizam o efeito de perturbações associadas à evolução das condições meteorológicas), as importâncias relativas da 2ª harmónica em zonas onde a variação da radiação líquida é unimodal e da 3ª harmónica quando a variação é bimodal, parecem ser ligeiramente maiores e mais variáveis que as contribuições obtidas da 2ª harmónica na simulação da variação térmica dos solos Pmg e Cb, em 1995. Por exemplo, Khrishnan e Kushwaha (1972) obtiveram contribuições relativas da 3ª harmónica entre 0,6% a 30 cm e 3,9% a 1 cm de profundidade, a partir de dados semanais de temperatura relativos a 4 anos consecutivos; Figueiredo e Gonçalves (1991) obtiveram percentagens da variância total

da temperatura do solo explicada pela 2ª harmónica entre 1,8 % a 100 cm e 2,6% a 5, 10 e 20 cm de profundidade, a partir de valores mensais de temperatura relativos a 2 anos consecutivos.

Em síntese, as assimetrias das séries de valores medidos ao longo do ano relativamente ao modelo sinusoidal parecem depender fundamentalmente do tipo de clima associado e, para cada clima, da evolução das condições meteorológicas ao longo do ano e da configuração dos dados de temperatura usados.

### **5.2.2. Influência do tipo de solo e teor de humidade**

Os resultados mostraram que o amortecimento da onda térmica diária ou anual, nos solos Pmg e Cb, pode ser quantificada através da profundidade de amortecimento (eq. 2.25) pois as amplitude térmicas anuais e diárias decresceram exponencialmente em profundidade.

#### **5.2.2.1. Profundidade de amortecimento e difusividade térmica**

Os resultados obtidos (secção 4.2.4.4.3) mostraram que só em camadas de solo aparentemente homogéneas a profundidade de amortecimento calculada através da equação de amplitude da 1ª harmónica relativa ao ciclo diário, é uma boa estimativa da profundidade de amortecimento medida; mostraram também que  $D_2$  é dispensável para a estimativa de  $D$  pois a contribuição relativa da 2ª harmónica raramente explica mais de 8-10% da variação total da temperatura diária. Por outro lado, os valores de  $D$  calculados a partir da equação de fase não melhoram a estimativa de  $D$  e são frequentemente diferentes dos estimados pela equação de amplitude; também Gupta *et al.* (1984) obtiveram diferentes valores de  $D_1$  (as diferenças atingiram, em média, 2 cm) num solo de textura franco-limosa, enquanto Wierenga *et al.* (1969) obtiveram, para o mesmo tipo de solo e a partir das mesmas equações, diferentes valores da difusividade térmica (as diferenças variaram entre 0,0003 e 0,001  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , que correspondem a diferenças entre 4 e 7,4 cm nos valores de  $D$ ). Também Krishanan e Kushwaha (1972) num solo de textura arenosa e Lettau (1954) e Singer e Brown (1956) em solos de diferentes texturas, obtiveram para ciclos anuais diferentes valores da difusividade térmica quando estimadas a partir das equações de amplitude e de fase.

Em cada solo, a profundidade de amortecimento variou com o perfil térmico considerado (secção 4.2.4.1) e, para cada perfil térmico, variou com o teor médio de humidade do solo e com a distribuição de humidade ao longo do perfil. Além disso, a

profundidade de amortecimento foi diferente nos dois solos para teores de humidade até cerca de 0,20-0,30  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ . No primeiro caso, a variação de  $D$  indica um comportamento térmico diferente ao longo dos perfis de cada solo (i.e., a velocidade de propagação da onda térmica em profundidade não é constante); no segundo caso, mostrou-se que o teor de humidade do solo é um factor fundamental do comportamento térmico de cada solo; no terceiro caso, os resultados mostram que o grau de influência do tipo de solo na profundidade de amortecimento parece depender do teor de humidade do solo.

A propriedade térmica fundamental de cada solo é a sua difusividade térmica. A difusividade térmica ( $\alpha$ ) de cada solo foi obtida a partir dos valores de  $D$ , utilizando a equação (2.24). O Quadro 5.3 mostra os valores da difusividade térmica média nas camadas de solo correspondentes aos perfis térmicos nos quais os cocientes  $D_1/D_2$  não foram significativamente diferente de  $\sqrt{2}$  (PT3 e PT4 no solo Pmg e PT4 no solo Cb). Nos dias de insolação astronómica intermédia (dias M) os valores medidos em PT3 variaram entre  $3,5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  (dia N) e  $5,1 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  (dia P); em PT4 variaram entre  $2,8 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  (dia N) e  $6,9 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  (dia P) no solo Pmg e entre  $2,8 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  (dia N) e  $4,1 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  (dia M) no solo Cb. Os valores estimados em PT3 e PT4 a partir da 1ª harmónica foram semelhantes aos medidos. A gama de valores obtida em ambos os solos é consistente com a gama de valores da difusividade térmica apresentada por autores como Van Duin (1963) e de Vries (1975), em função do teor de água do solo e para solos com texturas-tipo, arenosas (cerca de  $2,5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  para solos secos,  $9,5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  para teores de humidade de 0,10-0,15  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , decrescendo até valores ligeiramente superiores a  $8 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  quando o teor de humidade do solo é superior a 0,4  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) e argilosas (cerca de  $2 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  para solos secos,  $5,5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  para teores de humidade de 0,15  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ , decrescendo até valores ligeiramente superiores a  $4,5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  à medida que o teor de humidade aumenta até cerca de 0,4  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); os valores da difusividade térmica obtidos para níveis-tipo de humidade do solo (Hb, Hm e He) em dias de insolação intermédia são consistentes com os resultados obtidos em solos de textura franco-limosa, por Hadas (1974), no qual a difusividade térmica aumentou de  $1,8 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  a  $5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  quando o teor de humidade variou entre 2,0% e 14,5% (peso em peso) e por Wierenga *et al.* (1969), no qual a difusividade aumentou de  $2 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  em solo seco para  $4-5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  quando o teor de humidade variou entre 0,15 e 0,4

**Quadro 5.3 Difuvidades térmicas nos solos Pmg e Cb, em 9 dias-tipo, obtidas a partir das amplitudes térmicas medidas ( $\alpha$ ) e a partir da equação de amplitude da 1ª harmónica ( $\alpha_1$ ) nos perfis térmicos PT3 e PT4**

- regressões não significativas para um nível de probabilidade de 95%
- $D_1/D_2$  foi significativamente diferente de 2

Solo	Dia-tipo	$\alpha$ ( $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )		$\alpha_1$ ( $10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )	
		PT3	PT4	PT3	PT4
Pmg	C-Hm	3,9	5,4	3,8	5,3
	M-Hb	4,7	5,0	5,4	5,0
	M-Hm	4,6	5,8	5,1	6,0
	M-He	4,3	5,6	4,9	5,7
	L-Hm	7,7	15,0	7,5	15,0
	I	4,2	3,8	5,0	3,9
	P	5,1	6,9	4,9	8,0
	M	4,3	5,6	4,7	5,8
	N	3,5	2,8	4,3	3,1
	Cb	C-Hm		10,0	
M-Hb			3,5		2,9
M-Hm			-		-
M-He			-		-
L-Hm			3,8		3,2
M			4,1		4,1
N			2,8		2,8

$\text{cm}^3/\text{cm}^3$  e com os obtidos num solo de textura grosseira, por Hopmans e Dane (1986), no qual a difusividade térmica, a  $22^\circ\text{C}$ , variou entre valores ligeiramente superiores a  $2 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  quando seco e  $6-7 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  quando o teor de água foi superior a  $0,10 \text{cm}^3/\text{cm}^3$ .

A variação da difusividade térmica em função do teor médio de água do solo (Fig. 4.4) seguiu o padrão descrito por van Duin (1963) ou de Vries (1975): em PT3, a difusividade térmica ( $\alpha$ ) aumentou rapidamente com o teor de água do solo, seguindo-se um lento decréscimo para teores de água mais elevados. Contudo, os valores máximos de  $\alpha$  obtidos nos dois solos ( $4,9 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  no solo Pmg e  $4,5 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$  no solo Cb) foram inferiores aos apresentados pelos autores, sobretudo os relativos ao solo Pmg, enquanto o teor de humidade correspondente ao valor máximo de  $\alpha$  estimado no solo Cb foi visivelmente superior ( $0,30-0,35 \text{cm}^3/\text{cm}^3$  em vez de cerca de  $0,2 \text{cm}^3/\text{cm}^3$ ), provavelmente devido às variações do volume aparente do solo decorrentes da natureza expansível dos minerais de argila que constituem parte significativa da fracção mineral (secção 2.1.3); ao invés, o teor de humidade correspondente ao valor máximo de  $\alpha$  é, no solo Pmg, sensivelmente idêntico ao apresentado pelos autores (cerca de  $0,15 \text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).

Para diferentes padrões de distribuição de água ao longo do perfil do solo (perfis em secagem, humedecimento ou uniformes), a profundidade de amortecimento (e, por consequência, a difusividade térmica) variou significativamente com o teor médio de água no solo; para teores médios de humidade do solo semelhantes, foi diferente consoante o tipo de distribuição de humidade ao longo do perfil (Figuras 4.5 e 4.6). Estes resultados sugerem uma nova leitura da influência do teor de humidade, sobretudo importante em regiões onde as variações do teor de água da camada superficial do solo são rápidas e frequentes, como em zonas mediterrâneas. Por outro lado, verificou-se que o sentido da evolução da profundidade de amortecimento (ou da difusividade térmica) em função do teor médio de água no solo variou com o padrão de distribuição de água no solo: por exemplo, em perfis S, a profundidade de amortecimento de ambos os solos foi significativamente mais elevada para teores médios de humidade próximos da Capacidade de Campo, enquanto que em perfis H, diminuiu à medida que o teor médio de humidade do solo aumentou.

Se for tida em conta a variação da difusividade térmica em função da fracção volumétrica de água presente no solo, apresentada por van Duin (1963) e por de Vries (1975), é possível deduzir que a difusividade térmica ( $\alpha$ ) diminui em profundidade num

perfil em fase de secagem (perfil S) se a camada mais superficial apresentar teores de humidade ( $H_v$ ) superiores a cerca de  $0,10-0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (consoante o tipo de textura) mas aumenta significativamente se  $H_v$  for inferior a cerca de  $0,10-0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  ao longo de todo o perfil; na primeira situação, a influência do gradiente de humidade ao longo do perfil parece contrariar o aumento de  $\alpha$  ao longo do perfil devido ao aumento da densidade aparente, enquanto que no segundo caso parece contrariá-lo. A difusividade térmica diminui acentuadamente ao longo de um perfil em humedecimento (perfis H) se a superfície do solo apresentar valores de  $H_v$  inferiores a  $0,10-0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (neste caso, a influência do gradiente de humidade contraria o aumento de  $\alpha$ ) mas aumenta se forem superiores a  $0,10-0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  no limite inferior do solo (neste caso, a influência do gradiente de humidade reforça o aumento de  $\alpha$ ). A difusividade manter-se-á mais ou menos constante ao longo de perfis U. Se a  $H_v$  medida a uma dada profundidade entre a superfície e o limite inferior do solo for cerca de  $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , a difusividade térmica, depois de um acréscimo (brusco em perfis S e ligeiro em perfis H) tende a decrescer em profundidade (ligeiramente em perfis S e de um modo brusco em perfis H); nestes casos, o gradiente reforça o aumento de  $\alpha$  na camada mais superficial (sobretudo em perfis S) e contraria-o em profundidade (sobretudo em perfis H).

Em áreas de clima marcadamente mediterrâneo, os perfis S são mais frequentes que os perfis H ou U, sendo possível controlar o comportamento térmico do solo à sementeira a partir do conhecimento da variação do comportamento térmico em condições hídricas próximas das ideais à sementeira, quer pela escolha do dia de sementeira tendo em conta a última chuvada do dia, quer pela escolha do momento de rega em função do da sementeira. Estudos futuros sobre a influência da distribuição de humidade ao longo do perfil do solo deverão ser desenvolvidos no campo ou em laboratório, de forma a permitir a estimativa de D para vários padrões de distribuição de humidade ao longo de uma gama de humidades médias mais ou menos extensa. Esta estimativa permitirá simular satisfatoriamente o campo de temperaturas no solo com recurso a apenas uma harmónica. Além disso, o cálculo de D deverá ter em conta o factor temperatura, porque o aumento da condutividade e da difusividade térmicas com a temperatura é considerável a partir de cerca de  $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (de Vries, 1975; Campbell *et al.*, 1994), podendo contrariar, em certas condições, o aumento da difusividade térmica com a profundidade devido à distribuição de humidade. Este factor



é muito importante em áreas mediterrâneas nas quais as temperaturas do solo ascendem frequentemente a cerca de 40-45°C.

### 5.2.2.2 Heterogeneidade térmica dos solos Pmg e Cb

O comportamento térmico não foi idêntico entre a superfície e 32 cm de profundidade dos solos Pmg e Cb: o carácter periódico das variações térmicas foi menos evidente a 32 cm em ambos os solos e a 16 cm no solo Cb que nas restantes profundidades simuladas (secção 4.2.1), como foi anteriormente discutido; os valores da profundidade de amortecimento e da difusividade térmica foram diferentes consoante os perfis térmicos analisados (PT1, PT2, PT3 e PT4) (secções 4.2.1 e 4.2.4.6); a razão  $D_1/D_2$  foi significativamente diferente de  $\sqrt{2}$  nos PT1, PT2 ou PT3 no solo Cb e a PT1 e PT2 no solo Pmg (secção 4.2.4.4.3); a profundidade de amortecimento variou com o teor de humidade do solo e com a sua distribuição ao longo das camadas correspondentes a PT1, PT2 ou PT3 (secção 4.2.4.1).

Em solos reais, a estrutura e a textura variam ao longo do perfil enquanto a densidade aparente (ou a porosidade), em igualdade dos restantes factores, tende a aumentar (ou diminuir) em profundidade devido ao aumento do peso dos níveis superiores (compacidade). A variação do comportamento térmico ao longo do perfil depende da variação conjunta da textura, da estrutura ou da densidade aparente, pois destas propriedades dependem a condutividade e a difusividade térmicas do solo: por exemplo, a condutividade ou a difusividade térmicas dependem da textura do solo que, na maior parte dos perfis, varia em profundidade (de Vries, 1975; Sepaskhah e Boersma, 1979); a condutividade térmica aumenta com a densidade aparente porque é incrementado o contacto térmico entre partículas e agregados (Baver *et al.*, 1972). No solo Pmg a porosidade diminuiu cerca de 16% entre Ap1 e Ap2 e cerca de 25% entre Ap1 e BC enquanto que no solo Cb diminuiu cerca de 8% entre Ap1 e Ap2 mas aumentou cerca de 5% entre Ap2 e Bw), pelo que são de esperar variações mais ou menos importantes das propriedades térmicas ao longo de ambos os perfis, sobretudo no solo Cb. Os resultados obtidos mostraram ainda que o teor de humidade do solo contribui fortemente para o grau de heterogeneidade de ambos os solos, devido à sua influência na variação das propriedades térmicas dos solos (secção 5.2.2.1).

Em síntese, a variação do comportamento térmico dos solos deriva fundamentalmente da variação das propriedades físicas do solo (textura, estrutura e densidade aparente) e do teor de água no solo ao longo do perfil.

A variação das propriedades térmicas ao longo do perfil, nomeadamente da difusividade térmica, é responsável pela reorientação dos fluxos de energia e consequente alteração do campo das temperaturas relativamente ao que se deveria esperar num solo homogéneo, e constitui a principal dificuldade de aplicação de soluções analíticas a solos reais. (Krishnan e Kushwaha, 1972; Gupta *et al.*, 1984; Campbell, 1987; Massman, 1992). Contudo, os resultados obtidos mostram que é possível simular o comportamento térmico do solo a partir da teoria de condução de calor a meios semi-infinitos homogéneos (isto é, na qual a difusividade ou a profundidade de amortecimento sejam aproximadamente constantes) desde que seja previamente conhecida a camada de solo onde a variação das propriedades térmicas é mínima. Nesta camada são somente necessárias medições térmicas a duas profundidades (Horton e Wierenga, 1983) ou a uma profundidade se for conhecida a profundidade de amortecimento; esta, como foi atrás referido, pode ser satisfatoriamente estimada a partir da equação de amplitude relativa à primeira harmónica.

A simulação do comportamento térmico a partir das condições referidas, é uma solução harmónica da equação de condução de calor, de fácil execução (não requer conhecimento do perfil térmico inicial nem um número elevado de cálculos) e aplicável à camada de solo energeticamente mais activa (de maior importância no desenvolvimento das culturas, nomeadamente durante o seu estabelecimento). Evita desvantagens decorrentes do uso de soluções numéricas (requerem um número considerável de medições e cálculos) (Richtmeyer e Morton, 1967), e dispensa o uso de diferentes métodos de cálculo da difusividade térmica ou da profundidade de amortecimento que procuram adaptar a análise harmónica à simulação da temperatura em camadas de solo de heterogeneidade variável (van Wijk, 1963, Seeman, 1979, Horton *et al.*, 1983; Nassar e Horton, 1989; Nassar e Horton, 1990; Passerat de Silvens *et al.*, 1996).

A delimitação de uma camada de solo homogénea pode ser feita por análise dos perfis térmicos do solo e recorrendo ao nº de harmónicas necessárias para a simulação da temperatura a várias profundidades e aos valores de  $D_1/D_2$ . A espessura da camada deve ter em conta o objectivo da simulação e ser suficientemente espessa de forma a permitir que o número de medições de temperatura (amostragem) seja estatisticamente significativa (Wierenga *et al.*, 1969). Desta forma é possível contornar a maior variabilidade entre os valores das propriedades térmicas referentes a sub-camadas de espessura diminuta (Lettau, 1954; Krishnan e Kushwaha, 1972).

### 5.3. Aplicações da simulação de perfis de temperatura do solo à emergência das culturas

A partir da simulação da temperatura e do conhecimento do comportamento térmico das culturas é possível estimar a duração cronológica de cada fase do respectivo desenvolvimento. Para estimar a duração cronológica mais provável para a emergência de uma cultura, é necessário:

- simular  $T(t)$  à profundidade de sementeira e às diferentes profundidades a que se encontra o meristema apical durante a sua ascensão em direcção à superfície do solo;
- acumular temperatura acima da  $T_{base}$  (isto é, integrar a função  $T(t)-T_{base}$  ao longo do tempo  $t$ ), desde a sementeira até igualar o tempo térmico mais provável de emergência, previamente conhecido.

#### a) simulação da temperatura a diferentes profundidades

A variação temporal da temperatura a qualquer profundidade  $z$ ,  $T(z,t)$ , pode ser estimada a partir da medição da temperatura a duas profundidades, ou a uma profundidade se for conhecida a profundidade de amortecimento (secção 5.2.2). Por exemplo, se for medida a temperatura à profundidade de sementeira,  $z_s$ , e conhecida a profundidade de amortecimento em função do teor de humidade do solo, é possível calcular as amplitudes térmicas e os ângulos de fase para as duas primeiras harmónicas às diferentes profundidades a que se encontra a meristema apical de uma dada cultura durante a sua ascensão em direcção à superfície, através das seguintes equações (secção 4.2.3):  $C_{0,1} = C_{s,1} / \exp (s/D_1)$ ;  $C_{z,1} = C_{0,1} \exp (z/D_1)$ ;  $C_{0,2} = C_{s,2} / \exp (-\sqrt{2z}/D_1)$ ;  $C_{z,2} = C_{0,2} \exp (-\sqrt{2z}/D_1)$ ;  $\phi_{0,1} = \phi_{s,1} - s/D_1$ ;  $\phi_{z,1} = \phi_{0,1} - s/D_1$ ;  $\phi_{0,2} = \phi_{s,2} - \sqrt{2z}/D_1$ ;  $\phi_{z,2} = \phi_{0,2} - \sqrt{2z}/D_1$ .  $T_{méd}$  é supostamente igual a qualquer profundidade

A profundidade a que se encontra o meristema apical pode ser estimada a partir da duração mais provável para a germinação e da taxa de alongamento do caulículo/coleóptilo. A duração cronológica do processo germinativo depende da temperatura e é facilmente determinado em laboratório (secção 2.3.2.2). A taxa de alongamento do caulículo ou do coleóptilo de uma plântula depende da temperatura e tem sido medida por vários autores, como Carleton *et al.* (1968), Hatfield e Egli (1974) e Carberry e Campbell (1989). Mas pode ser estimada, tendo em conta a duração da emergência ( $t_e$ ), a duração da germinação ( $t_g$ ) e a profundidade de sementeira  $z_s$ :

$$z_s / (T_e - t_g) \quad (\text{cm/dia ou mm/hora}) \quad (5.3)$$

### b) acumulação térmica entre a sementeira e a emergência

Sejam  $\theta(G)_1$  e  $\theta(G)_2$  os tempos térmicos necessários à germinação de uma amostra de sementes, respectivamente abaixo e acima da  $T_{\text{opt}}$  de germinação (secção 3.1.2.3). Se entre a sementeira e o fim do processo germinativo a temperatura variar entre a  $T_{\text{base}}$  e a  $T_{\text{máx}}$  de uma dada cultura e for alternadamente superior e inferior à respectiva  $T(G)_{\text{opt}}$ , e se as temperaturas cardinais e o tempo térmico não forem por isso afectados, nem por outros factores ambientais, a taxa de germinação  $R(G) = (1/t)(G)$  para uma qualquer fracção de sementes germinadas é dada por (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982b):

$$R(G) = (1/\Delta t) = [(\Delta t_1/t)(T_1 - T_b)/\theta_1] + [(\Delta t_2/t)(T_m - T_2)/\theta_2] \quad (5.4)$$

e a temperatura acumulada necessária à germinação por (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982b):

$$\theta(G) = \Delta t_1(T_1 - T(G)_{\text{base}}) + \Delta t_2(T(G)_{\text{máx}} - T_2)(\theta(G)_1/\theta(G)_2) \quad (5.5)$$

onde  $\Delta t (= \Delta t_1 + \Delta t_2)$  é o tempo entre a sementeira e a germinação (em horas),  $\Delta t_1$  é o intervalo de tempo durante o qual se registaram temperaturas abaixo da temperatura óptima de germinação,  $(T(G)_{\text{opt}})$ , e  $\Delta t_2$  é o intervalo de tempo durante o qual se registaram temperaturas superiores à  $T(G)_{\text{opt}}$ ;  $T_1$  e  $T_2$  são as temperaturas médias nos intervalos de tempo  $\Delta t_1$  e  $\Delta t_2$ , respectivamente;  $T_{\text{base}}$  e  $T_{\text{máx}}$ , têm o significado habitual.

Por outro lado, os resultados obtidos no estudo da emergência mostraram que é possível adaptar as equações (5.4) e (5.5) ao cálculo da taxa e do tempo térmico de emergência, consoante o tempo de exposição a temperaturas médias horárias superiores à  $T(G)_{\text{opt}}$  for maior ou menor que um dado n° de horas (secção 3.3.2.4). Para tal basta substituir  $R(G)$  por  $R(E)$ , enquanto os restantes termos têm o mesmo significado, referindo-se agora à emergência ( $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\theta(E)_1$ ,  $\theta(E)_2$ ,  $T_{\text{base}}$ ,  $T_{\text{máx}}$ ).

A função integranda  $[T(t) - T_{\text{base}}]$  para a germinação ou para a emergência é diferente consoante se considerem os intervalos de integração  $\Delta t_1$  e  $\Delta t_2$  definidos a partir das equações 5.4 e 5.5. A temperatura acumulada ( $\theta_A$ , em °Cd) num intervalo de tempo  $\Delta t_1 (= t_b - t_a)$  menor ou igual a 24 horas vem:

$$\begin{aligned} \theta_A &= \int_{t_a}^{t_b} [T(t) - T_{\text{base}}] dt = \\ &= \int_{t_a}^{t_b} T_{\text{méd}} dt + C_{z,1} \int_{t_a}^{t_b} \text{sen}(\omega t + \phi_{z,1}) dt + C_{z,2} \int_{t_a}^{t_b} \text{sen}(2\omega t + \phi_{z,2}) dt - \int_{t_a}^{t_b} T_{\text{base}} \cdot dt = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= T_{\text{méd}}(t_b - t_a) + (C_{z,1}/\omega) [-\cos(\omega t_b + \phi_{z,1})] + (C_{z,2}/2\omega) [-\cos(2\omega t_b + \phi_{z,2})] - T_{\text{base}}(t_b - t_a) = \\
&= T_{\text{méd}}(t_b - t_a) - T_{\text{base}}(t_b - t_a) + (C_{z,1}/\omega) [-\cos(\omega t_b + \phi_{z,1}) + \cos(\omega t_a + \phi_{z,1})] + \\
&\quad + (C_{z,2}/2\omega) [-\cos(2\omega t_b + \phi_{z,2}) + \cos(2\omega t_a + \phi_{z,2})] \quad (5.6)
\end{aligned}$$

e, num intervalo de tempo  $\Delta t_2 (= t_d - t_c)$  menor ou igual a 24 horas vem (Fig 5.2):

$$\begin{aligned}
\theta_B &= \int_{t_c}^{t_d} [T_{\text{máx}} - T(t)] dt = \\
&= \int_{t_c}^{t_d} T_{\text{máx}} dt - \left[ \int_{t_c}^{t_d} T_{\text{méd}} dt + C_{z,1} \int_{t_c}^{t_d} \text{sen}(\omega t + \phi_{z,1}) dt + C_{z,2} \int_{t_c}^{t_d} \text{sen}(2\omega t + \phi_{z,2}) dt \right] = \\
&= T_{\text{máx}}(t_d - t_c) - T_{\text{méd}}(t_d - t_c) - (C_{z,1}/\omega) [-\cos(\omega t_d + \phi_{z,1})] - (C_{z,2}/2\omega) [-\cos(2\omega t_d + \phi_{z,2})] = \\
&= T_{\text{máx}}(t_b - t_c) - T_{\text{méd}}(t_d - t_c) - (C_{z,1}/\omega) [-\cos(\omega t_d + \phi_{z,1}) + \cos(\omega t_c + \phi_{z,1})] - \\
&\quad - (C_{z,2}/2\omega) [-\cos(2\omega t_d + \phi_{z,2}) + \cos(2\omega t_c + \phi_{z,2})] \quad (5.7);
\end{aligned}$$

O tempo térmico  $\theta_1$  equivalente ao tempo térmico para o intervalo supra-óptimo ( $\theta_2$ ) vem (Garcia-Huidobro *et al.*, 1982b):

$$\begin{aligned}
(\theta_1)' &= \int_{t_c}^{t_d} [T_{\text{máx}} - T(t)] dt \frac{\int_{t_a}^{t_b} (T_{\text{ópt}} - T_{\text{base}}) dt}{\int_{t_c}^{t_d} (T_{\text{máx}} - T_{\text{ópt}}) dt} = \\
&= \{ T_{\text{máx}}(t_b - t_a) - T_{\text{méd}}(t_b - t_a) - (C_{z,1}/\omega) [-\cos(\omega t_b + \phi_{z,1}) + \cos(\omega t_a + \phi_{z,1})] - \\
&\quad - (C_{z,2}/2\omega) [-\cos(2\omega t_b + \phi_{z,2}) + \cos(2\omega t_a + \phi_{z,2})] \} [(T_o - T_b) / [(T_{\text{máx}} - T_{\text{ópt}})]] \quad (5.8)
\end{aligned}$$

Quando a temperatura do solo é inferior ou igual à temperatura-base e superior ou igual à temperatura máxima de germinação de uma dada cultura as taxas de germinação e de emergência são nulas, sendo nula a acumulação de temperatura.

Os intervalos de integração de  $T(t)$  durante o período de emergência são normalmente superiores a 24 horas. Por isso, a estimativa da temperatura acumulada a partir da integração de  $T(t)$  é a soma das estimativas da temperatura acumulada em cada ciclo diário, completo (dias intermédios) ou parcial (1º e último dia), desde a sementeira à germinação e da germinação à emergência.

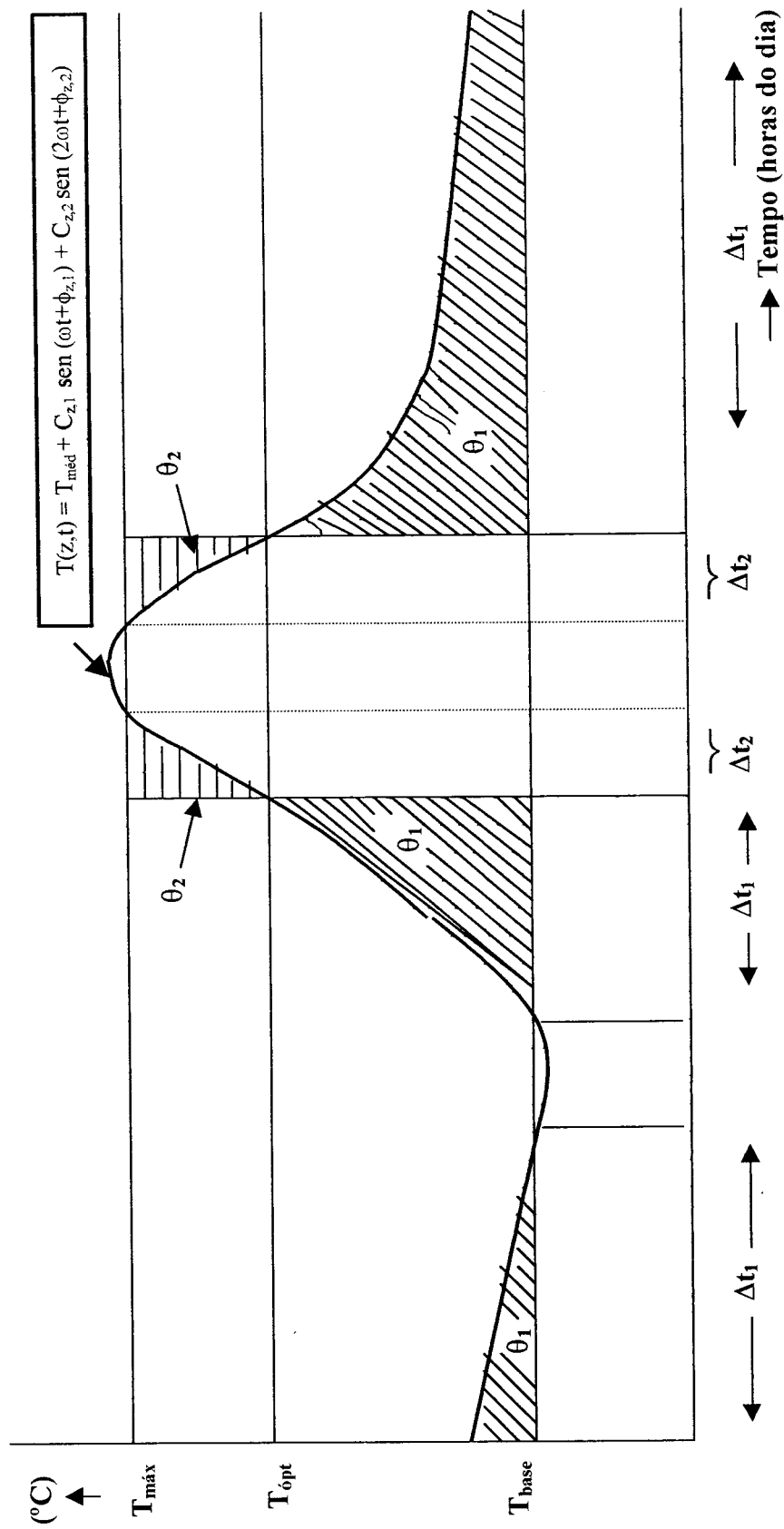


Fig. 5.2. Temperatura acumulada, durante um ciclo diário, no intervalo sub-óptimo de germinação de uma cultura ( $\theta_1$ ) e no intervalo supra-óptimo de germinação ( $\theta_2$ ) e respectivos intervalos de tempo ( $\Delta t_1$  e  $\Delta t_2$ ).

$$\theta_{\text{dia}} = \sum \theta_1 + \sum \theta_2. T_{\text{base}}, T_{\text{opt}} \text{ e } T_{\text{máx}} \text{ são as temperaturas cardinais para a germinação da cultura hipotética}$$

Como exemplo, o Quadro 5.4 mostra a temperatura acumulada ( $^{\circ}\text{Cd}$ ) para cada uma das sete culturas testadas em cada dia-tipo estudado em ambos os solos a partir dos resultados da análise harmónica relativos nos perfis térmicos PT3. A temperatura-base considerada foi a  $T_{\text{base}}$  do estabelecimento. A acumulação de temperatura durante qualquer fase do estabelecimento de uma cultura depende do curso diário da temperatura do solo: para uma temperatura média diária idêntica, a acumulação é menor se forem registadas temperaturas superiores à respectiva  $T(\text{G})_{\text{opt}}$  e/ou inferiores à respectiva  $T(\text{G})_{\text{base}}$  que no caso da temperatura ao longo do dia variar entre  $T(\text{G})_{\text{base}}$  e  $T(\text{G})_{\text{opt}}$ .

Em estudos futuros dever-se-á estimar a taxa de alongamento do caulículo ou do coleóptilo das diferentes culturas, em função da temperatura, da humidade do solo e da profundidade de sementeira. Para tal, será necessário estimar com rigor o momento em que se inicia o alongamento do caulículo/coleóptilo, que é posterior ao momento em que a radícula apresenta 2 mm de comprimento (critério usado para a germinação), assim como o momento da emergência à superfície do solo. Esta metodologia permitirá sub-dividir a duração da emergência (entre a sementeira e a emergência) em dois períodos distintos: o intervalo de tempo em que a temperatura acumulada depende do curso térmico à profundidade de sementeira e o intervalo de tempo em que  $T(t)$  representa o curso térmico à profundidade a que se encontra o meristema apical depois do alongamento do caulículo ou do coleóptilo se ter iniciado. Além disso, deve ser tida em conta a influência da posição em que se encontra a semente no solo, na duração do alongamento do caulículo/coleóptilo, que dependerá do tamanho da semente.

De uma forma geral, as condições laboratoriais dificilmente reproduzem com fidelidade as condições reais da germinação, seja porque o substrato não é o mesmo ou, se o for, dificilmente representa o ambiente físico natural em redor da semente, seja porque o grau de contacto semente-solo ou a capacidade de mobilização de água pela semente é diferente de solo para solo (secção 5.1.2). Além disso, a resistência oferecida pelo solo ao alongamento do caulículo ou do coleóptilo em direcção à superfície não é facilmente reprodutível em laboratório. Por isso, a placa de gradiente térmico usada deverá ser adaptada de modo a permitir usar amostras de solo como substrato para a germinação e a emergência e os resultados aferidos através de experiências realizadas no campo, com metodologia adequada aos objectivos pretendidos.

**Quadro 5.4. Temperatura acumulada (°C.d) em cada dia-tipo para cada cultura para PT3 medidos nos solos Pmg e Cb**

\* o curso diário da temperatura apresenta valores superiores à temperatura óptima de germinação

o curso diário da temperatura apresenta valores inferiores à temperatura-base

Solo	Dia-Tipo (T <sub>média</sub> )	Culturas [Temperatura-base do estabelecimento (°C)]								
		Ervilha	Tremocilha	Grão	Fava	Girassol	Milho	Sorgo		
Pmg	C-Hm	13,2	11,3	1,9	3,5	1,5	1,2	4,6	7,3	3,9'
	M-Hb	23,3	20,1*	11,3	9,7	11,7	12	8,6	3,8'	13,5
	M-Hm	14,5	12,6	11	33,3*	13	33,1*	18,7	16	4,7
	M-He	11,5	9,6	8	11	10	10,3	6,9	2,8'	2,9'
	L-Hm	23,4	20,3*	34,3*	8	27,7*	33,7*	18,8	16,5*	13,6
Cb	C-Hm	10,4	8,5	6,9	8,9	9,2	5,8	1,2'	1,2'	1,2'
	M-Hb	24,2	21,8*	39,3*	29,7*	34,1*	19,6	16,9	14,4	14,4
	M-Hm	14,6	12,7	11,1	13,1	13,4	10	7,3	4,8	4,8
	M-He	13,4	11,5	9,9	11,9	12,2	8,8	6,1	3,6	3,6
L-Hm	20,6	18,7	31,8*	26,2*	31,5*	16	13,3	10,8	10,8	



## 5.4. Conclusões

1. O estabelecimento das culturas pode ser simulado, em condições favoráveis, com base no conceito de um tempo térmico constante, que é característico de cada cultura e que permite separar os efeitos da temperatura dos efeitos de outros factores que influenciam o estabelecimento, nomeadamente do teor de água no solo.

2. A temperatura-base pode ser considerada conservativa ao longo do estabelecimento de cada cultura e é independente do regime térmico imposto (temperaturas constantes e temperaturas variáveis). A temperatura óptima de emergência varia com o regime térmico dos solo, não sendo por isso fácil definir uma temperatura óptima de emergência

3. A análise *probit* mostrou ser um método adequado à simulação do progresso da germinação e da emergência em função do tempo térmico, e pode ser útil para o estudo da influência de outros factores que influenciam o estabelecimento, nomeadamente do teor de água no solo, e para o cálculo da temperatura ( $T_{base}$ ) a partir da qual a dispersão da germinação e a da emergência são mínimas.

4. Teores extremos de humidade do solo influenciam negativamente o estabelecimento das culturas, sobretudo teores inferiores a cerca de 50% da Capacidade Utilizável do solo, frequentes em regiões de características mediterrâneas

5. O tipo de solo influencia mais a emergência das culturas que as fases subsequentes do estabelecimento (início da produção e expansão foliares e filocrão)

6. O sucesso do estabelecimento depende sobretudo de emergências elevadas e pouco dispersas e de uma rápida produção das primeiras folhas. O limite inferior da gama térmica que garante simultaneamente emergências elevadas e pouco dispersas é superior à  $T_{base}$  e, eventualmente diferente da  $T_{base}$  definida por Garcia-Huidobro *et al.* (1982a).

7. Numa camada superficial mais ou menos extensa do solo, a variação térmica diária a uma dada profundidade é simulada satisfatoriamente pela sobreposição de duas harmónicas, constituindo a desigualdade entre períodos de aquecimento e de arrefecimento o principal factor responsável pela assimetria das séries de valores medidos relativamente ao modelo sinusoidal simples (períodos de aquecimento/arrefecimento iguais a 12 horas)

8. A solução sinusoidal simples (1ª harmónica) é suficiente para simular a variação térmica anual de uma camada de solo mais ou menos extensa, em regiões de clima com características mediterrâneas.

9. O amortecimento da onda térmica diária ou anual pode ser quantificado pela profundidade de amortecimento, que varia significativamente com o teor médio de água no solo e com a sua distribuição ao longo do perfil

10. O conhecimento prévio das características físicas do solo (nomeadamente as suas características térmicas) permite delimitar camadas de solo mais ou menos homogéneas, nas quais é possível aplicar a teoria de condução de calor em meios semi-infinitos homogéneos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, F.G.. 1987. *Influence of atmospheric saturation deficit on early growth of groundnut*. Ph.D. Thesis. Nottingham University
- Abreu, J.P.M.. 1994. *Modelo de crescimento e produção da cultura do trigo em condições mediterrânicas*. Dissertação para provas de doutoramento. I.S.A. Lisboa
- Abreu, J.P. e Campbell, G.S.. 1997. Spring wheat development under mediterranean conditions. II. Leaf emergence and phyllochron in relation to thermal and photothermal time, and accumulated radiation. *Ciências Agrárias*, vol XX:33-42
- Abreu, F.G. e Clark, J.A.. 1993. Groundnut seedling emergence in relation to thermal-time and soil water. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, 43: 219-232.
- Abreu, F.G., Jesus, M.I.F., Abreu, J.P.M e Mendes, A.G.. 1994. Duração térmica e temperatura-base de germinação de várias cultivares de cereais e girassol. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*. 44
- Adams, J.E. 1967. Effect of mulches and bed configuration. I. Early-Season soil temperature and emergence of grain Sorghum and corn. *Agronomy Journal*, 59: 595 - 599
- Alessi, J. e Power, J.F.. 1971. Corn Emergence in relation to soil temperature and seeding depth. *Agronomy Journal*, 63: 717 -719
- Allmaras, R.R. e Nelson, W.W.. 1973. Corn root-configuration response to soil temperature and matric suction. *Agronomy Journal*, 65: 725-730
- Andersen, W.B. e Kemper, W.D.. 1964. Corn growth as affected by aggregate stability, soil temperature, and soil moisture. *Agronomy Journal*, 56: 453-456
- Andrade, J. 1991. *Fluxo de energia e temperatura do solo. Estimativa e medição*. Relatório no âmbito das P.A.P e C.C. Universidade de Évora. Évora
- Andrade, J., Abreu, F.G. e Madeira, M.V.. 1993. Aplicação do modelo sinusoidal à variação da temperatura do solo em condições de solo nu e sob coberto. *Anais do I.S.A.*, 43: 233-253
- Andrade, J.A. e Abreu, F.G. (em publicação) Análise de Perfis de Temperatura do Solo com Recurso a Séries de Fourier. *Revista de Ciências Agrárias*
- Angus, J.F., Cunningham, R.B., Moncur, M.W. e Mackenzie D.H.. 1981a. Phasic development in field crops. I. Thermal response in the seedling phase. *Field Crop Research*,. 3: 365-378

- Asrar, G e Kanemasu, E.T. 1983. Estimating Thermal diffusivity near the soil surface using Laplace Transform: Uniform initial conditions. *Soil. Sci. Soc.Am.J.*, 47: 397-401
- Auld, D.L., Bettis, B.L., Crock, J.E. e Kephart, K.D. 1988. Planting date and temperature effects on germination, emergence, and seed yield of chickpea, *Agronomy Journal*, 80: 909-914
- Barbour, M.G. e Racine, C.H.. 1967. Construction and performance of a temperature-gradient bar and chamber. *Ecology*, 48(5): 861-863
- Barlow, E.W., Boersma, L. e Young, J.L.. 1977. Photosynthesis, transpiration, and leaf elongation in corn seedlings at suboptimal soil temperatures. *Agronomy Journal*, 69: 95-99
- Barry, R.G. e Charley, R.J.. 1976. *Atmosphere, weather and climate* Methuen e Co., LTd (3rd edition)
- Baver, L.D., Gardner, W.H. e Gardner, W.R.. 1972. *Soil Physics*, 4<sup>th</sup> Ed. John Wiley and Sons. New York
- Bellman, R.E., Kalaba, R.E. e Lockett, J.. 1964. Numerical solution of functional equations by means of Laplace Transform - III The diffusion equation. The Rand Co., Memo
- Bennet - Lartey, S.O.. 1991. The longevity of pea, sunflower and groundnut seeds under controlled temperature and moisture content conditions. *Trop- Sci.* 31: 9-19
- Bewley, J.D. e Black, M.. 1994. *Seeds. Physiology of development and germination.* 2ed. Plenum Press. New York and London
- Bhattacharyya, A.K. e De Datta, S.K. 1971. Effects of soil temperature regimes on growth characteristics, nutrition, and grain yield of IR22 Rice. *Agronomy Journal*, 63: 443-449
- Bierhuizen, J.F.. 1973. The effect of temperature on plant growth, development and yield. In: Slatyer, R.O. (Ed) *Plant responses to climatic factors.* Proceedings of the Upsalla symposium. Unesco. Paris: 89-98
- Bierhuizen, J.F. e Feddes, R.H.. 1969. The application of heat units for germination and plant growth. *Acta Horticultural.*
- Bierhuizen, J.F. e Wagenvoort, W.A.. 1974. Some aspects of seed germination in vegetables. 1. The determination and application of heat sums and minimum temperature for germination. *Scientia Hortycticulturae*, 2: 213-219.

- Boatwright, G.O. Ferguson, H. e Sims, J.R. 1976. Soil Temperature around the crown node influences early growth, nutrient uptake, and nutrient translocation of spring wheat. *Agronomy Journal*, 68: 227-231.
- Bollero, G.A, Bullock, D.G. e Hollinger, S.E.. 1996. Soil temperature and planting date effects on corn yield, leaf area, and plant development. *Agronomy Journal*, 88: 385-390
- Bootsma, A, Hayhoe, H.N e Dwyer, L.M.. 1989. Comparison of sampling and analysis procedures for classifying the soil thermal regime in Canada. *Soil Science*, Vol 147, n°2: 140 -147
- Brady; N.C. 1990. *The nature and properties of soils*. Macmillan, New York
- Brar, G.S., Gomez, J.F., McMichael, B.L., Matches, A.G.. e Taylor, H.M.. 1991. Germination of twenty forage legumes as influenced by temperature. *Agronomy Journal*, 83: 173-175
- Brar, G.S., Steiner, J.L., Unger, P.W. e Prihar, S.S.. 1992. Modelling Sorghum seedling establishment from soil wetness and temperature of drying seed zones. *Agronomy Journal*, 84: 905-910
- Brar, G.S. e Stewart, B.A.. 1994. Germination under controlled temperature and field emergence of 13 sorghum cultivars, *Crop Science*, 34: 1336-1340
- Bresson, L.M.. 1995. A review of physical management for crusting control in Australian cropping systems research opportunities. *Austr..J.Soil Res.*, 33:195-209
- Bristow, K.L. 1998. Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89: 75-84
- Buchan, G.D.. 1982. Predicting bare soil temperature. I. Theory and model for the multi-day mean diurnal variation, *Journal of Soil Science*, 33: 185-197
- Cal, J.P. e Obendorf, R.L.. 1972. Imbibitional chilling injury in *Zea mays* L. altered by initial kernel moisture and maternal parent. *Crop Science*, 12: 369-373
- Camilo, P.. 1989. Estimating soil surface temperatures and flux measurements. *Soil Science*, vol. 148, n°4: 233-243
- Campbell, G.S.. 1987. *An introduction to environmental biophysics*. Springer-Verlag, New York

- Campbell, G.S. e Diaz, R. 1988 Simplified soil-water balance models to predict crop transpiration: 15-26. In: F.R. Bidinger e C. Johansen (Eds.) Drought Research Priorities for the Dryland Tropics., ICRISAT, Parancheru, Índia.
- Campbell, G.S. 1990. *Biophysical measurements and instrumentation. A laboratory manual for environmental biophysics*. Whashington State University, Pullman
- Campbell, G.S., Jungbauer, J.R., Bidlake, W.R e Hungerford, R.D.. 1994. Predicting the effect of temperature on soil conductivity, *Soil Science*, 158: 307-313
- Cao,W e Moss,D.N.. 1989. Temperature effect on leaf emergence and phyllochron in wheat and barley. *Crop Science*, 29: 1018-1021
- Cao,W. e Tibbitts, T.W.. 1995. Leaf emergence on potato stems in relation to thermal time. *Agronomy Journal*, 87: 474-477
- Carberry, P.S. e Campbell, L.C.. 1989. Temperature parameters useful for modelling the germination and emergence of pearl millet. *Crop Science*, 29: 220-223
- Carleton, A.E., Cooper, C.S. e Wiesner, L.E.. 1968. Effect of seed pod and temperature on speed of germination and seedling elongation of sainfoin (*Onobrychis viciaefolia* Scop.), *Agronomy Journal*, 60: 81-84
- Carslaw, H.S. e Jaeger, J.C.. 1967. *Conduction of heat in solids*, 2<sup>nd</sup> ed., ClaredOn Press, Oxford
- Carson, J. E.. 1963. Analysis of soil and air temperatures by Fourier techniques, *J. Geophys.Res.*, 68: 2217-2232
- Castañeda, C.L., Richards, R.A., Farquhar, G.D e Williamson, R.E.. 1996. Seed and seedling, characteristics contributing to variation in early vigour among temperate cereals. *Crop Science*, 36: 1257-1266
- Chatterton, N.J. e Kadish, A.R.. 1969. A temperature gradient germinator. *Agronomy Journal*, 61: 643-644
- Chaudhary, T.N. e Ghildyal, B.P. 1969. Germination response of rice seeds to constant and alternating temperatures. *Agronomy Journal*, 61: 328-330.
- Chu,Y.N., Coble, C.G. e Jordan,W.R.. 1991. Cotton emergence force as affected by soil temperature, moisture, and compression. *Crop Science*, 31: 405-409
- Clegg, M.D. e Eastin, J.D.: 1978. A thermogradient generating sand table. *Agronomy Journal*, 70: 881-883
- Cochrane, J. e Baker, C.R. 1985. Annual and diurnal variations in soil temperatures at Kew, Great Britain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 34, 235-240
- Coelho, C.. 1997.. *Estatística e Delineamento experimental*. AEISA. Lisboa

- Cole, D.F.. 1972. Use of the thermogradient plate as an aid in determining the relative vigour of sweet corn (*Zea mays*, L.). *Agronomy Journal*, 64: 749-750
- Cormack, D.B. e Bate, G.C.. 1975. Methods of estimating leaf area from linear measurements of the *Macadamia integrifolia* cultivar Kakea. *Rhod.J.Agric.Research*. 13: 45-53
- Côme, D e Thévenot, C. 1982. Environmental control of embryo dormancy and germination. In: Khan, A.A. (Ed.) “*The physiology and biochemistry of seed development, dormancy and germination*”, 272-295. Elsevier Biomedical Press
- Cooper, P.J.M.. 1979. The association between altitude, environmental variables, maize growth and yields in Kenya. *Journal of Agricultural Science*, Cambridge, 93: 635-649
- Costa, J.B. 1973. *Caracterização e constituição do solo*. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa
- Covell, S., Ellis R. H., Roberts, E. H., e Summerfield, R.J.. 1986a. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. I. A comparison of chickpea, lentil, soybean and cowpea at constant temperatures. *Journal of Experimental Botany*, 37: 705-715.
- Craufurd, P.Q., Ellis, R.H., Summerfield, R.J. e Menin, L.. 1996. Development in cowpea (*Vigna unguiculata*). I. The influence of temperature on seed germination and seedling emergence. *Experimental Agriculture*, 32: 1-12
- Craufurd, P.Q., Flower e D. J. Peacock, J.M.. 1993 - Effect of heat and drought stress on sorghum (*Sorghum bicolor*). I. Panicle development and leaf appearance. *Expl. Agric*, 29: 61-76.
- Currie, J.A. 1973. In: *Seed Ecology*. W.Heidecker (Ed), Butter-worthsd, London
- Dahal, P e Bradford, K,J. 1990. Effects of priming and endosperm integrity on seed germination rates of tomato genotypes. II. Germination at reduced water potential. *Journal of Experimental Botany*, 41: 1441-1453
- Dahal, P., Bradford, K.J. e Jones, R.A.. 1990. Effects of priming and endosperm integrity on seed germination rates of tomato genotypes. I. Germination at suboptimal temperature. *Journal of Experimental Botany*, 41: 1431-1439.
- Dahal, P., Kim, N-S. e Bradford, K,J. 1996. Respiration and germination rates of tomato seeds at suboptimal temperatures and reduced water potentials. *Journal of Experimental Botany*, 47: 941-947



- Dasberg, S., Hillel, D. e Arnon, I.. 1966. Response of grain sorghum to seedbed compaction. *Agronomy Journal*, 58: 199-201
- Del Pozo, A.H., Garcia-Huidobro, J., Novoa, R. e Villaseca, S.. 1987. Relationship of base temperature to development of spring wheat. *Expl. Agric.*, 23: 21-30.
- Denmead, O.T. e Shaw, R.H. 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions, *Agronomy Journal*, 54: 385-390
- de Vries, D.A. e Philip, J.R.. 1986. Soil heat flux, thermal conductivity and the null-alignment method, *Soil Sci.Soc.Am.J.*. 50: 12-18
- de Vries,D.A. 1975. *Heat transfer in soils*. In. De Vries, D.A. and Afgan, N.H, (Eds) "Heat and mass transfer in the biosphere". Scripta Book Company. Washington, D.C.
- Diehl, R. 1989. *Agricultura geral*. Clássica Editora. Lisboa
- Draper, N.R. e Smith, H 1981. *Applied Regression Analysis*, J.Wiley e Sons.New York
- Elliot, R.F. e French, C.S.. 1959. Germination of light sensitive seed in crossed gradients of temperature and light. *Plant Physiology*, 34: 454-456
- Ellis, R. H., Covell, S., Roberts, E.H., e Summerfield, R. J.. 1986b. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. II. Intraspecific variation in chickpea (*Cicer arietum L.*) at constant temperature. *Journal of Experimental Botany*, 37, 1503-1515
- Ellis, R.H., Simon, G. e Covell, S. 1987c. The influence of temperature on seed germination rate in grain legumes. III A comparison of five faba bean genotypes at constant temperatures using a new screening method. *Journal of Experimental Botany*, 38: 1033-1043
- Epstein, E. 1966. Effect of soil temperature on mineral element composition and morphology of the potato plant. *Agronomy Journal*, 63: 664-666
- Everani, M. 1957. Les problemes physiologiques de la germination. *Bull. Soc.Franc. Physiol. Véget.* 3(4): 105-124
- FAO. 1979. *Yield response to water*, Fao irrigation and drainage paper, 33, FAO, Rome
- FAO, 1986. *Manual para a avaliação de plântulas em ensaio de germinação* (ed.portuguesa). ONU/FAO
- FAO/UNESCO 1988. *Soil Map of the world* (Revised Legend). FAO/ONU, Roma

- Fayemi, A.. 1957. Effect of temperature on the rate of seed swelling and germination of legume seeds. *Agronomy Journal*, 49: 75-76.
- Feddes, R. A.. 1971. *Water, heat and crop growth*. Meded.Landb Wageningen, 71: 1-184
- Ferrão, A.. 1995. *Germinação e temperatura*. Relatório do trabalho de fim de curso de Engenharia Agronómica. I.S.A. Lisboa
- Ferrão, A. e Abreu, F.G.. 1996. Placa de gradiente térmico para estudos de germinação de sementes a temperaturas constantes. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, 45: 441-454
- Ferrão, A, Andrade, J.A e Abreu, F.G.. 1996 Sucesso de germinação de tremocilha, girassol e sorgo a temperaturas constantes. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, 45: 455-471
- Ferreira, M.E., Abreu, J.P.M., Bianco, V. V. e Monteiro, A.. 1997. Predicting phasic development of green beans for processing using a model with high temperature reduction of thermal time accumulation, *Scientia Horticulturae*, 69: 123-133
- Fidanza, M.A., Dernoeden, P.H. e Zhang, M.. 1996. Degree-days for predicting smooth crabgrass emergence in cool-season turfgrasses. *Crop Science*, 36: 990-996
- Figueiredo, T. A. e Gonçalves, D.. 1991. *O regime térmico de um luvissole na Quinta de Santa Apolónia*. Série Estudos Escola Superior Agrária de Bragança, Instituto Politécnico de Bragança, Bragança
- Finney, D.J.. 1971. *Probit analysis* (third edition). Cambridge University Press. Cambridge
- Fitzpatrick, E.A.. 1980. *Soils. Their formation, classification and distribution*. Longman Inc., New York
- Flucker, B.J.. 1958. Soil Temperatures, *Soil Science*, 86: 35-46
- Fortin, M-C., Pierce, F.J e Edwards, M.. 1994. Corn leaf area response to early-season soil temperature under crop residues. *Agronomy Journal*, 86: 355-354.
- Fritschen, L.S. e Gay, L.W. 1979. *Environmental instrumentation*. Springer-Verlag. New York
- Fuchs, M e Tanner, C.B.. 1967a. Evaporation from a drying soil. *J. Appl. Meteorology*. 6: 852-857
- Fuchs, M e Tanner, C.B.. 1967b Surface temperature measurement of bare soils. *J. Appl. Meteorology*. 7: 303-305

- Fuchs, M. e Tanner, C.B.. 1968. Calibration and field test of soil heat flux plates. *Soil. Sci. Soc.Am.J.* , 32: 326-328
- Fyfield, T.P. e Gregory, P.D.. 1989. Effects of temperature and water potential on germination radicle elongation and emergence of mugbean. *Journal of Experimental Botany*, 40: 667- 674.
- Gallagher, J.N.. 1979. Field studies of cereal leaf growth. I. Initiation and expansion in relation to temperature and ontogeny. *Journal of Experimental Botany*, 30: 625-636
- Gallagher, J.N., Biscoe, P.V. e Wallace, J.S.. 1979. Field studies of cereal growth. IV. Winter wheat leaf extension in relation to temperature and leaf water status. *Journal of Experimental Botany*, 30: 657-68
- Gan, Y., Stobbe, E.H. e Moes, J.. 1992. Relative date of wheat seedling emergence and its impact on grain Yield. *Crop Science*, 32: 1275-1281.
- Garcia-Huidobro, J., Monteith, J.L. e Squire, G.R.. 1982a. Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides S. e H*). I. Constant Temperature. *Journal of Experimental Botany*, 33: 288-296.
- Garcia-Huidobro, J., Monteith, J.L. e Squire, G.R.. 1985c. Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides S. e H*). III. Inhibition of germination by short exposure to high temperature. *Journal of Experimental Botany*, 36: 338-343.
- Garcia-Huidobro, J., Monteith, J.L. e Squire, G.R.. 1982b. Time, temperature and germination of pearl millet (*Pennisetum typhoides S. e H*). II. Alternating Temperature. *Journal of Experimental Botany*, 33: 297-302.
- Geiger, R.. 1980. *Manual de Microclimatologia*. F.C.G. Lisboa
- Ghuman, B. S. e Lal, R.. 1982. Temperature regime of a tropical soil in relation to surface condition and air temperature and its Fourier Analysis, *Soil Science*, 134: 133-140
- Ghyldial, B.P. e Tripathi, R.P.. 1987. *Soil Physics*. John Willey e Sons. New York
- Gilmore, E.C., Jr., e Rogers, J.S.. 1958. Heat units as a method of measuring maturity in corn. *Agronomy Journal*, 50: 611-615
- Gummerson, R.J.. 1986. The effect of constant temperatures and osmotic potentials on the germination of sugar beet. *Journal of Experimental Botany*, 37: 729-741

- Gupta, S.C., Larson, W.E. e Allmaras, R.R.. 1984. Predicting soil temperature and soil heat flux under different tillage-surface residue conditions. *Soil Sci.Soc.Am.J.*, 48: 223-232
- Hayhoe, H.N., Bootssma, A. e Dwyer, L.M.. 1987. Monitoring and analysis of soil temperature regime for soil climate classification. *Can. J. Soil Sci.*, 67: 667-678
- Ham, J.M. e Senock, R.S.. 1992. On the measurements of soil surface temperature. *Soil. Sci. Soc.Am.J.*, 56: 370-377
- Hadas, A.. 1974. Problems involved in measuring the soil thermal conductivity and diffusivity in a moist soil. *Agricultural Meteorology*, 13: 105-113
- Hageseth,G.T. e Cody Jr, A. L. 1993. Energy-level model for isothermal seed germination. *Journal of Experimental Botany*. 44: 119-125.
- Halldal, P. e French, C.S.. 1958. Algal growth in crossed gradients of light intensity and temperature. *Plant Physiology*, 34: 249-252
- Hanks, R.J., Austin, D.D. e Ondrechen, W. T.. 1971. Soil temperature estimation by a numerical method. *Soil Sci. Soc. of Am. Proc.*, 35: 665-667
- Hanks e Thorp.. 1956. Seedling emergence of wheat as related to soil moisture content, bulk density, oxygen diffusion rate and crust strength. *Soil Science Society of America Proceedings*. 20: 307-310
- Hares, M.A. e Novak, M.D.. 1992. Simulation of surface energy balance and soil temperature under strip tillage: I. Model description. *Soil. Sci. Soc.Am.J.*, 56: 22-29
- Hares, M.A. e Novak, M.D.. 1992. Simulation of surface energy balance and soil temperature under strip tillage: II. Field test. *Soil. Sci. Soc.Am.J.*, 56: 29-36
- Hatfield e Egli, D.B.. 1974. Effect of temperature on the rate of soybean hypocotyl elongation and field emergence. *Crop Science*, 14: 423-426
- Hegarty, T.W.. 1973. Temperature coefficient ( $Q_{10}$ ), seed germination and other biological processes. *Nature (London)*. 243: 305-306.
- Hegarty, T.W.. 1977. Seed activation and seed germination under moisture stress. *New Phytologist*, 78: 349-359
- Helms,T.C., Deckard, E.L., Goos, R.J. e Enz, J.W.. 1996. Soil Moisture, temperature, and drying influence on soybean emergence. *Agronomy Journal*, 88: 662-667
- Herbel, C.H. e Sosebee, R.E.. 1969. Moisture and temperature effects on emergence and initial growth of two range grasses. *Agronomy Journal*, 61: 628-631

- Hillel, D.. 1998. *Environmental soil physics*, Academic Press, San Diego
- Hodges, T. e Evans, D.W.. 1992. Leaf emergence and leaf duration related to thermal time calculations in Ceres-Maize. *Agronomy Journal*, 84:724-730
- Hopmans, J.W. e Dane, J.H.. 1986. Thermal conductivity of two porous media as a function of water content, temperature, and density, *Soil Science*, 142: 187-193
- Hopper, N.W., Overholt, J. R. e Martin, J. R.. 1979. Effect of cultivar, Temperature and Size on the germination and emergence of soybean (*Glycine max* (L) Merr.). *Ann.Bot.*, 44: 301-308
- Horton, R e Wierenga, P. J.. 1983. Estimating the soil heat flux from observations of soil temperature near the surface. *Soil. Sci. Soc.Am.J.*, 47: 14-20
- Horton, R., Wierenga, P.J. e Nielsen, D.R.. 1983. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil. Sci. Soc.Am.J.* 47: 25-32
- Hsiao, T.C., Silk, W.K. e King, J.. 1985. Leaf growth and water deficits: biophysical effects. In N.R.Baker, W.J. Davies and C.K.Ong (Eds) “*Control of leaf growth*”. 239-266. Cambridge Univ. Press.
- Hsu, F.H. e Nelson, C.J. 1986. Planting date effects on seedling development of perennial warm-season forage grasses. 1. Field emergence, *Agronomy Journal*, 78: 33-38
- Hsu, F.H., Nelson, C.J. e Chow, W.S.. 1984. A mathematical model to utilise the logistic function in germination and seedling growth. *Journal of Experimental Botany*. 35: 1629-1640.
- Hur,S.N. e Nelson, C.J.. 1985. Temperature effects on germination of birdsfoot trefoil and seombadi. *Agronomy Journal*, 77: 557-560
- Instituto de Meterologia (sem data) Alterações no Clima de Portugal <<http://www.meteo.pt/InformacaoClimatica/AltClimaP.htm>. 13-02-2001
- Itabari, J.K. Gregory, P.J. e Jones, R.K.. 1993. Effects of temperature, soil water status and depth of planting on germination and emergence of maize (*Zea mays*) adapted to semi-arid eastern Kenya. *Expl. Agric*, 29: 351-364.
- Jackson, R.D. 1973. Diurnal changes in soil water content during drying. In “Field Soil water regimes”: 37-55. *Soil Sci.Soc.Am.* Madison, Wisconsin.
- Janssen, J.G.M.. 1973. A method of recording germination curves. *Ann. Bot*, 37: 705-708

- Jansson, P. -E.. 1991. *Simulation model for soil water and heat conditions. Description of the soil model*, Swedish Univ. of Agric.Sciences, Uppsala
- Kalma, J.D..1971. The annual course of air temperature and near-surface soil temperature in a tropical savannah environment. *Agricultural Meteorology*, 8: 269-292
- Kanemasu, E.T., Bark, D.L. e Chin Choy, E.. 1975. Effect of soil temperature on sorghum emergence. *Plant and soil*. 43: 411-417.
- Kaspar, T.C., Wooley, D.G. e Taylor, H.M.. 1981. Temperature effect on the inclination of lateral roots of soybeans. *Agronomy Journal*, 73: 383-385
- Katul, G. G. e Parlange, M.B.. 1993. Determination of average field scale soil surface temperature from meteorological measurements. *Soil Science*, Vol 155, nº3: 166-174
- Ketring, D.L. e Wheless, T.G.. 1989. Thermal time requirements for phenological development of peanut. *Agronomy Journal*, 81: 910-917
- Kirby, E. J.. 1995. Factors affecting rate of leaf emergence in barley and wheat. *Crop Science*, 35: 11-19
- Knoll, H. A., Lathwell, D. J. e Brady, N. C. 1963. Effect of root zone temperature at various stages of the growing period on the growth of corn. *Agronomy Journal*, 55: 143-145
- Kramer, P.J. e Kozlowski, T.. 1960. *Fisiologia das árvores*. F.C.Gulbenkian. Lisboa
- Kluender, R.A., Thompson, L. C. e Steigerwald, D.M.. 1993. A conceptual model for predicting soil temperatures, *Soil Science*, 156: 10-18
- Krishman, A. e Kushwaha, R. S.. 1972. Analysis of soil temperatures in the arid zone of India by Fourier Techniques, *Agriculture Meteorology*, 10: 55-64
- Lafond, G.P. e Baker, R. J. 1986. Effects of genotype and seed size on speed of emergence and seedling vigour in nine spring wheat cultivars. *Crop Science*, 26: 341-346
- Lafond, G.P e Fowler, B.D.. 1989. Soil temperature and water content, seeding depth, and simulated rainfall effects on winter wheat emergence. *Agronomy Journal*, 81: 609-614
- Lal, R.. 1974. Soil temperature relations in tropical Africa and their effects on crop yield. FAO/UNDP International Expert Consultations on the use of Improved Technology for Food Production in Rained Areas of Tropical Asia. Hyderalsad, 24-28 November, 1974, India

- Lindstrom, M. J., Papendick, R. I. e Koehler, F.E. 1976. A model to predict winter wheat emergence as affected by soil temperature, water potential and depth of planting. *Agronomy Journal*. 68: 137-141
- Larcher, W.. 1977. *Ecofisiologia vegetal*, Omega. Barcelona
- Larsen, A.L.. 1965. Use of thermogradient plate for studying temperature effects on seed germination. *Proc.Int.Seed. Test.Ass.*, vol. 30, n°4: 861-867
- Larsen, A.L., Montgillion, D.P. e Schroeder, E.M.. 1973. Germination of dormant and nondormant rescuegrass seed on the thermogradient plate. *Agronomy Journal*, 65: 56-59
- Lawlor, D.J., Kanemasu, E.T., Abrecht, W.C. e Johnson, D.E.. 1990. Seed production environment influence on the base Temperature for growth of sorghum genotypes. *Agronomy Journal*, 82: 643-647
- Lemon, E.R. 1960b. Photosynthesis under field conditions. II. An aerodynamic method for determining the turbulent carbon dioxide exchange between the atmosphere and a cornfield. *Agronomy Journal*. 52: 697-703
- Leong, S.K. e Ong, C.K.. 1983. The influence of temperature and soil Water Deficit on the development and morphology of groundnut (*Arachis hypogaea* L.). *Journal of Experimental Botany*, 34: 1551-1561
- Lettau, H.H.. 1954 Improved models of thermal diffusion in the soil, *Trans.Am. Geophys. Union*, 35: 121-132.
- Lettau, H.H. 1964. A theoretical model of thermal diffusion in non-homogeneous conductors. *Gerlands Beitr. Geophysics.*, 71: 257-271
- Livingston, N.J. e de Jong, E.. 1990. Matric and osmotic potential effects on seedling emergence at different temperatures. *Agronomy Journal*, 82: 995-998
- Mahrer, Y., 1979. Prediction of soil temperature of a soil mulched with transparent polyethylene. *J. Appl. Meteorology*, 18: 1263-1267
- Marshall, B e Squire, G.R.. 1996. Non-linearity in rate-temperature relations of germination in oilseed rape. *Journal of Experimental Botany*, 47: 1369-1375.
- Martin, B.A., Smith, O.S. e O'Neil, M.. 1988. Relationships between laboratory germination tests and field emergence of maize inbreds, *Crop Science*, 28: 801-805
- Massman, W.J. 1992. Correcting errors associated with so heat flux measurements and estimating soil thermal properties from soil temperature and heat flux plate data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 59: 249-266

- Massman, W.J.. 1993. Periodic temperature variations in an inhomogeneous soil: a comparison of approximates and exact analytical expressions, *Soil Science*, 155: 331-338
- Mathews, S. e Bradnock, W. T. 1967. The detection of seed samples of wrinkle-seeded peas (*Pisum sativum* L.) of low planting value. *Proc.int. Seed.TesT.Ass.*, 32: 553-563
- Mathias, A. D. e Warrick, A.W.. 1987. Simulation of soil temperature with sparse data, *Soil Science*, 144: 394-402
- Maun, M. A., Teare, I. D. e Canode, C. L.. 1968. Effects of soil temperature on the reproductive processes of Kentucky Bluegrass (*Poa pratensis* L 'Newport') *Agronomy Journal*, 60: 666-668
- Mayer, A. M. e Poljakoff-Mayber, A.. 1975. *The germination of seeds*. Pergamon Press. Oxford.
- McGinnies, W.J.. 1960. Effects of moisture stress and temperature on germination of six range grasses. *Agronomy Journal*, 52:159-162.
- Meikle, R. N. e Treadway, T.R.. 1979. A mathematical method for estimating soil temperatures. *Soil Science*, 128: 226-242
- Meikle, R. N. e Treadway, T.R.. 1981. A mathematical method for estimating soil temperature in Canada. *Soil Science*, 131: 320-326
- Miguel, M.C. 1983. *Métodos de germinação de sementes das espécies mais utilizadas pela agricultura portuguesa*. Ministério da Agricultura, Divisão de Controlo de Germinação, Oeiras.
- Milthorpe, F.L e Moorby, J.. 1979. *An Introduction to crop Physiology*. Cambridge Univ. Press
- Mohamed, H.A.. 1984. *Varietal differences in the temperature responses of germination and crop establishment*. Ph.D.Thesis, Nottingham University.
- Mohamed, H.A., Clark, J. L. e ONG, C. K.. 1988. Genotypic Differences in the temperature responses of Tropical Crops. I. Germination characteristics of groundnut (*Arachis hypogea* L.) and pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. e H). *Journal of Experimental Botany*, 39: 1121-1128.
- Mohamed, H. A., Clark, J. L. e Ong, C. K.. 1988. Genotypic Differences in the temperature responses of Tropical Crops. II. Seedling emergence and leaf growth of groundnut (*Arachis hypogea* L.) and pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. e H). *Journal of Experimental Botany*, 39: 1129-1135.



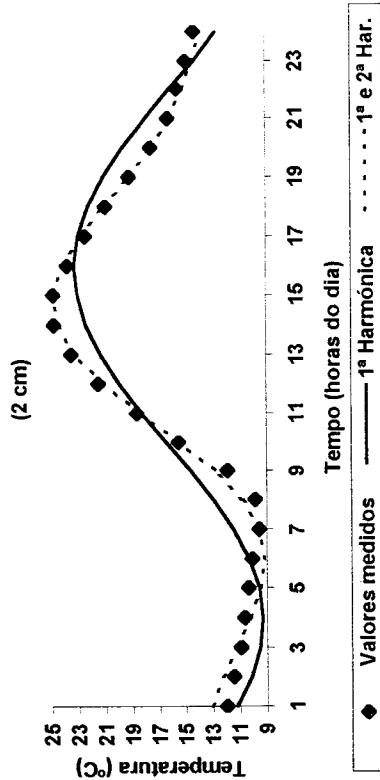
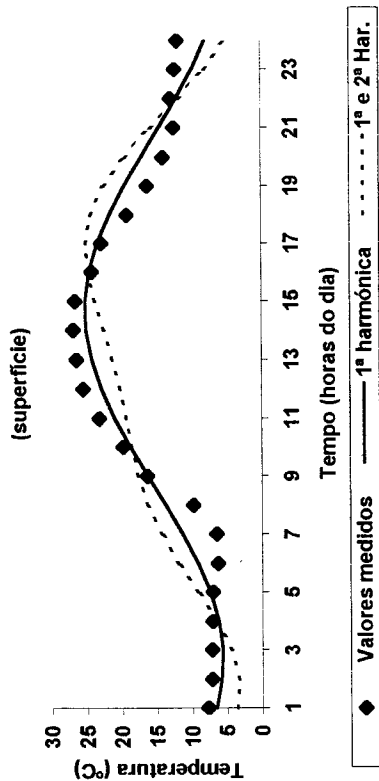
- Mohamed, H. A., Clark, J. L. e Ong, C. K.. 1988. Genotypic Differences in the temperature responses of Tropical Crops. III. Light interception and dry matter production of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. e H). *Journal of Experimental Botany*, 39: 1137-1143.
- Monteith, J.L. 1975. *Principles of Environmental Physics*, First edition. Edward Arnold, London
- Monteith, J.L.. 1977. Climate. In: Alvin, P.T. e Kozlowsky, T.T. (Eds) *Ecophysiology of tropical crops*. 1-25. Academic Press. New York.
- Monteith, J.L. e Unsworth, M. H.. 1990. *Principles of Environmental Physics*, Chapman and Hall Inc., New York.
- Moore, R.P.. 1972. Effects of mechanical injuries on viability. In "Viability of seeds", Ed. by Roberts, E.H. *Chapman and Hall Ltd.* London. 94-113
- Morrow, L.A. e Power, J.F.. 1979. Effect of soil temperature on development of perennial forage grasses. *Agronomy Journal*, 71: 7-10
- Mosher, P.N. e Miller, M.H. Influence of soil temperature on the geotropic response of corn roots (*Zea mays* L.) *Agronomy Journal*, 64: 459-462
- Mosjidis, J.A.. 1990. Daylength and temperature effects on emergence and early growth of *Sericea Lespedeza*. *Agronomy Journal*, 82: 923-926
- Muendel, H.-H.. 1986. Emergence and vigour of soybean in relation to initial seed moisture and soil temperature. *Agronomy Journal*, 78: 765-769
- Nakshsbandi, G. AL e Kohnke, H.. 1974. Thermal conductivity and diffusivity of soils as related to moisture tension and other physical properties. *Agricultural Meteorology*, 2: 271-279
- Nassar, I. N. e Horton, R.. 1989. Determination of the apparent thermal diffusivity of a nonuniform soil. *Soil Science*, vol 147, n°3: 238-244
- Nassar, I. N. e Horton, R.. 1990. Determination of soil apparent thermal diffusivity from multiharmonic temperature analysis for nonuniform soils. *Soil Science*, vol 149, n°3: 125-130
- Oke, T.R.. 1978. *Boundary layer climate*. Methuen e Co LTD. London
- Olasantan, F.O. 1988. The effects on soil temperature and moisture content and crop growth and yield of intercropping maize with melon (*Colocynthis vulgaris*), *Expl.Agric.*, 24: 67-74

- Ong, C.K.. 1983. Response to temperature in a stand of pearl millet (*Pennisetum typhoides* S. e H). I. Vegetative development. *Journal of Experimental Botany*, 34: 322-336
- Ong, C.K.. 1984. The influence of temperature and water deficits on the partitioning of dry matter in groundnut (*Arachis hypogaea* L.) *Journal of Experimental Botany*. 35: 746-755
- Otter, A.J. 1968. *Thermocouples and surface temperature measurement*. Atomic Energy of Canada Rep. AECL-3062. AECL, Chalk River, ON
- Panofsky e Brier, 1958. *Some Applications of Statistics to Meteorology*. Pennsylvania State. Univ. Press..
- Parker, Jr., J.J. e Taylor, H. M.. 1965. Soil strength and seedling emergence relations. I. Soil type, moisture tension, temperature, and planting depth effects. *Agronomy Journal*, 57: 289-291
- Passerat de Silans, A. M. B. Monteny, B. A. e Lhomme, J.P.. 1996. Apparent soil thermal diffusivity, a case study: HAPEX-Sahel experiment, *Agricultural and Forest Meteorology*, 81: 201-216
- Peacock, J. M., Soman, P., Jayachandran, R., Rani, A.U., Howarth, C.J. e Thomas, A. 1993. Effects of high soil surface temperature on seedling survival in pearl millet. *Expl.Agric*, 29: 215-225
- Pearce, R. B., Mock, J. J. e Bailey, T.B.. 1975. Rapid method for estimating leaf area per plant in maize. *Crop Science*, 15: 691-694
- Pearson, R.W., Ratliff, L.F. e Taylor, H. M.. 1970. Effect of soil temperature, strength, and pH on cotton seedling root elongation. *Agronomy Journal*, 62: 243-246
- Persaud, N e Chang, A. 1985. Computing mean apparent soil thermal diffusivity from daily observations of soil temperature at two depths, *Soil Science*, 139: 297-304
- Peixoto, J.P. e Oort, A.H.. 1992. *Physics of climate*. American Institute of Physics, New York
- Penrod, E.B., Elliott, J.M. e Brown, W.K.. 1960. Soil temperature variations, *Soil Science*, 90: 275-283
- Penrod, E.B. e Stewart, O.W.. 1967. Analysis of Geophysical data at three locations. *Soil Science*, vol. 104, n°2: 86-98
- Philip, J.R. e de Vries, D.A.. 1957. Moisture Movement in porous materials under temperature gradients. *Trans. Am.Geophys. Un*, 38: 222-228

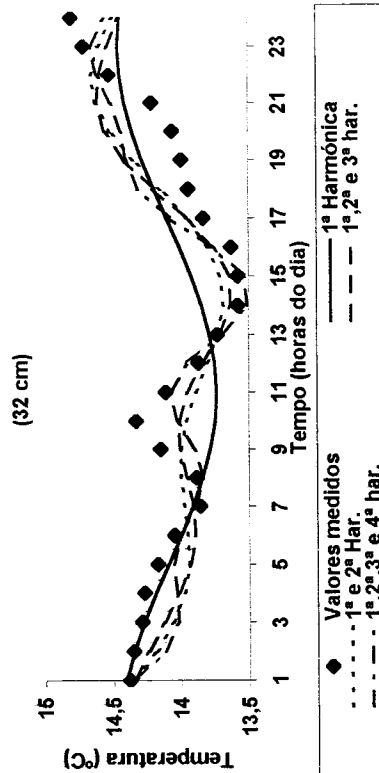
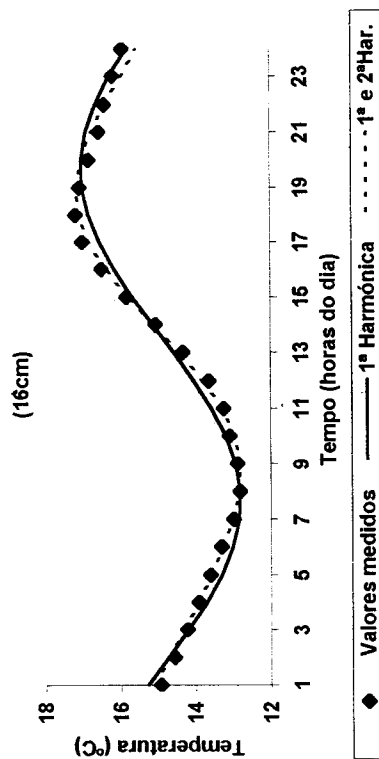
- Pollock, B.M.. 1972. Effects of environment after sowing on viability. In. E.H.Roberts (Ed). "*Viability of seeds*", 150-171. Chapman and hall, Ltd. London.
- Power, J.F., Grunes, D.L., Reichman, G.A. e Willis, W.O.. 1970. Effect of soil temperature on the rate of Barley development and nutrition. *Agronomy Journal*, 62: 567-571
- Pritchard, H.W. e Manger, K. R.. 1990. Quantal response of fruit and seed germination rate in *Quercus robur* L. and *Castanea sativa* Mill. to constant temperatures and photon dose. *Journal of Experimental Botany*, 41: 1549-1557
- Qiu, J., Mosjidis, J.A. e Williams, J.C.. 1995. Variability for temperature of germination in sericea lesledeza germplasm. *Crop Science*, 35: 237-241
- Ralston, D.S. e Daniel, W.H.. 1972. Effect of temperatures and water table depth on the growth of creeping bentgrass roots. *Agronomy Journal*, 64: 709-713
- Rao, S.C. e Dao, T. H.. 1987. Soil water effects on low-temperature seedling emergence of five Brassica cultivars, *Agronomy Journal*, 79: 517-519
- Richards, S. J. e Marsh, A.W. 1961. Irrigation based on soil suction measurements, *Soil Sci.Soc. Amer.*, 25: 65-69
- Roberts, E.H.. 1972. Dormancy: a factor affecting seed survival in the soil. . In. E.H.Roberts (Ed). "*Viability of seeds*", 321-359. Chapman and hall, Ltd. London.
- Romo, J.T. e Haferkamp, M.R. 1987. Forage kochia germination response to temperature, water stress and specific ions, *Agronomy Journal*, 79: 27-30
- Rosemberg, N., Blad, B. L. e Verma, S. B.. 1983. *Microclimate. The biological environmental* (2<sup>a</sup>ed.), John Willey e Sons, New York
- Roundy, B.A., Winkel, V.K., Cox, J.R., Dobrenz, A.K e Tewolde, H.. 1993. Sowing depth and soil water effects on seedling emergence and root morphology of three warm-season grasses. *Agronomy Journal*, 85: 975-982
- Russelle, M.P. e Bolton, F.E.. 1980. Soil temperature effects on winter wheat and winter barley emergence in the field. *Agronomy Journal*, 72: 823-827
- Salah, H.B.H. e Tardieu, F.. 1996. Quantitative analysis of the combined effects of temperature, evaporative demand and light on leaf elongation rate in well-watered field and laboratory-grown maize plants. *Journal of Experimental Botany*, 47: 1689-1698
- Scharringa, M.. 1976. On the representativeness of soil temperature measurements. *Agricultural Meteorology* 16: 263-276

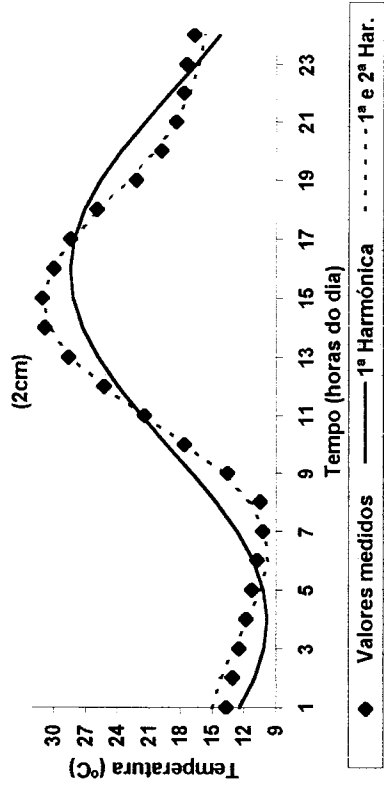
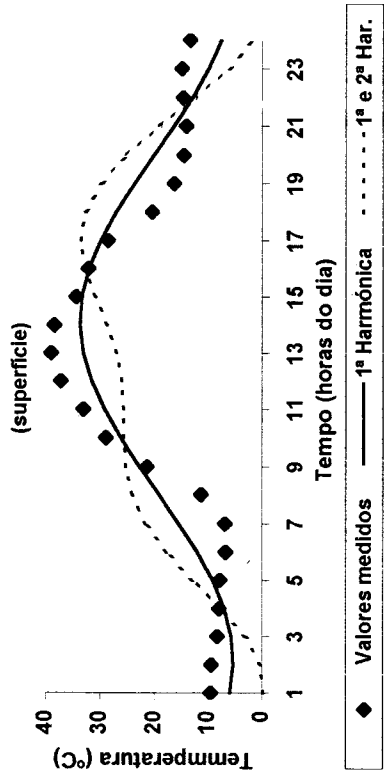
- Schimpf, D.J. , Flint, S.D. e Palmblad, I. G. 1977. Representation of germination curves with the logistic function. *Ann.Bot.*, 41: 1357-1360
- Schneiter, A.A.. 1978. Non-destructive leaf area estimation in sunflower. *Agronomy Journal*, 70: 141-142
- Scott, S.J., Jones, R.A. e Williams, W.A.. 1984. Review of data analysis methods for seed germination. *Crop Science*, 24: 1192-1198
- Seemann, J..1979. Measuring technology. In: J. Seemann *et al.* (Eds) "Agrometeorology", 40-45. Springer-Verlag, Berlin
- Sellers, W.D.. 1965. *Physical Climatology*. The University of Chicago Press, Chicago e London
- Sepaskhak, A.R. e Boersma, L.. 1979. Thermal conductivity of soils as a function of temperature and water content. *Soil Sci. Soc. Am.J.*, 43: 439 - 444
- Sharma, M.L.. 1976. Interaction of water potential and temperature effects on germination of three semi-arid plant species. *Agronomy Journal*, 68: 390-394
- Sharratt, B.S.. 1991. Shoot growth, root length density, and use of barley grown at different soil temperatures. *Agronomy Journal*, 83: 237-239
- Simon, E.W., Minchin, A, McMenamin, M.M e Smith, J.M.. 1976. The low temperature limit for seed germination. *New Phytol.* 77: 301-311
- Singer, I.A. e Brown, R.M.. 1956. The annual variation of subsoil temperature about a 600-foot circle. *Trans.Am.Geophys.Union*, 37: 743-748
- Singh, N.T., Aggarwal, G.C. e Brar, G.S.. 1984. Effect of soil-moisture stress on heat unit requirement of wheat at maturity. *Indian J.Agric. Sci.*, 54: 442-444
- Singh e Dhaliwal.. 1972. Effect of soil temperature on seedling emergence in different crops (short communication). *Plant and soil*, 37: 441-444
- Slafer, G.A. e Savin, R.. 1991. Developmental base temperature in different phenological phases of wheat (*Triticum aestivum*) *Journal of Experimental Botany*, 42: 1077-1082
- Smith, R.L., Hoveland, C.S. e Hanna, W.W.. 1989. Water stress and temperature in relation to seed germination of Pearl millet and Sorghum. *Agronomy Journal*, 81: 303-305
- Socebee, R.E e Herbel, C.H.1969. Effects of high temperatures on emergence and initial growth of range plants. *Agronomy Journal*, 61: 621-624
- Stamp, P.. 1987. Seedling development of adapted and exotic maize genotypes at severe chilling stress. *Journal of Experimental Botany*, 38: 1336-1342

- Stathers, R.J. Black, T.A. e Novak, M.D.. 1985. Modelling soil temperature in forest clearcuts using climatic station data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 36: 153-164
- Stoffer, R.V, e van Riper, G.E.. 1964. Effect of soil temperature and soil moisture on the physiology of sorghum. *Agronomy Journal*, 56: 447-450
- Stone, J.A. Kaspar, T.C. e Taylor, H.M. 1983. Predicting soybean-rooting depth as a function of soil temperature. *Agronomy Journal*, 75: 1050-1054
- Streck, N. A. Schneider, F.M. e Buriol, G.A.. 1996. Soil heating by solarization inside plastic greenhouse in Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brazil *Agricultural and Forest Meteorology*, 82: 73-82
- Stringer, E.T.. 1972. *Techniques of Climatology*. W.H. Freeman and Company, San Francisco
- Stucky, D.J.. 1976. Effect of planting depth, temperature, and cultivars on emergence and yield of double-cropped soybeans. *Agronomy Journal*, 68: 291-294
- Sui, H, Zen, D e Chen, F.. 1992. A numerical model for simulating the temperature and moisture regimes of soil under various mulches. *Agricultural and Forest Meteorology*, 61: 281-299
- Tanner, C.B., e Pelton, W.L., 1960. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance of Penman. *J. Geophys.Res.*, 65: 3391-3413
- Taylor, H.M.. 1962. Seedling emergence of wheat, grain sorghum, and guar as affected by rigidity and thickness of soil crusts. *Soil Science Society of America Proceedings*, 26: 431-433
- Taylor, S. e Ashcroft, G. L.. 1972. *Physical edaphology*, W.H. Freeman and Company, San Francisco
- Taylor, S.A. e Jackson, R.. 1986. Temperature. *In* Methods of soil analysis. Part I. Physical and mineralogical methods. *American Society of Agronomy – Soil Society of America*, 927-944
- Thomson, J.R. . 1979. *An introduction to seed technology*. Leonard Hill. London
- Thompson. P.A.. 1970. Characterisation of the germination responses to temperature of species and ecotypes. *Nature* (London). 225: 827-831
- Thompson, P.A., Cox, S.A. e Sanderson, R.H.. 1979. Characterisation of the germination response to temperature of *Lactuca sativa*. *Ann.Bot.*, 43: 319-334
- Thompson. P.A. e Fox D.J.C.. 1976. The germination responses of vegetable seeds in relation to their history of cultivation by man. *Scientia Horticulturae*, 4: 1-14

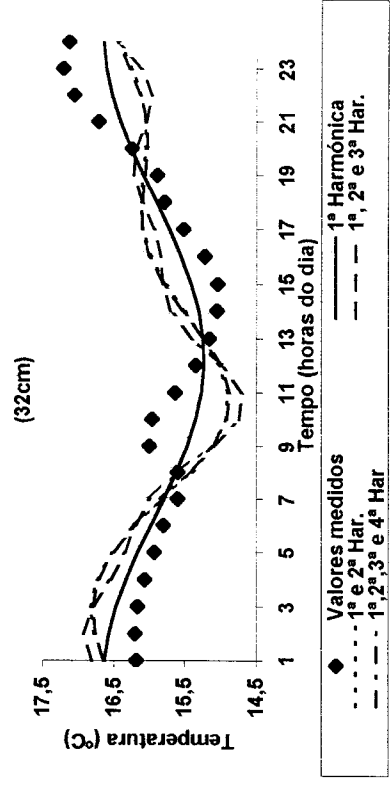
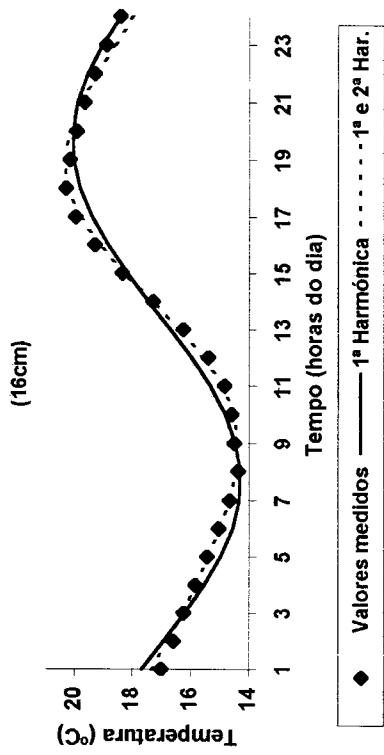


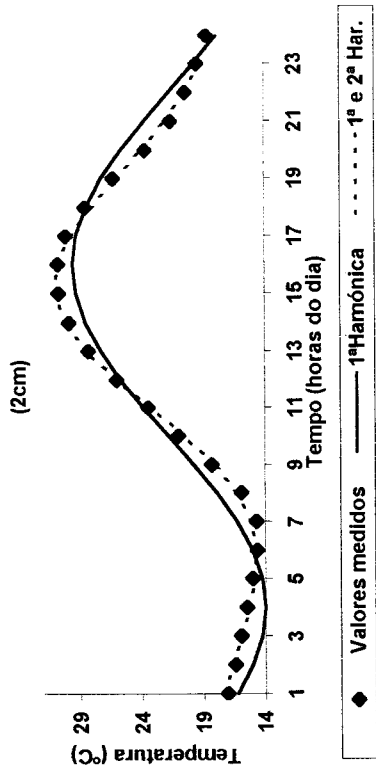
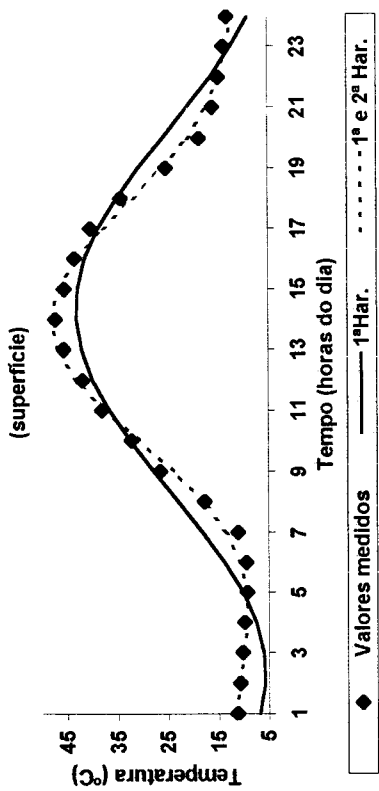
H10 - Solo Pmg, dia M



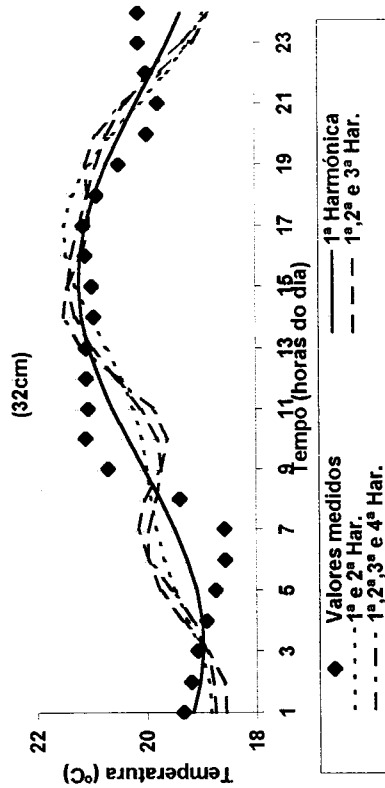
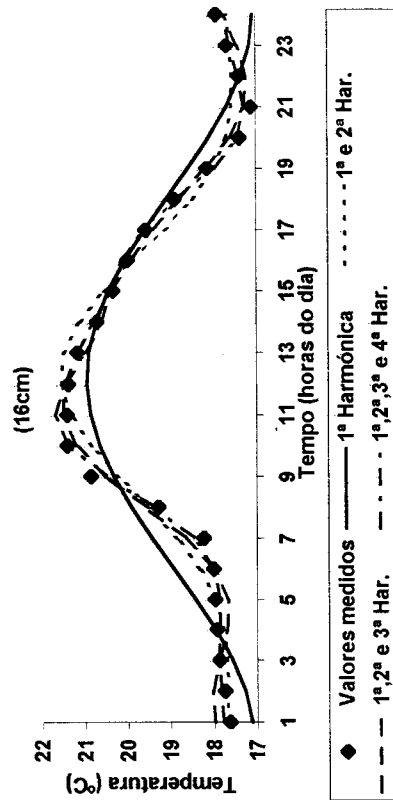


H9 - Solo Pmg, dia I

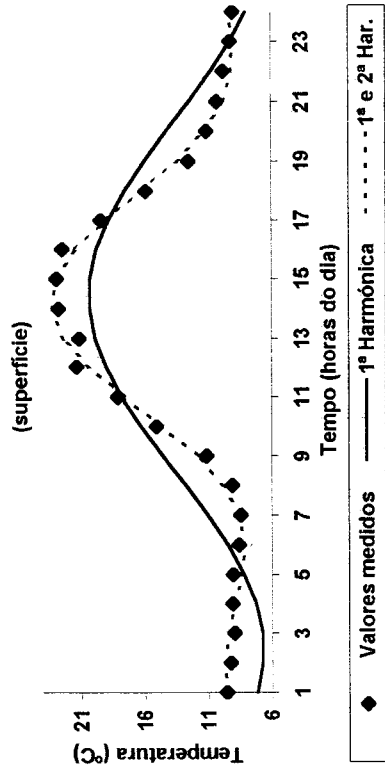




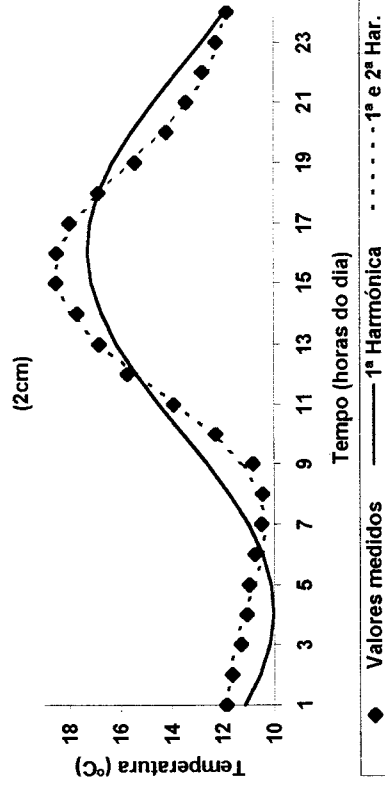
H8 - Solo Cb, dia L - Hm





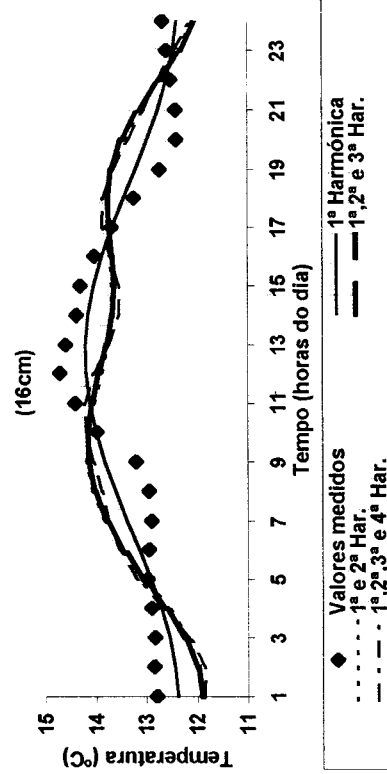


(a)

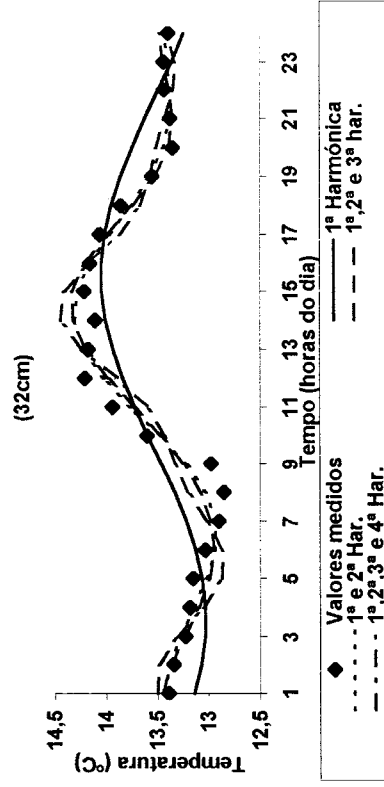


(b)

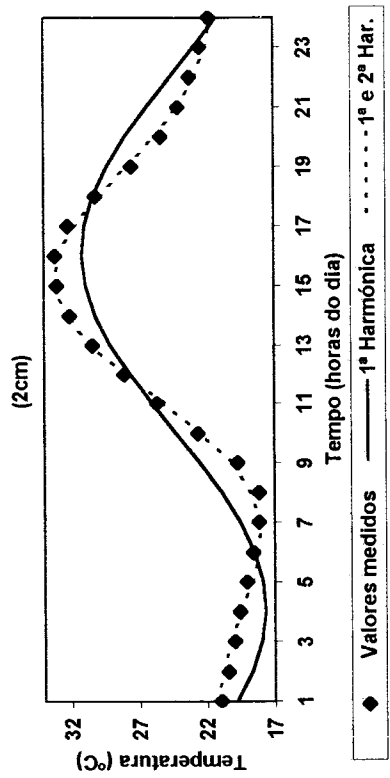
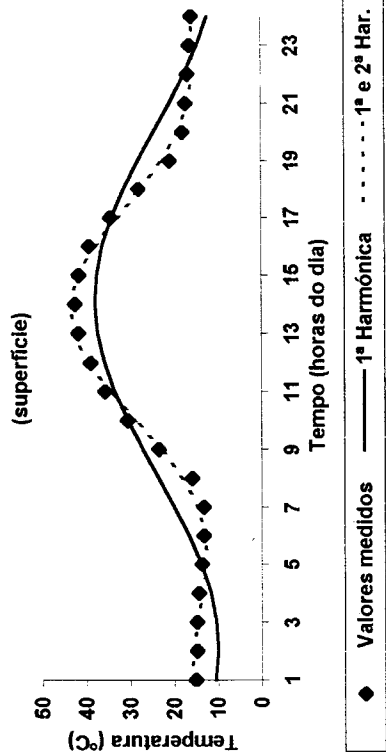
H7 - Solo Cb, dia M - He



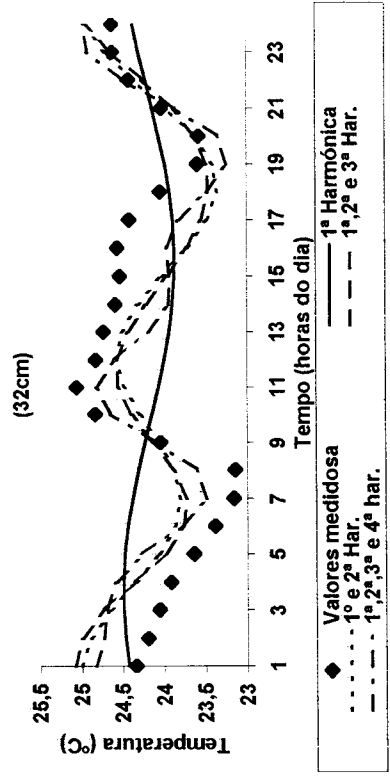
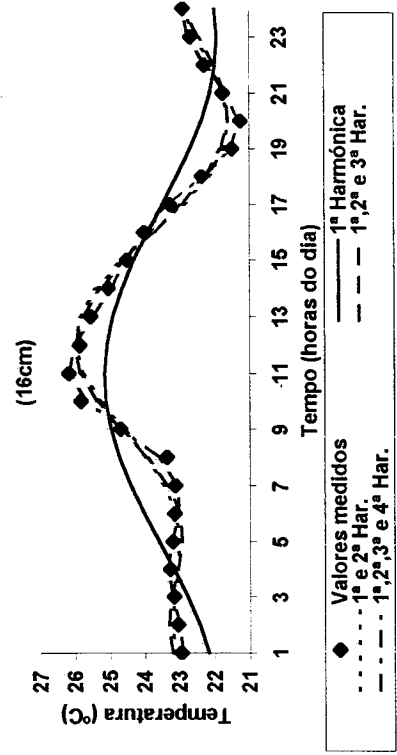
(c)

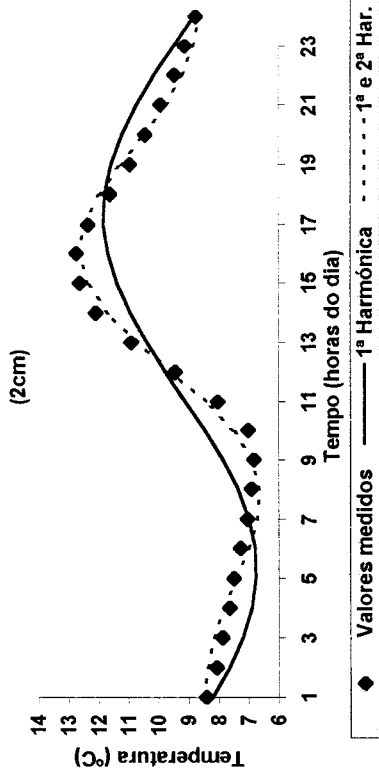
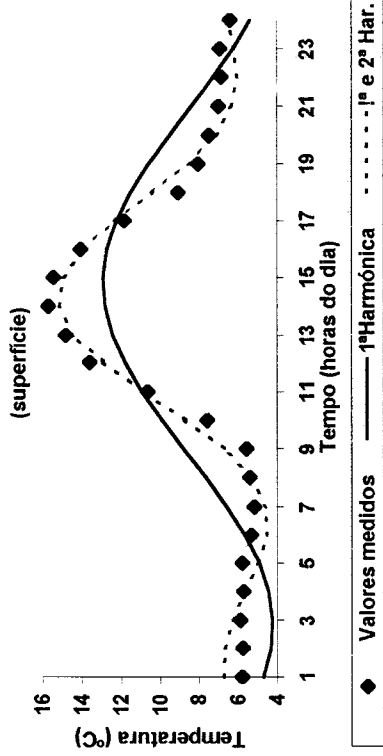


(d)

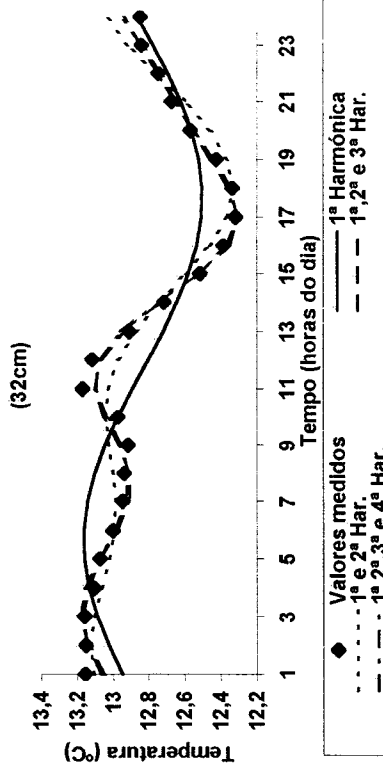
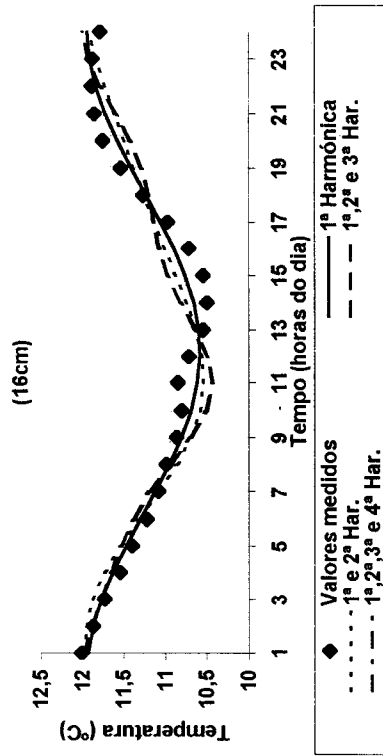


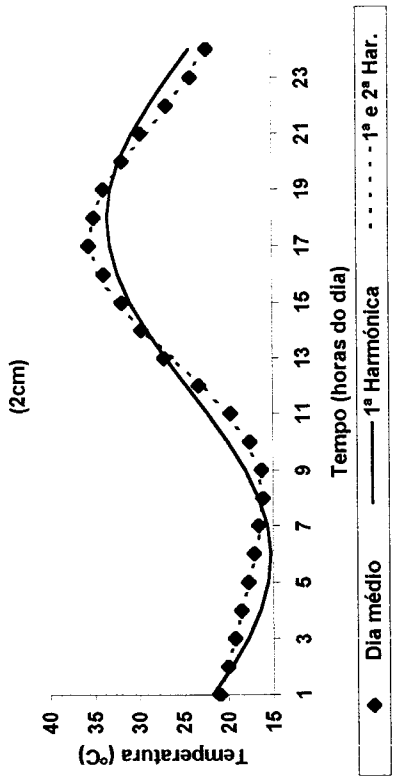
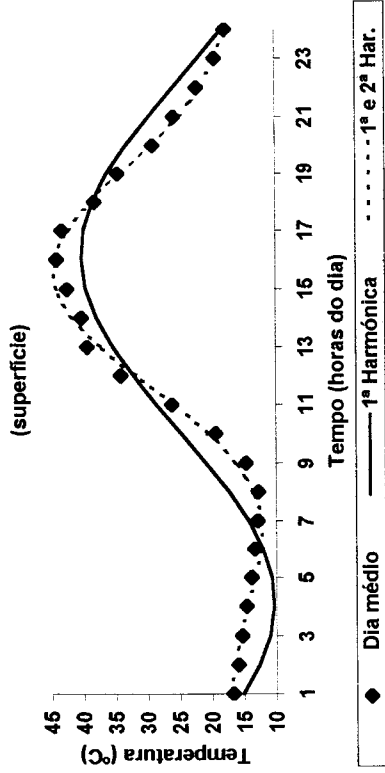
H6 - Solo Cb, dia M - Hb



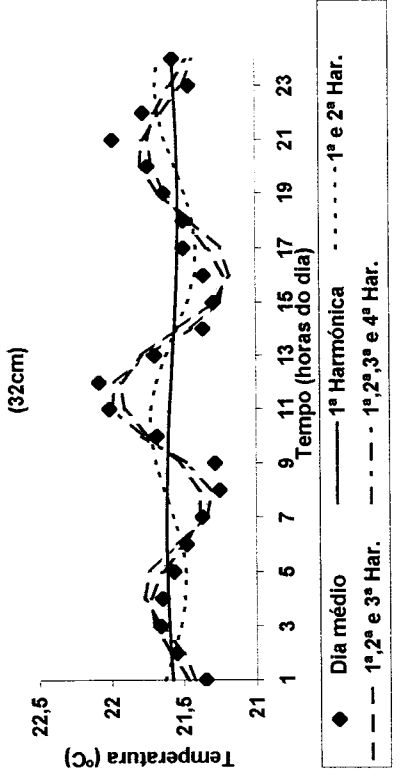
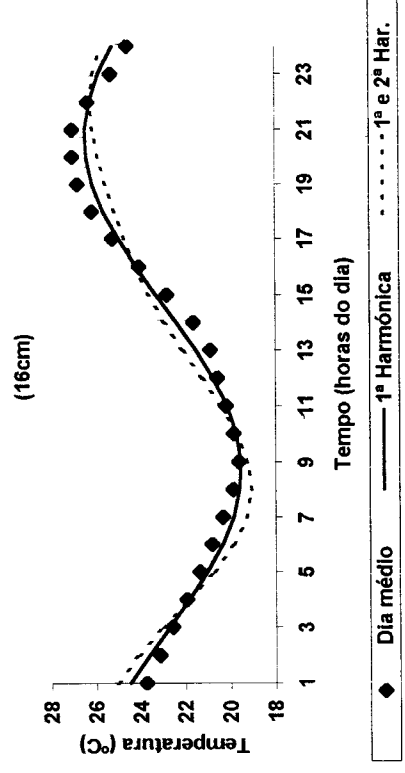


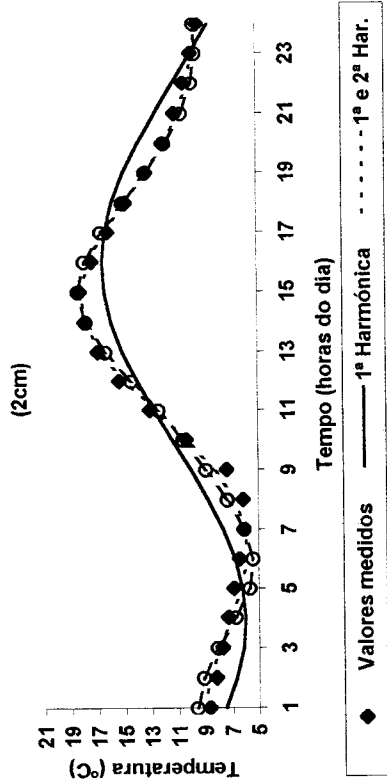
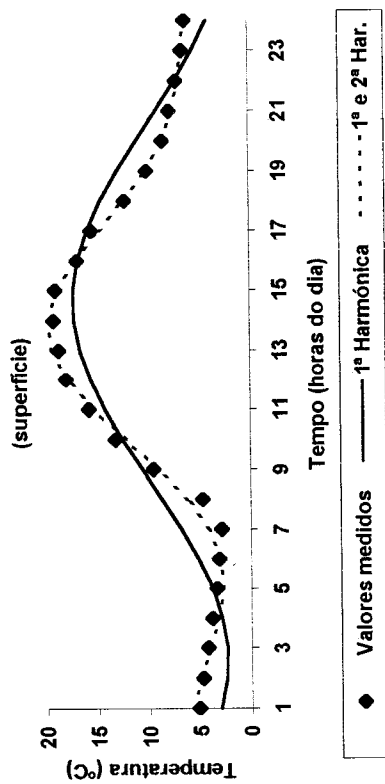
H5 - Solo Cb, dia C - Hm



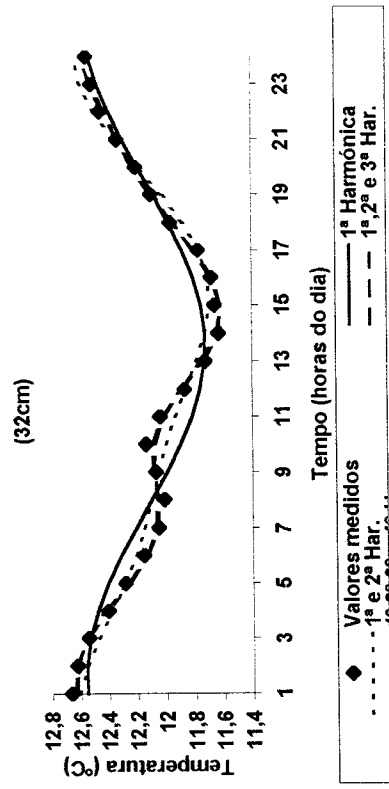
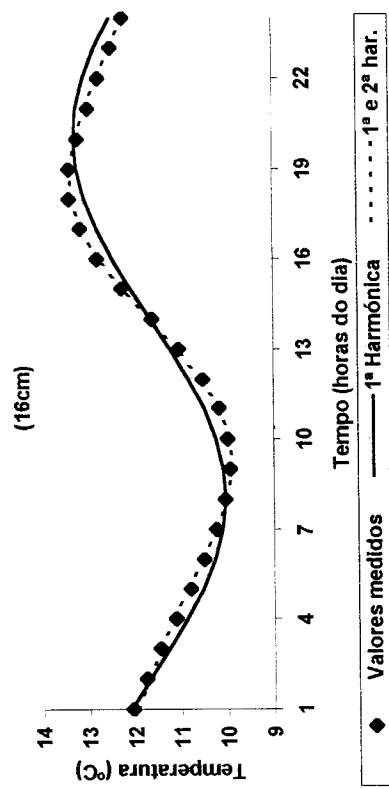


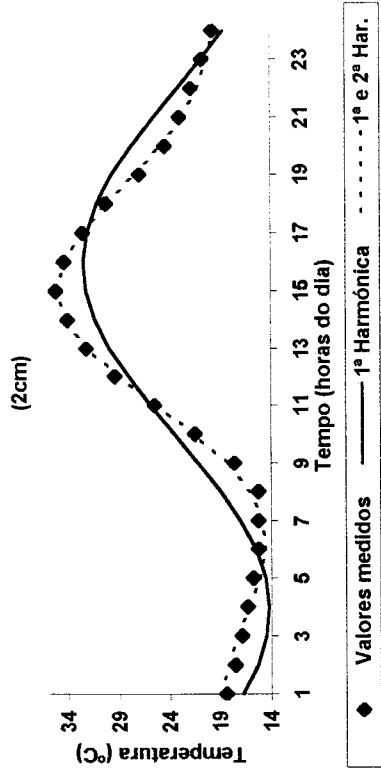
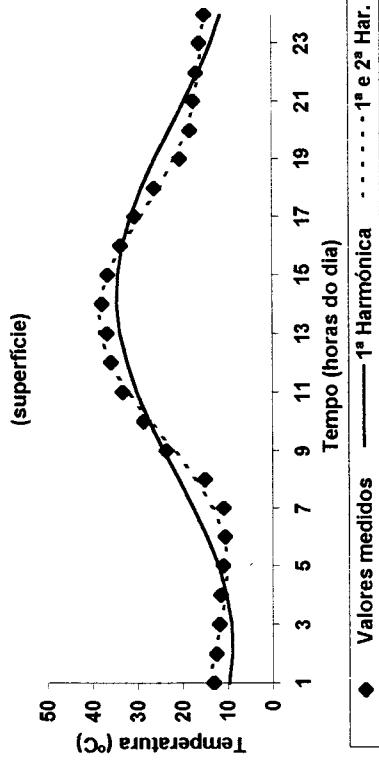
**H4 - Solo Pmg, dia L - Hm**



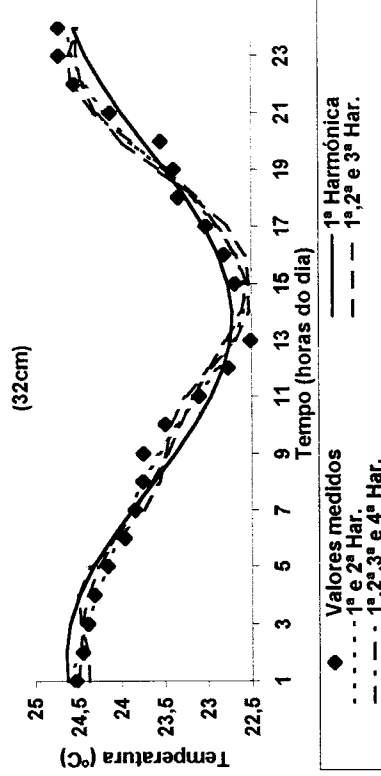
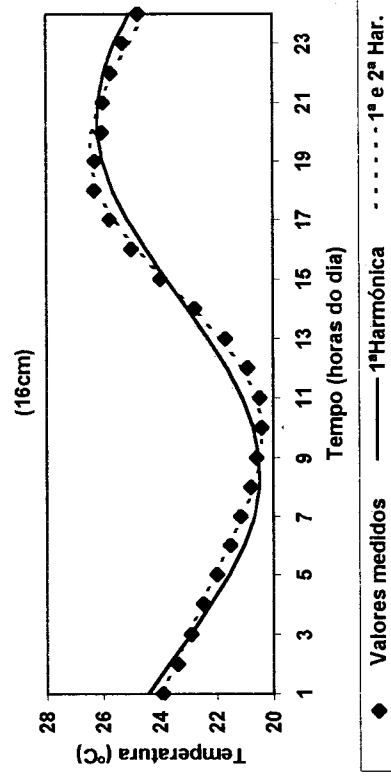


H3 - Solo Pmg, dia M - He

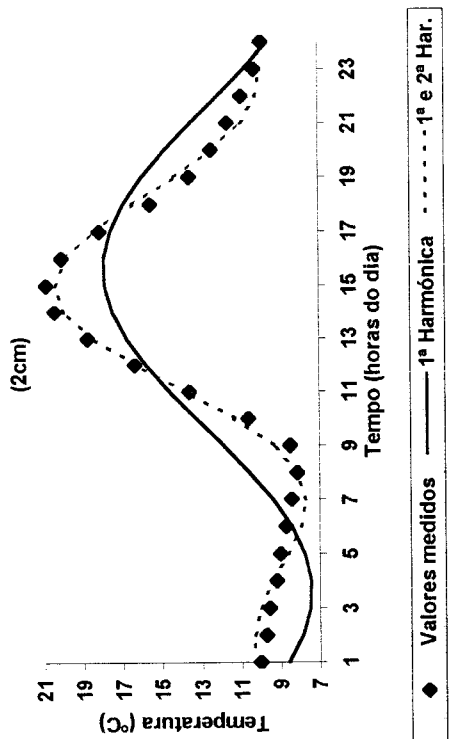
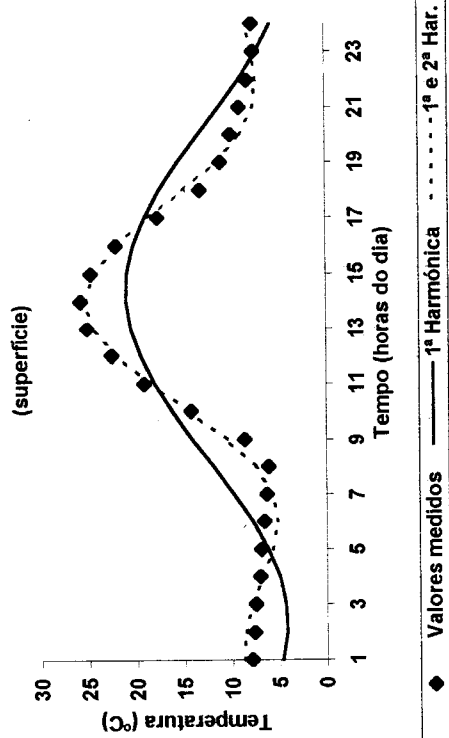




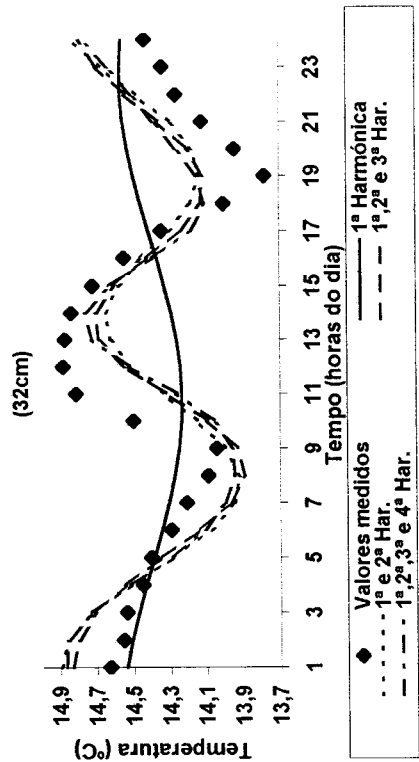
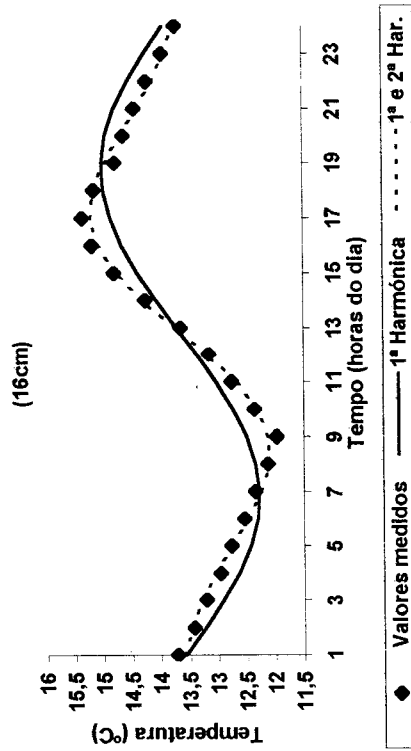
H2 - Solo Pmg, dia M - Hb



ANEXO H. Variação temporal da temperatura média horária nos solos Pmg e Cb a várias profundidades e vários dias-tipo: valores medidos e valores simulados pela análise harmônica



H1 - Solo Pmg, dia C - Hm



E) Sorgo

Nº da experiência (Solo Pmg)	DAS	ÁREA FOLIAR	DESVIO PADRÃO	Nº da experiência (Solo Cb)	DAS	ÁREA FOLIAR	DESVIO PADRÃO
		(cm <sup>2</sup> )				(cm <sup>2</sup> )	
9	10	<u>4,44</u>	<u>3,184</u>	20	11	<u>1,35</u>	<u>0,509</u>
	13	<u>9,76</u>	<u>7,417</u>		14	<u>2,13</u>	<u>1,213</u>
	18	<u>22,63</u>	<u>23,806</u>		17	<u>2,23</u>	<u>1,704</u>
	21	<u>17,12</u>	<u>14,539</u>		20	<u>2,58</u>	<u>2,270</u>
17	11	<u>0,96</u>	<u>0,710</u>	21	10	0,76	0,126
	14	<u>1,66</u>	<u>2,003</u>		13	2,27	0,793
	17	<u>3,55</u>	<u>5,005</u>		16	2,51	0,792
	20	<u>4,25</u>	<u>5,219</u>		22	4,37	2,546
	23	<u>7,49</u>	<u>5,869</u>		25	5,14	1,884
20	14	0,45	0,240		28	4,11	2,851
	17	2,27	0,893		31	5,03	1,777
	20	3,35	1,200		34	3,75	3,879
	23	5,71	2,395		37	5,94	4,023
	29	13,84	6,736		40	6,54	3,932
24	7	0,83	0,722	24	20	5,07	2,357
	10	4,79	3,900	23	23	6,15	2,087
	13	9,33	7,835	26	26	12,68	6,736
	16	<u>15,84</u>	<u>16,132</u>	25	9	0,87	0,262
	19	<u>16,98</u>	<u>15,373</u>		12	2,66	1,168
			15		2,85	1,016	
			18		<u>6,85</u>	<u>1,580</u>	
			21		<u>11,50</u>	<u>4,365</u>	
			27	<u>28,53</u>	<u>9,249</u>		
			28	13	4,40	3,194	
			16	7,80	6,797		
			19	<u>19,25</u>	<u>18,226</u>		
			29	10	2,06	1,172	
				13	3,13	0,632	
				17	11,68	4,617	
				22	17,14	6,069	
				25	17,16	15,986	
			30	5	0,43	0,370	
				9	<u>1,94</u>	<u>0,912</u>	
				11	<u>2,05</u>	<u>0,736</u>	
				14	<u>4,21</u>	<u>2,336</u>	
				17	<u>5,76</u>	<u>2,796</u>	
				20	8,13	3,216	
				23	9,78	3,756	
			25	13,38	4,240		
			31	25	0,51	0,338	
				28	0,63	0,253	
				32	1,17	1,048	
				35	1,48	1,066	
				37	1,00	0,635	
				46	0,42	0,574	



D) Milho

N° da experiência (Solo Pmg)	DAS	ÁREA FOLIAR	DESVIO PADRÃO	N° da experiência (Solo Cb)	DAS	ÁREA FOLIAR	DESVIO PADRÃO			
		(cm <sup>2</sup> )				(cm <sup>2</sup> )				
12	22	3,56	2,448	11	12	4,72	0,556			
	25	4,92	2,997		15	10,41	3,765			
	28	5,98	3,196		18	13,71	2,243			
	34	10,21	4,557		21	18,84	9,929			
	37	13,00	5,563		24	27,74	11,321			
11	14	4,09	0,610		27	30,91	8,184			
	17	4,22	0,684	30	40,83	19,094				
	20	8,31	4,030	12	13	4,72	0,556			
	23	14,81	5,663		16	5,60	1,893			
	26	17,41	8,540		19	8,40	3,121			
	29	19,54	9,971		22	9,96	1,633			
	35	27,16	12,256		25	16,81	4,968			
	38	34,86	19,519		28	17,13	5,115			
	41	42,43	19,525	31	26,42	5,451				
44	56,33	27,438	20	11	<u>2,73</u>	<u>1,101</u>				
7	9	2,77		0,384	14	<u>2,30</u>	<u>0,871</u>			
	12	11,77		1,724	17	<u>2,56</u>	<u>2,481</u>			
	15	27,38		3,896	20	<u>1,84</u>	<u>1,705</u>			
	18	39,17		20,812	23	<u>1,81</u>	<u>1,958</u>			
	20	56,34	8,650	21	10	3,06	2,129			
24	73,27	31,026	13		8,93	2,391				
9	10	<u>10,97</u>	<u>3,564</u>		16	9,18	3,542			
	13	<u>16,02</u>	<u>9,965</u>		19	9,99	2,501			
	16	<u>24,62</u>	<u>26,988</u>		22	20,00	7,723			
	21	<u>17,55</u>	<u>30,007</u>		25	22,79	9,935			
	25	<u>25,49</u>	<u>27,081</u>	31	21,52	11,898				
10	11	<u>8,07</u>	<u>5,689</u>	37	28,76	15,716				
	16	<u>23,37</u>	<u>10,445</u>	43	25,39	16,043				
	19	<u>31,93</u>	<u>29,246</u>	49	34,82	12,911				
	23	<u>43,62</u>	<u>21,034</u>	67	48,02	16,174				
	25	<u>68,92</u>	<u>21,271</u>	23	18	3,75	0,501			
11					21	3,76	0,521			
					24	9,64	1,605			
					35	23,56	8,459			
					39	37,94	13,670			
					42	44,55	15,394			
				46	47,10	19,250				
				25				11	4,58	0,457
								14	7,15	3,959
								<u>17</u>	<u>12,06</u>	<u>2,656</u>
								<u>20</u>	<u>21,95</u>	<u>10,828</u>
				26				13	3,77	2,125
								16	4,50	0,838
								19	10,14	5,009
								22	13,74	3,050
								28	26,36	11,236
				31				31	38,99	15,368
								19	2,89	2,556
								22	4,78	1,006
25	4,91	0,887								
28	5,01	0,839								
				31	8,11	5,019				

C) Girassol

Nº da experiência (Solo Pmg)	DAS	ÁREA FOLIAR	DESVIO PADRÃO	Nº da experiência (Solo Cb)	DAS	ÁREA FOLIAR	DESVIO PADRÃO
		(cm <sup>2</sup> )				(cm <sup>2</sup> )	
7	12	1,78	0,675	16	19	0,17	0,263
	15	9,90	2,732		22	1,65	0,643
	18	28,92	7,549		25	4,62	1,308
9	10	<u>2,40</u>	<u>2,182</u>	31	17,65	3,645	
	13	<u>15,33</u>	<u>8,915</u>	34	25,51	5,085	
	18	<u>61,54</u>	<u>31,228</u>	37	35,95	7,325	
10	11	<u>16,80</u>	<u>8,015</u>	18	14	0,24	0,147
	23	<u>85,46</u>	<u>43,560</u>		17	3,15	1,096
17	11	<u>0,43</u>	<u>0,432</u>		20	7,51	1,849
	14	<u>2,24</u>	<u>1,548</u>		23	11,82	3,850
	17	<u>4,03</u>	<u>2,767</u>		26	20,08	9,373
	20	<u>5,33</u>	<u>5,113</u>	29	37,68	21,339	
19	23	<u>8,35</u>	<u>7,064</u>	20	11	<u>0,24</u>	<u>0,084</u>
	26	<u>15,52</u>	<u>16,734</u>		14	<u>0,51</u>	<u>0,130</u>
	28	2,38	2,510		17	<u>0,64</u>	<u>0,520</u>
	34	4,88	5,654	21	10	0,19	0,105
41	6,71	11,723	13		1,70	0,783	
47	8,16	13,405	16		3,69	1,586	
22	19	1,78	0,957		22	12,70	4,456
	22	5,24	1,926		25	24,97	8,543
	29	14,30	7,211	28	23,42	7,533	
	32	27,97	15,940	34	33,85	10,500	
22				22	19	0,74	0,541
					22	2,85	1,779
					25	8,03	3,975
					28	17,22	8,316
				31	33,86	16,768	
25				25	12	0,79	0,574
					15	3,74	1,540
					18	14,85	4,428
					21	24,48	7,112
				24	56,16	17,101	
26				26	14	0,37	0,302
					17	2,76	0,641
					20	6,93	1,680
					23	16,70	4,220
					26	29,51	7,889
27				29	44,94	12,651	
				27	13	0,55	0,347
					16	3,13	0,924
					19	8,82	2,775
					22	18,62	4,197
			25	49,38	10,198		
28				28	10	1,13	0,902
					13	<u>7,01</u>	<u>3,420</u>
					16	<u>17,43</u>	<u>7,679</u>
29				29	11	0,43	0,451
					14	5,97	2,503
					18	13,96	5,732
					22	20,35	10,222
					23	21,31	10,182
30				26	25,64	11,899	
				30	11	<u>0,87</u>	<u>0,677</u>
					20	<u>13,28</u>	<u>4,696</u>
					23	<u>24,94</u>	<u>8,285</u>
			26		<u>42,50</u>	<u>14,658</u>	

B) Fava

Nº da experiência (Solo Pmg)	DAS	ÁREA FOLIAR	DESVIO PADRÃO	Nº da experiência (Solo Cb)	DAS	ÁREA FOLIAR	DESVIO PADRÃO
		(cm <sup>2</sup> )				(cm <sup>2</sup> )	
14	31	20,20	7,313	1	27	41,19	13,258
	34	27,79	6,999		36	79,09	22,672
	37	36,08	9,672		41	105,70	28,994
	40	42,62	9,393		44	114,62	32,982
	43	52,07	14,492		51	150,22	38,837
	46	54,95	12,852	11	12	19,61	6,800
	49	61,73	13,525		15	32,23	8,386
	52	74,06	15,014		18	60,42	12,762
12	22	26,25	5,989	21	80,60	18,387	
	25	40,89	10,002	24	100,13	18,686	
	28	52,55	13,276	27	127,09	23,879	
	34	73,77	21,863	12	14	10,70	3,944
	37	89,67	20,995		17	25,03	8,956
	40	97,80	17,838		20	59,50	18,311
43	106,90	28,174	23		61,08	11,226	
18	18	8,58	7,194	26	87,82	16,573	
	21	20,86	9,645	29	93,09	19,864	
	27	41,33	19,006	32	116,04	24,366	
	30	54,13	19,650	16	19	22,31	4,794
	33	63,21	24,103		22	32,62	6,639
	36	65,25	24,597		25	58,62	14,757
	39	69,58	24,761		28	76,41	18,638
	42	82,54	29,342		31	96,60	23,838
48	100,99	33,159	34		102,90	25,790	
11	14	3,36	2,728	37	120,62	30,266	
	17	11,68	7,873	17	12	<u>2,38</u>	<u>2,731</u>
	20	30,84	10,257		15	<u>12,38</u>	<u>6,053</u>
	23	55,02	12,880		18	<u>21,37</u>	<u>6,313</u>
	26	62,48	13,494		21	<u>37,94</u>	<u>11,324</u>
	29	61,25	16,361		24	<u>61,79</u>	<u>17,756</u>
35	89,28	37,391	27		<u>87,83</u>	<u>22,028</u>	
20	20	22,98	5,934	21	13	7,56	1,894
	23	65,80	20,443		16	24,58	6,490
	29	89,82	21,290		19	44,87	17,877
	32	109,22	25,710		22	69,19	20,790
26				25	96,15	31,868	
				26	14	7,35	3,352
					17	30,49	6,604
					23	91,51	47,874
			26		105,93	24,474	

ANEXO G. Valores médios da área foliar por planta e respectivo desvio-padrão da ervilha (a), fava (b), girassol (c), milho (d) e sorgo (e), em colheitas efectuadas nos dias após sementeira (DAS) indicados, nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa). Números

sublinhados: medições afectadas por teores de humidade do solo inferiores a

50% da C.U.

A) Ervilha

Nº da experiência (Solo Pmg)	DAS	ÁREA FOLIAR	DESVIO PADRÃO	Nº da experiência (Solo Cb)	DAS	ÁREA FOLIAR	DESVIO PADRÃO
		(cm <sup>2</sup> )				(cm <sup>2</sup> )	
11	14	3,43	2,037	1	19	2,16	0,754
	17	5,12	2,404		27	9,79	1,792
	20	9,06	4,206		36	15,24	3,360
	23	12,20	5,204		41	15,88	2,510
	26	13,15	7,255		44	17,36	4,394
	29	15,64	9,210				
12	22	7,26	3,245	11	12	5,55	3,603
	25	8,98	4,073		15	6,21	3,271
	28	9,01	3,899		18	12,38	5,272
	34	12,53	7,664		21	15,60	6,877
			24		18,46	6,877	
13	28	2,86	2,741	27	18,44	8,248	
	31	3,40	2,510	12	14	2,45	1,218
	34	3,87	3,539		17	6,71	1,568
	37	4,38	3,955		20	8,09	2,787
	43	6,44	4,561		23	9,66	3,303
	46	6,53	5,300		26	14,27	5,074
	49	6,97	4,971		29	15,85	4,648
52	8,99	5,882	32		18,45	4,329	
14	25	2,08	1,375	17	12	1,50	1,276
	31	7,15	3,276		15	3,46	2,032
	34	8,22	3,758		18	6,30	3,793
	37	11,03	5,060		21	9,70	4,192
	40	13,63	5,811		24	15,06	6,079
	43	16,39	7,009		27	20,52	8,884
	46	18,85	7,117	20	11	<u>1,02</u>	<u>0,442</u>
17	11	<u>0,89</u>	<u>0,689</u>		14	<u>1,60</u>	<u>1,431</u>
	14	<u>2,56</u>	<u>2,752</u>		17	<u>1,51</u>	<u>2,057</u>
	17	<u>5,38</u>	<u>4,723</u>	20	<u>0,48</u>	<u>1,031</u>	
	20	<u>7,08</u>	<u>6,129</u>	31	18	2,26	1,145
	23	<u>10,66</u>	<u>9,344</u>		19	5,17	2,656
20	17	1,65	0,385		22	6,87	2,618
	20	5,66	1,544		25	8,24	3,665
	23	14,23	5,050		28	9,36	3,456
	26	19,50	6,054		32	10,18	4,163
24	11	0,62	0,516		35	11,66	4,173
	14	3,57	2,164		37	8,27	7,206
	17	5,74	3,875		46	2,29	5,520
	20	<u>8,82</u>	<u>5,489</u>				
	23	<u>7,24</u>	<u>4,851</u>				
	26	<u>5,88</u>	<u>6,013</u>				
	30	<u>2,48</u>	<u>4,840</u>				

ANEXO F. Regressões lineares entre as taxas de aparecimento de cada uma das primeiras cinco folhas das culturas indicadas e as temperaturas médias da zona meristemática nos solos Pmg (Évora) e Cb (Lisboa); coeficientes de determinação e níveis de significância estatística (Teste F)

Culturas	Solos	Nº de ordem da folha	Equação de regressão	Coefficiente de determinação (R <sup>2</sup> )	Significância (Teste F)	Nº de pontos regredidos
Ervilha	Pmg	1	$y = 0,0041x + 0,0074$	0,88	0,0054	6
		2	$y = 0,0036x + 0,004$	0,97	0,0004	6
		3	$y = 0,0034x - 0,0033$	0,98	0,0001	6
		4	$y = 0,0034x - 0,0087$	0,98	0,0009	5
		5	$y = 0,0028x - 0,0062$	0,99	0,0002	5
	Cb	1	$y = 0,0067x - 0,0305$	0,94	0,0323	4
		2	$y = 0,0053x - 0,0193$	0,86	0,0736	4
		3	$y = 0,0033x - 0,0031$	0,92	0,0413	4
		4	$y = 0,0035x - 0,0164$	0,90	0,0138	5
		5	$y = 0,0027x - 0,0094$	0,98	0,0119	4
Fava	Pmg	1	$y = 0,0044x - 0,0065$	0,86	0,0234	5
		2	$y = 0,0035x - 0,0007$	0,88	0,0190	5
		3	$y = 0,0033x - 0,0066$	0,88	0,0195	5
		4	$y = 0,0027x - 0,0074$	0,88	0,0186	5
		5	$y = 0,0019x - 0,0006$	0,94	0,0062	5
	Cb	1	$y = 0,0047x - 0,0033$	0,77	0,0017	6
		2	$y = 0,0043x - 0,0093$	0,77	0,0213	6
		3	$y = 0,003x - 0,0027$	0,91	0,0207	7
		4	$y = 0,0026x - 0,0047$	0,83	0,0009	7
		5	$y = 0,0027x - 0,011$	0,97	0,0041	5
Girassol	Pmg	1	$y = 0,0074x - 0,0649$	0,97	0,0003	6
		2	- -	-	-	-
		3	- -	-	-	-
	Cb	1	$y = 0,0073x - 0,0474$	0,90	0,0010	7
		2	$y = 0,0037x - 0,0164$	0,887	0,0005	8
		3	- -	-	-	-
Milho	Pmg	1	$y = 0,0075x - 0,05$	0,97	0,0135	4
		2	$y = 0,0054x - 0,0358$	1,00	0,0021	4
		3	- -	-	-	-
		4	- -	-	-	-
		5	- -	-	-	-
	Cb	1	$y = 0,0067x - 0,041$	0,89	0,0013	7
		2	$y = 0,0064x - 0,056$	0,84	0,0037	7
		3	$y = 0,0031x - 0,0124$	0,78	0,0191	6
		4	- -	-	-	-
		5	- -	-	-	-
Sorgo	Pmg	1	$y = 0,0135x - 0,1635$	0,91	0,0478	4
		2	- -	-	-	-
		3	- -	-	-	-
		4	- -	-	-	-
		5	- -	-	-	-
	Cb	1	$y = 0,0146x - 0,1707$	0,95	0,0054	5
		2	$y = 0,0096x - 0,1038$	1,00	0,0001	5
		3	$y = 0,0042x - 0,0263$	0,87	0,0215	5
		4	$y = 0,0037x - 0,0302$	0,80	0,0399	5
		5	- -	-	-	-

Exp 16 (17,1°C)	*
Exp 20 (23,4°C)	ND
Exp 24 (25,2°C)	ND
Exp 9 (24,7°C)	D
Sor (Pmg)	Exp 16 Exp 20 Exp 24 Exp 9 17,1°C 23,4°C 25,2°C 24,7°C

(g)

Exp 14 (9,4°C)	*
Exp 3 (8,8°C)	D
Exp 2 (9,3°C)	D
Exp 4 (11,0°C)	D
Exp 1 (11,9°C)	D
Exp 20 (16,7°C)	D
Exp 23 (17,9°C)	D
Fav (Pmg)	Exp 14 Exp 3 Exp 2 Exp 4 Exp 1 Exp 20 Exp 23 9,4°C 8,8°C 9,3°C 11,0°C 11,9°C 16,7°C 17,9°C

(i)

Exp 19 (13,0°C)	*
Exp 18 (15,6°C)	D
Exp 6 (18,2°C)	D
Exp 22 (18,0°C)	D
Exp 7 (21,2°C)	D
Exp 8 (23,6°C)	D
Exp 9 (26,0°C)	D
Glir (Pmg)	Exp 19 Exp 18 Exp 6 Exp 22 Exp 7 Exp 8 Exp 9 13,0°C 15,6°C 18,2°C 18,0°C 21,2°C 23,6°C 26,0°C

(k)

Exp 12 (13,2°C)	*
Exp 18 (15,6°C)	D
Exp 7 (20,0°C)	D
Exp 8 (23,9°C)	ND
MII (Pmg)	Exp 12 Exp 18 Exp 7 Exp 8 13,2°C 15,6°C 20,0°C 23,9°C

(m)

Exp 31 (14,7°C)	*
Exp 24 (16,1°C)	D
Exp 25 (19,0°C)	ND
Exp 29 (20,0°C)	ND
Exp 30 (22,7°C)	ND
Sor (Cb)	Exp 31 Exp 24 Exp 25 Exp 29 Exp 30 14,7°C 16,1°C 19,0°C 20,0°C 22,7°C

(h)

Exp 2 (9,6°C)	*
Exp 3 (10,5°C)	D
Exp 16 (14,2°C)	D
Exp 15 (14,3°C)	D
Exp 12 (17,2°C)	D
Exp 11 (18,6°C)	D
Exp 21 (19,0°C)	D
FAV (Cb)	Exp 2 Exp 3 Exp 16 Exp 15 Exp 12 Exp 11 Exp 21 9,6°C 10,5°C 14,2°C 14,3°C 17,2°C 18,6°C 19,0°C

(j)

Exp 22 (13,2°C)	*
Exp 16 (14,2°C)	D
Exp 27 (17,9°C)	D
Exp 25 (19,0°C)	D
Exp 29 (20,0°C)	D
Glira (Cb)	Exp 22 Exp 16 Exp 27 Exp 25 Exp 29 13,2°C 14,2°C 17,9°C 19,0°C 20,0°C

(l)

Exp 23 (13,6°C)	*
Exp 31 (14,7°C)	ND
Exp 14 (14,6°C)	D
Exp 13 (17,1°C)	ND
Exp 27 (17,9°C)	D
Exp 11 (18,7°C)	D
Exp 7 (23,5°C)	ND
MII (Cb)	Exp 23 Exp 31 Exp 14 Exp 13 Exp 27 Exp 11 Exp 7 13,6°C 14,7°C 14,6°C 17,1°C 17,9°C 18,7°C 23,5°C

(n)

**ANEXO E. Significância, para 95% de probabilidade, das diferenças entre as séries de valores da emergência acumulada das sete culturas indicadas, correspondentes a outras tantas experiências efectuadas nos solos Pmg e Cb (Teste t de Student)**

Exp 3 (10,0°C)	*																			
Exp 2 (9,9°C)	D	*																		
Exp 1 (11,8°C)	D	D	*																	
Exp 16 (14,2°C)	D	D	D	*																
Exp 15 (14,3°C)	D	D	D	D	*															
Exp 12 (17,2°C)	D	D	D	D	D	*														
Exp 11 (18,7°C)	D	D	D	D	D	D	*													
Erv (Cb)	Exp 3 10,0°C	Exp 2 9,9°C	Exp 1 11,8°C	Exp 16 14,2°C	Exp 15 14,3°C	Exp 12 17,2°C	Exp 11 18,7°C													

(b)

Exp 3 (10,2°C)	*																			
Exp 2 (9,6°C)	D	*																		
Exp 1 (11,6°C)	D	D	*																	
Exp 16 (14,1°C)	D	D	D	*																
Exp 15 (14,3°C)	ND	D	D	D	*															
Exp 12 (18,0°C)	D	D	D	D	ND	D	*													
Exp 11 (19,1°C)	D	D	D	D	D	ND	D	*												
Tre (Cb)	Exp 3 10,2°C	Exp 2 9,6°C	Exp 1 11,6°C	Exp 16 14,1°C	Exp 15 14,3°C	Exp 12 18,0°C	Exp 11 19,1°C													

(d)

Exp 3 (10,5°C)	*																			
Exp 2 (10,0°C)	D	*																		
Exp 31 (14,7°C)	D	D	*																	
Exp 4 (16,7°C)	D	D	D	*																
Exp 12 (17,3°C)	ND	D	D	D	*															
Exp 11 (18,6°C)	ND	D	D	D	D	*														
Exp 30 (22,5°C)	D	D	D	D	D	D	*													
Gra (Cb)	Exp 3 10,5°C	Exp 2 10,0°C	Exp 31 14,7°C	Exp 4 16,7°C	Exp 12 17,3°C	Exp 11 18,6°C	Exp 30 22,5°C													

(f)

Exp 14 (9,1°C)	*																			
Exp 3 (9,0°C)	ND	*																		
Exp 2 (9,6°C)	D	D	*																	
Exp 4 (11,2°C)	ND	ND	D	*																
Exp 12 (13,3°C)	D	D	D	D	*															
Exp 20 (16,6°C)	ND	ND	D	ND	D	*														
Erv (Pmg)	Exp 14 9,1°C	Exp 3 9,0°C	Exp 2 9,6°C	Exp 4 11,2°C	Exp 12 13,3°C	Exp 20 16,6°C														

(a)

Exp 14 (9,3°C)	*																			
Exp 3 (9,0°C)	D	*																		
Exp 2 (9,3°C)	D	D	*																	
Exp 4 (10,7°C)	D	ND	ND	*																
Exp 15 (12,0°C)	ND	ND	D	ND	*															
Exp 12 (13,2°C)	ND	ND	D	ND	ND	*														
Exp 11 (16,0°C)	D	D	ND	ND	D	D	*													
Tre (Pmg)	Exp 14 9,3°C	Exp 3 9,0°C	Exp 2 9,3°C	Exp 4 10,7°C	Exp 15 12,0°C	Exp 12 13,2°C	Exp 11 16,0°C													

(c)

Exp 14 (11,7°C)	*																			
Exp 3 (9,0°C)	ND	*																		
Exp 2 (9,3°C)	D	D	*																	
Exp 4 (11,0°C)	D	D	D	*																
Exp 18 (15,9°C)	D	D	D	D	*															
Exp 24 (25,2°C)	D	D	D	D	D	*														
Exp 17 (23,1°C)	D	D	D	ND	D	ND	*													
Gra (Pmg)	Exp 14 11,7°C	Exp 3 9,0°C	Exp 2 9,3°C	Exp 4 11,0°C	Exp 18 15,9°C	Exp 24 25,2°C	Exp 17 23,1°C													

(e)

ANEXO D. Diferença entre as taxas de emergência estimadas a partir das equações de regressão estabelecidas para o Intervalo Térmico A e as taxas de emergência medidas vs. nº de horas em que a temperatura média horária foi superior à temperatura ótima para a germinação  $\Pi(G)_{opt}$ : equações de regressão, coeficientes de determinação, significância estatística (Teste F) e nº de pontos regredidos

Cultura	Solo	Regressão linear		Estatística F	Nº pontos regredidos
		Equação	R2		
ERV	Pmg	$y = -0,0012x - 0,0187$	0,89	0,0168	5
	Cb	$y = -0,002x - 0,0221$	0,93	0,0362	4
Tre	Pmg	$y = -0,0009x + 0,0007$	0,95	0,0009	6
	Cb	$y = -0,0015x + 0,0019$	0,63	0,0677	6
Gra	Pmg	$y = -0,0003x + 0,0019$	0,25	0,3920	5
	Cb	$y = -0,0006x - 0,0049$	0,17	0,4874	5
fav	Pmg	$y = -0,0006x - 0,0119$	0,77	0,0216	6
	Cb	$y = -0,0007x + 0,0008$	0,91	0,0003	8
Gir	Pmg	$y = -0,0025x + 0,0203$	0,97	0,0003	6
Mil	Pmg	$y = -0,0027x + 0,0231$	0,96	0,0034	5
Sor	Pmg	$y = -0,0004x + 0,0038$	0,52	0,2784	4



Fração emergida	Cultura	Intervalo Térmico					
		Sub-ótimo			Supra-ótimo		
		Equação de regressão	Coefficiente de correlação (R <sup>2</sup> )	Significância estatística (Teste F)	Equação de regressão	Coefficiente de correlação (R <sup>2</sup> )	Significância estatística (Teste F)
50%	Ervilha	y = 0,0133x - 0,0657	0,93	0,0004	y = -0,0112x + 0,4086	0,71	0,1547
	Tremocilha	y = 0,0145x - 0,084	0,94	0,0003	-	-	-
	Grão	y = 0,0126x - 0,0776	0,94	0,0003	-	-	-
	Fava	y = 0,008x - 0,0274	0,90	0,0011	y = 0,0072x + 0,2585	0,77	0,1244
	Girassol	y = 0,0112x - 0,0591	0,84	0,0278	-	-	-
	Milho	y = 0,0131x - 0,0992	0,92	0,0002	-	-	-
80%	Sorgo	y = 0,0207x - 0,2269	0,97	0,0025	-	-	-
	Ervilha	y = 0,0109x - 0,0471	0,84	0,0036	y = -0,0104x + 0,3674	0,51	0,2840
	Tremocilha	y = 0,012x - 0,0674	0,91	0,0008	-	-	-
	Grão	y = 0,0096x - 0,0501	0,90	0,0010	-	-	-
	Fava	y = -0,0059x + 0,2297	0,77	0,0156	y = -0,0013x + 0,1107	0,20	0,5519
	Girassol	y = 0,0101x - 0,0516	0,84	0,0286	-	-	-
Sorgo	Milho	y = 0,0117x - 0,0872	0,92	0,0002	-	-	-
	Sorgo	y = 0,016x - 0,1639	0,96	0,0039	-	-	-

(b)

ANEXO C. Regressões lineares entre a taxa de emergência e temperatura, nível de correlação e significância estatística (Teste F):  
 (a) Solo Pmg; (b) Solo Cb

Fração emergida	Cultura	Intervalo Térmico					
		Sub-ótimo			Supra-ótimo		
		Equação de regressão	Coefficiente de correlação (R <sup>2</sup> )	Significância estatística (Teste F)	Equação de regressão	Coefficiente de correlação (R <sup>2</sup> )	Significância estatística (Teste F)
50%	Ervilha	$y = 0,0085x + 0,0039$	0,87	0,0066	-	-	-
	Tremocilha	$y = 0,0086x - 0,0064$	0,95	0,0002	-	-	-
	Grão	$y = 0,006x + 0,0047$	0,94	6,26919E-05	-	-	-
	Fava	$y = 0,0073x - 0,0097$	0,98	0,0002	$y = -0,0031x + 0,156$	0,77	0,1248
	Girassol	$y = 0,0084x - 0,0422$	0,97	0,0011	-	-	-
	Milho	$y = 0,0112x - 0,0872$	0,86	0,0229	$y = -0,0331x + 0,9617$	0,80	0,1062
Sorgo	$y = 0,0139x - 0,139$	1,00	0,0021	-	-	-	
80%	Ervilha	$y = 0,0081x - 0,0034$	0,83	0,0109	-	-	-
	Tremocilha	$y = 0,009x - 0,026$	0,95	0,0002	-	-	-
	Grão	$y = 0,005x + 0,0045$	0,89	0,0005	-	-	-
	Fava	$y = 0,0038x + 0,0183$	0,69	0,0397	$y = -0,0014x + 0,1082$	0,74	0,1419
	Girassol	$y = 0,0068x - 0,0255$	0,94	0,0014	-	-	-
	Milho	$y = 0,0104x - 0,0764$	0,76	0,0548	$y = -0,0279x + 0,8161$	0,81	0,1003
Sorgo	$y = 0,0161x - 0,1884$	0,99	0,0039	-	-	-	

(a)

ANEXO B. Regressões lineares entre a taxa de germinação e temperatura, nível de correlação e significância estatística (Teste F)

Fracção germinada	Cultura	Intervalo Térmico					
		Sub-óptimo			Supra-óptimo		
		Equação de regressão	Coefficiente de determinação (R <sup>2</sup> )	Significância estatística (Teste F)	Equação de regressão	Coefficiente de determinação (R <sup>2</sup> )	Significância estatística (Teste F)
20%	Ervilha	$y = 0,0482x - 0,0356$	0,92	0,00015102	$y = -0,1905x + 6,9719$	0,91	0,013
	Tremocilha	$y = 0,0558x - 0,178$	0,98	0,00000358	$y = -0,1286x + 4,3639$	0,89	0,063
	Grão	$y = 0,0524x + 0,0459$	0,96	0,00000486	$y = -0,084x + 3,7782$	0,89	0,005
	Fava	$y = 0,025x + 0,0363$	0,97	0,00000574	$y = -0,0539x + 2,0472$	0,89	0,042
	Girassol	$y = 0,0483x - 0,2684$	0,97	0,00000181	$y = -0,1151x + 6,5834$	0,71	0,060
	Milho	$y = 0,0626x - 0,5517$	0,98	0,00000029	$y = -0,138x + 6,2904$	0,65	0,028
Sorgo	$y = 0,1072x - 1,0599$	0,98	0,00000009	$y = -0,2199x + 10,48$	0,92	0,002	
50%	Ervilha	$y = 0,0417x - 0,1149$	0,98	0,00000108	$y = -0,1445x + 5,2777$	0,94	0,007
	Tremocilha	$y = 0,0408x - 0,079$	0,98	0,00000283	$y = -0,0934x + 3,2032$	0,76	0,062
	Grão	$y = 0,0372x + 0,0772$	0,98	0,00000013	$y = -0,0596x + 2,5795$	0,96	0,001
	Fava	$y = 0,0201x + 0,0276$	0,98	0,00000127	$y = -0,0451x + 1,6892$	0,81	0,014
	Girassol	$y = 0,0351x - 0,1606$	0,96	0,00000006	$y = -0,0991x + 4,3987$	0,84	0,030
	Milho	$y = 0,0637x - 0,5114$	0,99	0,00000001	$y = -0,1169x + 5,2173$	0,79	0,008
Sorgo	$y = 0,078x - 0,7341$	0,99	0,00000000	$y = -0,1664x + 7,8741$	0,96	0,001	
80%	Ervilha	$y = 0,0341x - 0,0974$	0,99	0,00000107	$y = -0,1187x + 4,3273$	0,96	0,004
	Tremocilha	$y = 0,0328x - 0,0461$	0,97	0,00000864	$y = -0,0825x + 2,7866$	0,85	0,029
	Grão	$y = 0,0255x + 0,096$	0,88	0,00019266	$y = -0,0431x + 1,8471$	0,87	0,006
	Fava	$y = 0,0148x + 0,0324$	0,97	0,00001083	$y = -0,0336x + 1,2443$	0,77	0,022
	Girassol	$y = 0,024x - 0,0761$	0,96	0,00000002	$y = -0,0772x + 3,3325$	0,96	0,007
	Milho	$y = 0,0427x - 0,3817$	0,99	0,00000011	$y = -0,1039x + 4,5078$	0,91	0,001
Sorgo	$y = 0,0517x - 0,396$	0,98	0,00000003	$y = -0,1016x + 4,876$	0,88	0,005	

Cultura	Solo	Experiência		Nº final de folhas	Temperatura			Teor médio de humidade no solo		
		Nº	Duração (DAS)		Média	Máxima	Mínima	1º par de folha	2º par de folha	3º par de folha
					(°C)					
Girassol	Pmg	7	18	6	19,8	22,4	17,9	0,88	0,77	0,70
		9	18	6	22,7	24	18,2	0,39	0,09	0,05
		10	23	6	23,6	25,1	21,6	0,30	0,22	0,17
		17	26	6	21,4	22,6	21,1	0,38	0,27	0,23
		19	34	4	13	16,8	11,7	0,98	0,85	
		22	32	6	15,6	18,2	10,4	0,76	0,80	0,68
	Cb	16	37	6	13,6	16,7	10,1	1,07	1,06	1,05
		18	29	6	19,8	23,8	15,8	0,48	0,58	0,55
		20	17	2	22,4	24,2	16,8	0,27	-	-
		21	34	6	17	21	11,1	1,19	0,98	0,95
Girassol	Cb	22	31	6	14,2	19,2	11,1	1,08	1,15	1,15
		25	24	6	16,7	19,2	12,4	0,75	0,54	0,54
		26	29	6	16,5	19,4	12	0,74	0,82	0,87
		27	25	6	16,5	19,2	12	0,86	0,92	0,83
		28	16	4	21,9	25	17	0,49	0,29	-
		29	25	6	19,6	24,8	17,2	0,91	0,78	0,61
		30	26	6	19,6	23	14,6	0,40	0,43	0,44

(d)

Cultura	Solo	Experiência		N° final de folhas	Temperatura			Teor médio de humidade no solo							
		N°	Duração (DAS)		Média	Máxima	Mínima	(% C.U.)							
								1ª folha	2ª folha	3ª folha	4ª folha	5ª folha			
Sorgo	Pmg	9	21	5	27,8	32,7	23,2	0,42	0,35	0,33	0,23	0,23	0,23		
		17	23	5	26,3	30,9	19,8	0,43	0,38	0,28	0,25	0,25	0,25		
		20	29	5	19,5	27,3	15,7	1,01	1,00	0,96	0,94	0,94	0,90		
		24	19	5	26	31,2	17,3	0,84	0,71	0,55	0,44	0,44	0,40		
	Cb	Pmg	20	26	3	24,1	26	22	0,40	0,26	0,18	-	-	-	
			21	52	4	15,1	22,1	8,6	0,76	0,71	0,93	1,03	-	-	
			24	26	4	17,8	23,2	15	-	-	0,99	0,87	-	-	
		Cb	Pmg	25	27	5	19,7	23,2	16,3	0,83	0,75	0,56	0,56	0,56	0,56
				28	16	4	24,6	28,9	18,1	-	-	0,51	0,28	-	-
			Cb	Pmg	29	25	5	22,4	25,6	19,7	0,99	0,92	0,80	0,70	0,61
					30	25	5	22,1	25,6	18,5	0,56	0,42	0,32	0,52	0,52
				31	46	2	13,8	16,7	8,8	0,86	0,91	-	-	-	-

Cultura	Solo	Experiência		Nº final de folhas	Temperatura			Teor médio de humidade no solo				
		Nº	Duração (DAS)		Média	Máxima	Mínima	(% C.U.)				
								1ª folha	2ª folha	3ª folha	4ª folha	5ª folha
Fava	Pmg	11	35	5	14,3	17,6	9,5	0,48	0,65	0,69	0,71	0,69
		12	43	5	11,7	14,7	5,1	0,79	0,83	0,83	0,92	0,91
		14	52	5	10,3	14,5	7,2	0,84	0,85	0,90	0,98	0,97
		18	48	5	12,4	18,4	7,3	0,94	0,94	1,00	1,15	1,17
		20	32	5	16,9	25,6	11,1	0,89	0,84	0,84	0,86	0,73
	Cb	1	51	5	11,9	14,2	8,8	1,06	1,01	0,99	1,02	1,09
		11	27	5	17,3	19,2	12,2	0,72	0,73	0,76	0,74	0,88
		12	32	5	16,2	18,4	12,1	0,72	0,86	0,91	0,89	0,88
		16	37	5	13,7	16,7	10,1	1,03	0,99	1,00	1,04	1,02
		17	34	5	17,5	22,5	9,2	0,59	0,58	0,69	0,69	0,70
		21	25	4	18,4	21	13,6	0,75	0,88	0,93	0,96	
		26	26	4	17	19,2	12,6	0,67	0,77	0,78	0,82	

Cultura	Solo	Experiência		Nº final de folhas	Temperatura			Teor médio de humidade no solo				
		Nº	Duração (DAS)		Média	Máxima	Mínima	(% C.U.)				
								1ª folha	2ª folha	3ª folha	4ª folha	5ª folha
Milho	Pmg	7	24	5	25,1	32,7	15,6	1,00	0,88	0,77	0,61	0,54
		9	25	5	28	32,7	23,2	0,39	0,36	0,23	0,23	0,10
		10	25	5	28,7	34	23,2	0,22	0,17	0,14	0,09	0,05
		11	44	5	14,5	21,3	10,5	0,48	0,65	0,75	0,70	0,72
		12	37	3	12,8	17,9	10,5	0,83	0,83	0,95	0,70	0,72
				11	30	3	17,7	21	12,8	0,78	0,74	0,78
	Cb	12	31	3	16,6	19,4	12,8	1,23	1,08	1,05	-	-
		20	23	2	24,4	26	22,4	0,27	0,17	-	-	-
		21	67	5	15,3	22,1	8,6	0,76	0,71	0,93	1,02	1,11
		23	45	4	16,4	23,2	11,4	1,11	1,06	1,09	1,04	-
		25	20	3	19,7	23,2	16,3	0,83	0,56	0,35	-	-
		26	31	3	19,2	22,3	16,6	0,74	0,82	0,82	-	-
		31	46	2	14,4	16,8	10,9	0,86	0,91	-	-	

ANEXOS

Anexo A. Experiências realizadas nos solos Pmg e Cb sobre o desenvolvimento e o crescimento das cinco culturas indicadas, na fase de estabelecimento: duração das experiências (entre a sementeira e a produção da última folha medida ou o último par de folhas no caso do girassol - DAS), as temperaturas médias, máximas e mínimas ao longo das experiências e os teores de humidade do solo entre a sementeira e o dia correspondente à produção de cada uma das folhas medidas (ou de cada par de folhas, no caso do girassol)

Cultura	Solo	Experiência		Nº final de folhas	Temperatura (°C)			Teor médio de humidade no solo (%C.U.)				
		Nº	Duração (DAS)		Média	Máxima	Mínima	1ª folha	2ª folha	3ª folha	4ª folha	5ª folha
Ervilha	Pmg	11	29	5	14,7	17,6	9,5	0,50	0,58	0,71	0,75	0,76
		12	34	5	12,6	14,7	9,1	0,67	0,69	0,83	0,89	0,93
		13	52	5	8,9	15,8	1,2	0,98	0,98	0,89	0,90	0,90
		14	46	5	10	14,5	7,2	0,84	0,84	0,86	0,93	0,98
		17	23	4	21,2	23,8	17	0,38	0,34	0,31	0,28	-
	20	26	5	15,6	20,9	11,1	0,89	0,91	0,91	0,88	0,88	
	24	30	5	22,5	26,6	16,4	0,73	0,62	0,53	0,47	0,34	
	Cb	1	44	5	11,9	14,2	8,8	1,05	1,06	1,01	0,99	1,05
		11	27	5	17,2	19,7	12,2	0,73	0,73	0,76	0,74	0,85
		12	32	5	16,2	18,4	12,1	0,72	0,72	0,91	0,90	0,88
17		27	5	17	22,5	9,2	0,61	0,60	0,66	0,70	0,68	
20		20	2	22	24,2	17,8	0,27	0,21	0,18	-	-	
31	46	4	13,8	16,7	8,8	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86		

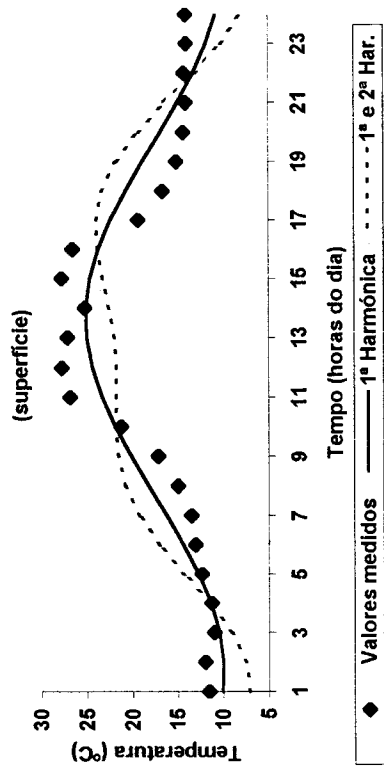




- Wilson, R.E., Jensen, E.H. e Fernandez, G.C.J.. 1992. Seed germination response for eleven forage cultivars of *Brassica* to temperature. *Agronomy Journal*, 84: 200-202
- Wierenga, P.J., Nielsen, D.R. e Hagan, R.M. 1969. Thermal Properties of a soil based upon field and laboratory measurements. *Soil Science. Soc.Am. Proc.*, 33: 354-360
- Wu, Y, Perry, K.B. e Ristaino, J.B.. 1996. Estimating temperature of mulched and bare soil from meteorological data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81: 299-323
- Yamamoto, I., Turgen, A.J. e Duich, J.H. 1997. Seedling emergence and growth of solid matrix primed kentucky bluegrass seed. *Crop Science*, 37: 225-229

- Wanjura, D.F., Hudspeth, Jr., E.B. e Bilbro, Jr., J.D.. 1969. Temperature effect on emergence rate of Cotton (*Gossypium hirsutum L.*) under field situations. *Agronomy Journal*, 61: 387-389
- Wanjura, D.F. e Minton, E.B.. 1981. Delayed emergence and temperature influences on cotton seedling vigour. *Agronomy Journal*, 73: 594-597
- Warrington, I.J. e Kanemasu, E.T.. 1983. Corn growth response to temperature and photoperiod I. Seedling emergence, tassel initiation, and antithesis. *Agronomy Journal*, 75: 749-754
- Washitani, I.. 1985. Germination-rate dependency on temperature of *Geranium carolinianum* seeds. *Journal of Experimental Botany*, 36: 330-337
- Washitani, I. e Saeki, T.. 1986. Germination responses of *Pinus densiflora* seeds to temperature, light and interrupted imbibition. *Journal of Experimental Botany*, 37: 1376-1387
- Watts, W.R.. 1972. Leaf extension in *Zea mays*. II. Leaf extension in response to independent variation of the temperature of the apical meristem, of the air around the leaves and the root zone. *Journal of Experimental Botany*, 23: 704-712
- Weaich, K., Bristow, K.L. e Cass, A. 1996a. Modelling preemergent maize shoot growth: II. Physiological temperature conditions, *Agronomy Journal*, 88: 391-397
- Webb, D.M., Smith, C.W. e Schulz-Schaeffer, J.. 1987. Amaranth seedling emergence as affected by seeding depth and temperature on the thermogradient plate. *Agronomy Journal*, 79: 23-36
- Wellington, P.S.. 1965. Germinability and its assessment. *Proc.int.Seed Test.Ass.*, 30: 73-88
- Wengel, R.W.. 1966. Emergence of corn in relation to soil oxygen diffusion rate. *Agronomy Journal*, 58: 69-72
- White, J.W. e Montes-R, C.. 1993. The influence of temperature on seed germination in cultivars of common bean. *Journal of Experimental Botany*, 44: 1795-1800
- Wilson, A.M.. 1981. Air temperature and soil temperature effects on elongation of adventitious roots in blue grama seedlings. *Agronomy Journal*, 73: 693-697
- Wilson, G.L., Raju, P.S. e Peacock, J.M. 1982. Effect of soil temperature on sorghum emergence. *Indian Journal of Agricultural Science*, 52: 648-851

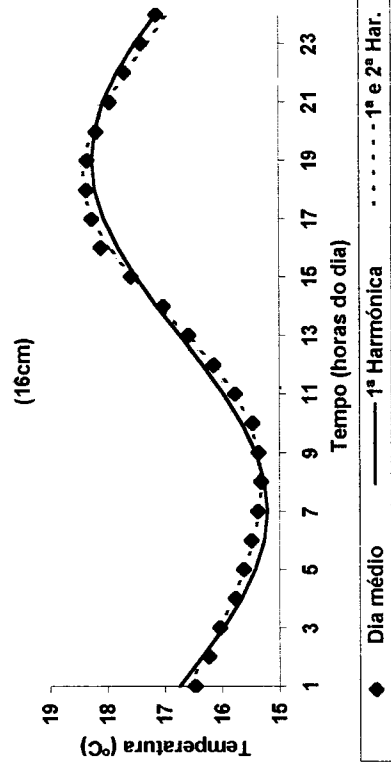
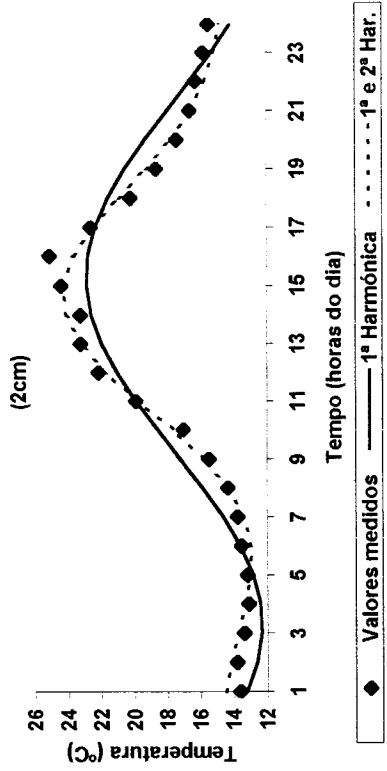
- Unger, P.W. e Danielson, R.E.. 1964. Influence of oxygen and carbon dioxide on germination and seedling development of corn (*Zea mays* L.). *Agronomy Journal*, 56, 56-58
- van Arkel, H.. 1978. Leaf area determinations in sorghum and maize by the length-width method. *Neth.J.agric.Sci.* 26: 170-180
- van Bavel, C.H.M.e Lascano, R.. 1980. *A numerical method to compute soil water content and temperature profiles under a bare surface*. Texas A&M University, College Station, Texas
- van Bavel, C.H.M e Hillel, D.. 1976. Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat, *Agricultural Meteorology*, 17: 453-476
- van Duin, R.H.A.. 1963. *The influence of soil management on the temperature wave near the surface*. Inst. for Land and Water Mgt. Res., Wageningen, Tech. Bull. 29
- van Wijk, W.R. e Derksen, W.J.. 1966. Thermal properties of a soil near the surface. *Agricultural Meteorology*, 3: 333-342
- van Wick, W.R. (Ed.) 1963. *Physics of the Plant Environment*. North-Holland, Amsterdam
- van Wick W.R. e de Vries, D.A.. 1963. Periodic temperature variations in homogeneous soil. *In: van Wijk, W.R. ed. Physics of the Plant Environment*. North-Holland, Amsterdam
- Vegis, A., 1963. Climatic control of germination, bud break, and dormancy *In: L.T.Evans (Ed) "Environmental Control of Plant Growth"*, 265-287. Academic Press, New York
- Verhoef, A., van den Hurk, B.J.J., Jacobs, A.F.G e Heusinkveld, B.G.. 1996. Thermal soil properties for vineyard (EFEDA-I) and savanna (HAPEX-Sahel) sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78: 1-18
- Vigil, M.F., Anderson, R.L. e Beard, W.E.. 1997. Base temperature and growing-degree-hour requirements for the emergence of Canola. *Crop Science*, 37: 844-849
- Wanjura, D.F. e Buxton, D.R.. 1972. Water uptake and radicle emergence of cottonseed as affected by soil moisture and temperature, *Agronomy Journal*, 64: 427-431



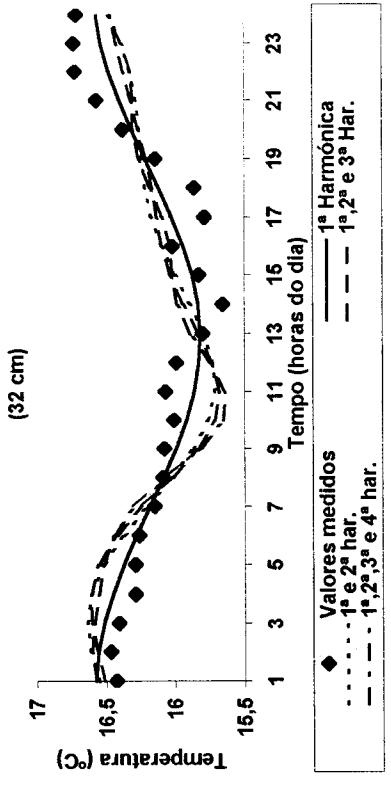
(a)

H11 - Solo Pmg, dia N

(b)

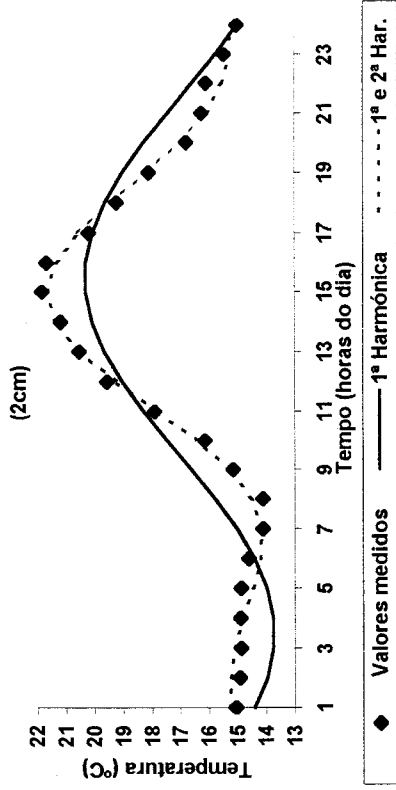
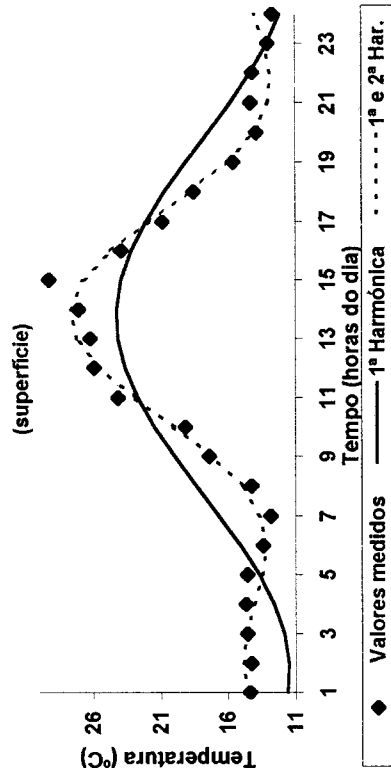


(c)

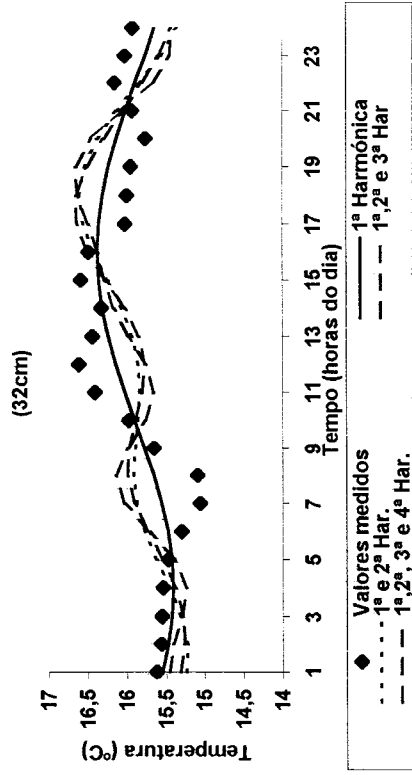
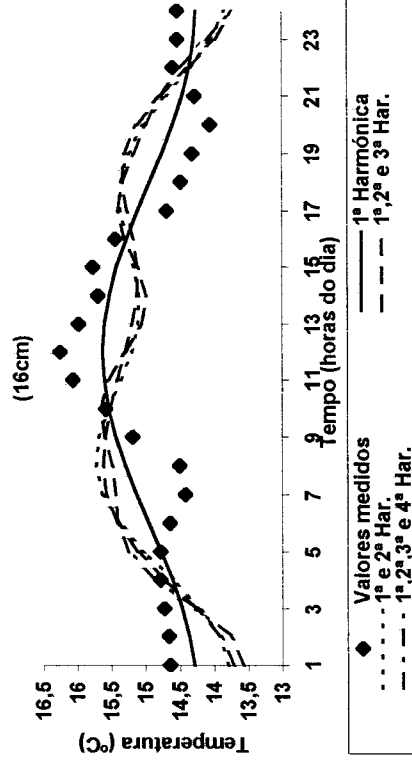


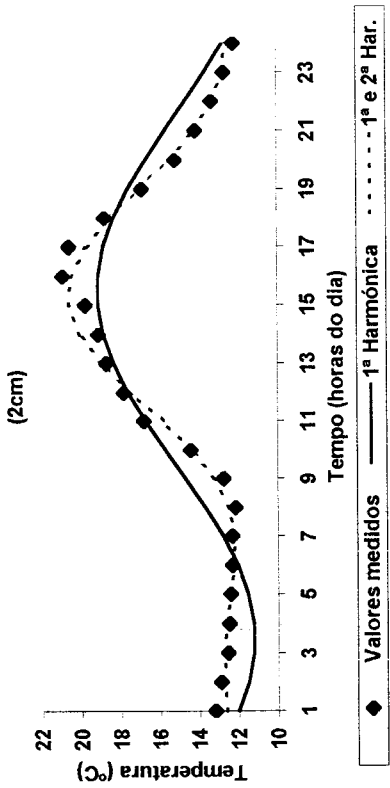
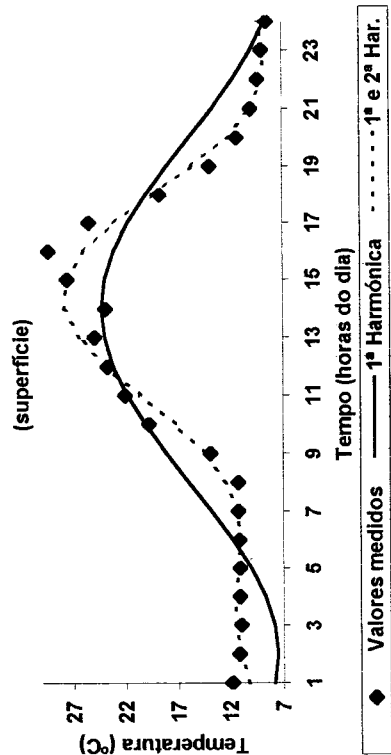
(d)

ANEXO J.12 - Variação da temperatura média horária do solo Cb às profundidades indicadas, para o dia-tipo I (céu limpo): valores medidos e valores estimados pela análise harmónica

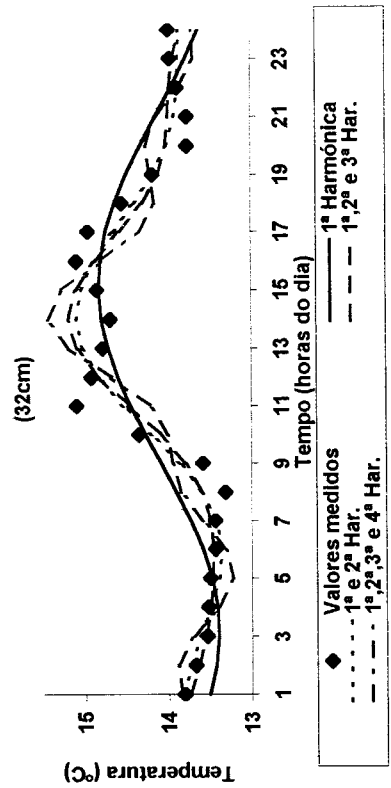
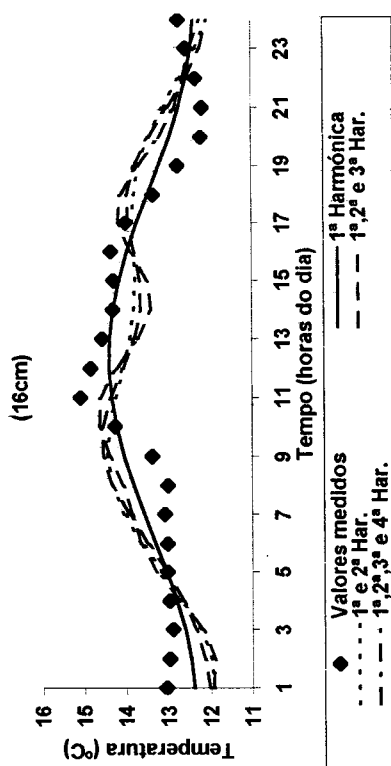


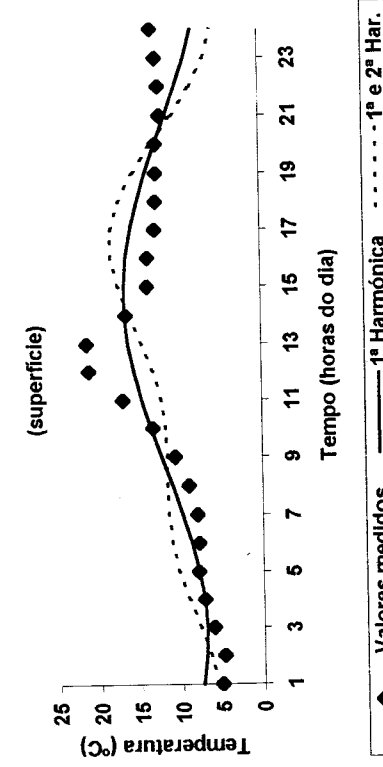
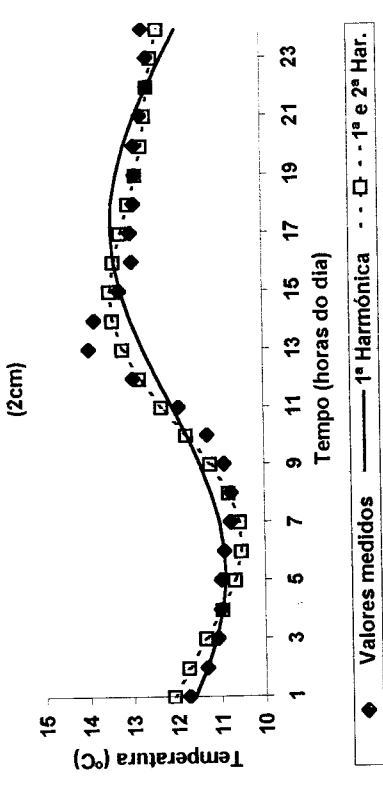
H12 - Solo Cb, dia I



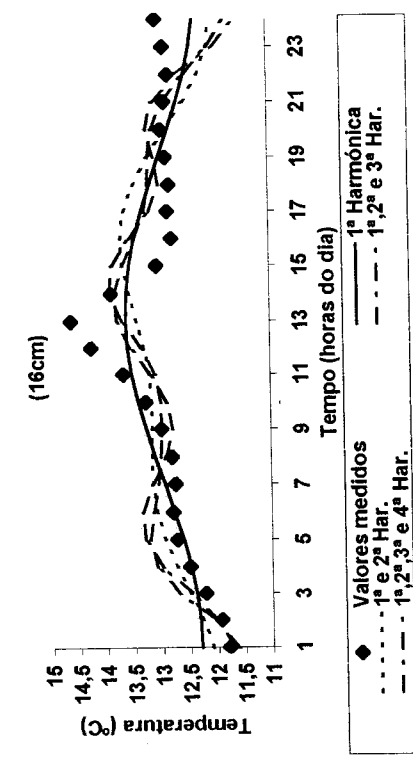
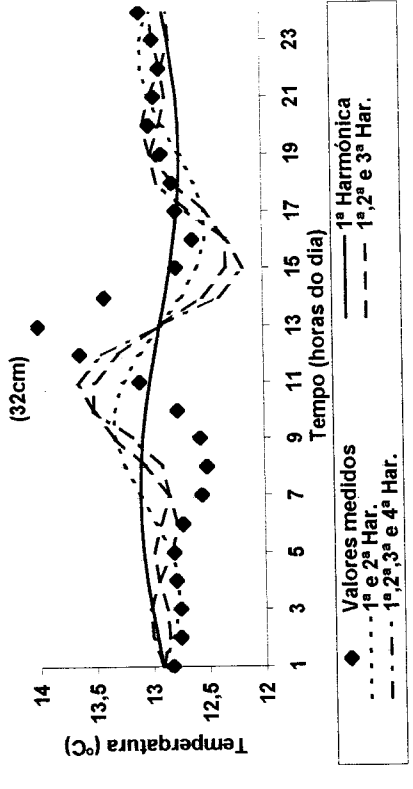


H13 - Solo Cb, M





H14 - Solo Cb, dia N



ANEXO I. Amplitudes térmicas (°C) medidas nos solos Pmg e Cb às profundidades indicadas, em 13 dias-tipo: 3 dias curtos (C-Humidade baixa, C-Humidade média, C-Humidade elevada), 3 dias longos (L-Hb, L-Hm, L-He) e 3 dias próximos dos equinócios (M-Hb, M-Hm, M-He), 4 dias representativos de níveis diferentes de nebulosidade (dias I, céu limpo, P, céu pouco nublado, M, céu muito nublado e N, céu encoberto)

		Amplitudes térmicas (°C)												
Solo	Profundidade	Dias-Tipo											M	N
		C-Hb	C-Hm	Che	M-Hb	M-Hm	M-He	L-Hb	L-Hm	L-He	I	P		
Pmg	0	15,1	19,7	6,5	27,2	16,6	16,3	33,5	31,3	-	32,3	32,1	20,5	2,8
	2	-	12,7	4,9	20,0	12,5	12,1	23,8	19,4	7,5	20,8	20,2	15,3	2,5
	4	8,4	11,3	4,3	16,8	11,4	11,0	-	16,8	6,9	19,1	18,7	13,8	2,4
	6	7,2	9,3	3,5	14,3	9,2	8,9	19,3	16,0	6,5	14,7	15,9	11,2	2,1
	8	6,0	7,9	3,0	11,9	7,9	7,6	16,4	14,2	5,7	11,8	13,2	9,6	1,8
Cb	16	-	3,4	1,4	5,9	3,7	3,5	7,1	7,4	2,9	5,9	6,4	4,3	1,1
	32	1,1	1,1	0,6	2,2	1,0	1,0	0,7	0,8	0,2	2,2	1,4	1,2	0,1
	0	20,2	10,5	2,9	29,4	15,8	14,4	39,9	37,9	14,6	26,2	16,5	20,9	16,5
	2	10,9	5,9	2,0	15,1	8,1	8,1	21,7	16,0	7,6	12,3	7,7	8,8	6,4
	4	9,9	4,9	1,6	12,7	4,9	5,4	16,6	13,0	6,3	6,7	4,0	6,2	4,7
Cb	6	8,0	4,7	1,0	9,4	4,9	5,0	12,1	9,9	4,7	7,9	5,0	5,4	3,7
	8	7,0	4,1	1,2	8,4	4,3	4,5	10,3	9,1	4,4	6,9	4,5	4,9	3,2
	16	3,1	1,5	0,6	4,9	2,0	2,3	4,4	4,3	1,8	3,3	2,2	2,9	2,8
	32	1,6	0,9	0,5	1,9	1,4	1,4	2,0	2,6	1,0	2,2	1,6	1,8	1,5



ANEXO J. Profundidades de amortecimento (em cm) obtidas a partir da regressão dos logaritmos das amplitudes térmicas medidas sobre as profundidades respectivas [ $\ln A(z) = z/D + \ln A(0)$ ], a vários teores médios de humidade do solo, nos dias Juliano indicados, nos solos Pmg (J1) e Cb (J2), em perfis em fase de humedecimento (a), de humidade uniforme (b) em fase de secagem (c) e em perfis hídricos sem quaisquer destas características (d).  $R^2$  é o coeficiente de determinação das regressões.

ANEXO J1

ANO	DIA JUL.	Teor médio de humidade do solo ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	PT1 (superfície, 2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT2 (2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT3 (2, 4, 6, 8, 16 cm)		
			Razão de deter. ( $R^2$ )	Profundidade de amortecimento (cm)	Nº de medições	Razão de deter. ( $R^2$ )	Profundidade de amortecimento (cm)	Nº de medições	Razão de deter. ( $R^2$ )	Profundidade de amortecimento (cm)	Nº de medições
			297	0,14	1,00	10,8	1,00	11,0	6	0,99	11,1
301	0,21	0,99	11,3	1,00	11,6	6	1,00	11,7	5		
308	0,26	0,82	16,4	0,84	18,0	6	0,99	9,5	5		
311	0,25	0,95	14,0	0,96	15,0	6	1,00	10,6	5		
313	0,25	0,95	11,5	0,95	12,1	6	0,99	8,3	5		
336	0,25	0,87	20,7	0,86	22,1	6	1,00	11,9	5		
341	0,27	0,97	10,4	0,97	10,8	6	0,99	8,2	5		
41	0,28	0,85	15,4	0,85	16,9	6	0,99	9,1	5		
44	0,29	0,88	16,9	0,90	18,8	6	0,99	11,1	5		
46	0,27	0,86	17,7	0,85	19,2	6	0,99	10,2	5		
118	0,17	0,97	13,9	0,97	14,6	6	0,99	11,1	5		
160	0,23	0,98	18,1	1,00	19,2	5	-	-	-		
319	0,30	0,82	23,4	0,97	28,5	5	1,00	14,6	4		
321	0,28	-	-	0,99	14,3	5	1,00	9,2	4		
341	0,29	0,93	11,3	0,93	12,0	6	0,99	7,7	5		
346	0,30	1,00	11,8	1,00	11,8	6	1,00	10,5	5		
348	0,29	0,94	15,3	0,98	16,8	6	0,95	13,9	5		
355	0,29	0,97	12,5	0,97	13,0	6	1,00	9,5	5		
362	0,31	0,92	13,8	0,92	14,7	6	1,00	9,2	5		
16	0,31	0,97	12,0	0,95	14,4	6	0,99	9,7	5		
123	0,14	1,00	10,4	1,00	10,6	6	0,99	11,3	5		
130	0,22	1,00	10,5	1,00	10,5	6	0,99	10,8	5		

(a)

ANO	DIA JUL.	Teor médio de humidade do solo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	PT1 (superfície, 2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT2 (2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT3 (2, 4, 6, 8, 16 cm)		
			Razão de deter. (R <sup>2</sup> )	Profundidade de mortecimento (cm)	Nº de medições	Razão de deter. (R <sup>2</sup> )	Profundidade de mortecimento (cm)	Nº de medições	Razão de deter. (R <sup>2</sup> )	Profundidade de mortecimento (cm)	Nº de medições
			1993	322	0,24	11,0	7	1,00	11,1	6	0,98
	331	0,23	12,3	7	1,00	12,5	6	0,98	12,1	5	
	340	0,20	12,0	7	0,99	12,3	6	0,99	10,2	5	
1994	4	0,23	14,7	7	0,97	14,8	6	0,97	14,8	5	
	138	0,25	9,6	7	0,97	9,7	6	0,98	14,8	5	
	140	0,28	10,2	7	0,98	10,3	6	0,98	14,9	5	
	294	0,13	13,6	7	0,97	14,2	6	0,98	10,9	5	
	299	0,18	11,2	7	1,00	11,6	6	0,99	11,4	5	
	325	0,19	10,8	7	1,00	11,1	6	0,99	10,8	5	
	332	0,21	14,1	7	0,89	15,7	6	1,00	9,1	5	
	353	0,23	12,6	7	0,95	13,5	6	0,99	9,4	5	
	356	0,22	16,1	7	0,88	17,5	6	0,99	9,9	5	
	363	0,20	16,9	7	0,96	18,0	6	0,99	13,7	5	

1995	6	0,23	0,79	17,9	7	0,81	21,1	6	0,98	10,6	5	
	11	0,22	0,87	17,9	7	0,88	19,7	6	0,99	11,1	5	
	34	0,24	0,98	12,8	7	0,98	13,4	6	0,99	10,7	5	
	38	0,23	0,91	14,8	7	0,92	16,0	6	0,99	9,8	5	
	60	0,18	0,97	13,3	7	0,98	14,5	6	0,99	11,8	5	
	65	0,19	0,84	13,4	7	0,81	14,3	6	0,98	7,2	5	
	73	0,23	0,98	12,8	7	0,99	13,4	6	0,99	11,5	5	
	81	0,15	0,96	12,4	7	0,98	13,3	6	0,99	10,4	5	
	90	0,15	0,97	13,5	7	0,98	14,1	6	0,99	11,0	5	
	102	0,12	0,92	14,6	7	0,93	15,7	6	0,99	10,0	5	
	116	0,11	0,93	12,8	7	0,93	13,4	6	0,99	8,5	5	
	122	0,13	1,00	11,6	7	1,00	11,8	6	0,99	11,9	5	
	125	0,11	0,97	18,7	7	0,98	19,8	6	0,97	16,4	5	
	132	0,15	1,00	10,8	7	1,00	11,0	6	0,99	12,0	5	
	146	0,15	0,98	12,4	7	0,99	12,9	6	1,00	10,5	5	
	167	0,14	0,94	15,1	7	0,96	16,3	6	1,00	11,4	5	
	219	0,03	1,00	11,0	7	1,00	11,0	6	0,99	11,0	5	
	243	0,04	1,00	10,7	7	1,00	10,8	6	0,99	10,4	5	
	250	0,27	-	-	-	1,00	12,7	4	-	-	-	
	255	0,16	0,97	15,2	6	0,98	16,2	5	1,00	12,8	4	
	299	0,11	0,99	11,6	6	0,99	12,3	6	1,00	10,5	5	
	307	0,11	0,97	12,2	6	0,98	13,0	5	1,00	9,6	4	
	312	0,07	0,90	14,3	5	1,00	17,1	4	-	-	-	
	324	0,26	0,98	11,3	6	1,00	12,0	5	1,00	10,4	4	
	338	0,27	0,91	12,5	7	0,91	13,4	6	1,00	8,1	5	
	1996	81	0,22	0,99	12,1	7	1,00	12,4	6	1,00	11,1	5
		113	0,12	0,99	11,2	7	1,00	11,7	6	0,99	10,5	5
		115	0,12	0,99	11,9	7	1,00	12,3	6	0,99	11,7	5

(b)

ANO	DIA JUL.	Teor médio de humidade do SOLO (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	PT1 (superfície, 2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT2 (2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT3 (2, 4, 6, 8, 16 cm)		
			Razão de deter. (R <sup>2</sup> )	profundidade de morteciment (cm)	Nº de medições	Razão de deter. (R <sup>2</sup> )	profundidade de morteciment (cm)	Nº de medições	Razão de deter. (R <sup>2</sup> )	profundidade de morteciment (cm)	Nº de medições
			1993	344	0,24	1,00	12,7	7	0,99	12,6	6
1994	20	0,25	0,99	10,7	7	0,99	10,5	6	0,99	13,3	5
	147	0,20	0,98	11,6	7	0,99	12,0	6	0,98	15,2	5
	157	0,17	0,98	10,9	7	0,98	11,1	6	0,96	14,6	5
	168	0,11	0,99	10,2	7	0,99	10,4	6	0,97	10,8	5
	172	0,11	0,99	10,6	7	0,99	10,6	6	0,98	12,5	5
	174	0,11	0,99	9,7	7	0,99	9,7	6	0,98	11,8	5
	184	0,09	-	-	-	0,96	15,0	5	0,97	10,8	4
	200	0,10	0,99	9,0	7	0,99	9,0	6	0,97	10,8	5
	222	0,09	1,00	10,8	7	1,00	10,8	6	0,97	11,0	5
	233	0,08	0,99	9,8	7	0,99	9,8	6	0,97	11,0	5
1995	55	0,22	-	-	-	0,97	16,4	6	0,99	12,1	5
	75	0,20	0,97	12,8	7	0,98	13,4	6	0,99	10,7	5
	108	0,07	0,97	12,2	7	0,98	12,7	6	0,99	9,7	5
	111	0,08	0,81	16,0	7	0,80	17,7	6	0,99	8,7	5
	157	0,10	0,78	14,0	6	0,75	16,0	5	0,99	7,3	4
	282	0,09	0,93	12,2	6	0,94	13,3	5	1,00	8,6	4
1996	145	0,20	1,00	10,1	7	1,00	10,1	6	1,00	11,5	5
	148	0,16	1,00	11,1	7	1,00	11,1	6	1,00	12,0	5
	151	0,11	1,00	10,4	7	1,00	10,4	6	1,00	10,7	5

(c)

ANEXO J2

ANO	DIA JUL.	Teor médio de humidade do solo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	PT1 (superfície, 2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT2 (2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT3 (2, 4, 6, 8, 16 cm)		
			Razão de deter. (r <sup>2</sup> )	de morteciment	Nº de medições	Razão de deter. (r <sup>2</sup> )	de morteciment	Nº de medições	Razão de deter. (r <sup>2</sup> )	de morteciment	Nº de medições
	4	0,47	-	-	-	-	-	1,00	8,1	5	
	47	0,44	-	-	-	-	-	1,00	9,0	5	
1994	286	0,31	0,96	13,5	0,97	14,3	0,98	10,7	10,7	5	
	290	0,30	0,99	12,8	0,99	13,0	1,00	11,2	11,2	5	
	294	0,32	0,99	15,7	0,99	16,3	1,00	14,2	14,2	5	
	311	0,48	0,99	11,7	0,98	11,8	0,97	9,8	9,8	5	
	336	0,44	0,91	11,9	0,96	13,4	0,99	9,5	9,5	5	
		24	0,43	0,90	14,7	0,90	14,7	0,99	9,0	9,0	5
1995	30	0,44	0,85	14,3	0,88	16,3	1,00	9,3	9,3	5	
	48	0,48	0,79	16,1	0,81	18,8	0,98	9,5	9,5	5	
	65	0,41	0,90	15,6	0,91	17,2	1,00	10,4	10,4	5	
	298	0,45	0,80	16,5	0,87	19,8	0,87	12,5	12,5	5	
	360	0,49	0,76	18,9	0,85	23,5	0,84	14,6	14,6	5	
		73	0,52	0,81	16,3	0,89	19,6	0,95	11,8	11,8	5
1996	263	0,35	0,87	14,8	0,97	17,5	0,99	12,7	12,7	5	
	264	0,43	0,84	15,8	0,93	18,9	0,99	12,0	12,0	5	
	290	0,39	0,89	13,0	0,97	15,1	1,00	11,3	11,3	5	

ANO	DIA JUL.	Teor médio de humidade do solo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )			PT1 (superfície, 2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT2 (2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT3 (2, 4, 6, 8, 16 cm)		
		Razão de deter. (r')	Profundidade de morteciment	Nº de medições	Razão de deter. (r')	Profundidade de morteciment	Nº de medições	Razão de deter. (r')	Profundidade de morteciment	Nº de medições	Razão de deter. (r')	Profundidade de morteciment	Nº de medições
1993	362	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	28	0,41	18,1	7	0,81	21,9	6	0,96	11,0	5	0,98	11,0	5
	124	0,38	15,0	7	0,83	17,0	6	0,85	17,0	6	0,96	9,1	5
	136	0,29	14,5	7	0,88	15,7	6	0,88	15,7	6	0,99	8,8	5
1994	147	0,46	14,7	6	0,84	14,7	6	0,85	17,4	5	1,00	8,8	4
	312	0,37	14,0	7	0,82	14,0	7	0,79	15,2	6	0,94	7,7	5
	341	0,44	13,2	7	0,86	13,2	7	0,91	15,1	6	1,00	9,1	5
	349	0,46	13,7	7	0,89	13,0	6	0,89	14,6	5	0,99	8,1	4
	354	0,42	13,4	7	0,83	14,9	7	0,83	16,6	6	0,97	8,7	5
		0,44	13,4	7	0,89	13,4	7	0,91	14,3	6	0,98	8,7	5
		0,43	14,5	7	0,83	14,5	7	0,95	16,4	6	1,00	11,1	5
		0,42	16,1	7	0,89	16,1	7	0,94	19,4	6	0,88	14,9	5
		0,35	11,8	7	0,96	11,8	7	0,96	12,1	6	1,00	8,4	5
		0,23	10,8	7	0,95	10,8	7	0,97	11,7	6	1,00	9,0	5
1995	174	0,17	10,8	7	0,95	10,8	7	0,97	11,7	6	1,00	8,5	5
	216	0,16	10,9	7	0,94	10,9	7	0,98	11,9	6	1,00	9,0	5
	222	0,44	14,7	7	0,91	14,7	7	0,95	16,4	6	0,94	11,9	5
	326	0,48	17,2	7	0,92	17,2	7	0,95	19,1	6	0,97	13,3	5
	336	0,43	16,9	7	0,87	16,9	7	0,93	19,4	6	0,98	12,6	5
	341	0,49	17,7	7	0,87	17,7	7	0,93	19,4	6	0,98	12,6	5
	15	0,50	17,5	7	0,87	17,5	7	0,85	18,4	6	0,96	10,2	5
	26	0,51	14,6	7	0,84	14,6	7	0,89	20,4	6	0,99	11,9	5
	50	0,44	13,9	7	0,83	13,9	7	0,89	17,2	6	0,98	10,1	5
	100	0,43	15,2	7	0,86	15,2	7	0,89	18,5	6	0,98	9,3	5
124	0,34	15,2	7	0,83	15,2	7	0,83	18,5	6	1,00	13,7	5	

(b)  
337

ANO	DIA JUL.	Teor médio de humidade do solo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	PT1 (superfície, 2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT2 (2, 4, 6, 8, 16, 32 cm)			PT3 (2, 4, 6, 8, 16 cm)		
			Razão de deter. (r <sup>2</sup> )	Profundidade de morteciment	Nº de medições	Razão de deter. (r <sup>2</sup> )	Profundidade de morteciment	Nº de medições	Razão de deter. (r <sup>2</sup> )	Profundidade de morteciment	Nº de medições
1994	173	0,28	-	-	-	-	-	-	0,98	8,5	4
	236	0,20	-	-	-	-	-	1,00	7,5	4	
	250	0,17	-	-	-	-	-	1,00	6,8	4	
	257	0,20	-	-	-	-	-	1,00	7,2	4	
	264	0,17	-	-	-	-	-	0,99	8,2	4	
1995	9	0,39	0,91	13,5	7	0,95	15,1	6	0,99	10,2	5
	11	0,39	0,88	14,9	7	0,92	17,0	6	0,99	10,6	5
	13	0,40	0,93	13,8	7	0,98	15,4	6	1,00	12,1	5
	37	0,41	0,91	13,2	7	0,92	14,4	6	0,98	9,0	5
	81	0,35	0,90	15,2	7	0,97	17,4	6	1,00	12,7	5
	86	0,34	0,91	14,8	7	0,94	16,4	6	1,00	10,7	5
	90	0,30	0,94	12,9	7	0,95	13,6	6	1,00	9,1	5
	95	0,29	0,94	14,4	7	0,94	15,2	6	1,00	10,0	5
	98	0,30	0,92	14,2	7	0,92	15,3	6	1,00	9,5	5
	100	0,28	0,95	12,3	7	0,97	13,2	6	1,00	9,5	5
	102	0,31	0,94	12,6	7	0,93	13,2	6	0,99	8,5	5
	104	0,26	0,95	12,2	7	0,95	12,9	6	1,00	8,8	5
	107	0,26	0,96	12,2	7	0,95	12,7	6	1,00	8,7	5
	109	0,27	0,98	12,4	7	0,98	12,9	6	0,99	10,0	5
	139	0,30	0,94	12,8	7	0,97	14,0	6	1,00	10,2	5
	144	0,26	0,95	11,7	7	0,97	12,6	6	0,99	9,4	5
	149	0,27	0,97	11,5	7	0,98	12,1	6	0,99	9,4	5
	151	0,29	0,96	12,3	7	0,97	13,2	6	0,99	10,0	5
	165	0,22	0,97	11,8	7	0,97	12,1	6	1,00	8,8	5
	167	0,26	0,84	14,4	7	0,85	16,2	6	0,96	8,9	5
	179	0,21	0,93	9,8	7	0,96	10,8	6	1,00	7,4	5
	182	0,23	0,89	11,6	7	0,90	12,8	6	1,00	7,5	5
	188	0,16	0,93	12,0	7	0,94	12,8	6	1,00	8,4	5
	201	0,14	0,93	12,8	7	0,97	14,3	6	0,96	11,1	5
236	0,16	0,89	12,5	7	0,93	14,0	6	0,98	9,2	5	
243	0,16	0,94	11,8	7	0,96	12,7	6	0,97	9,4	5	

1996	66	0,39	0,81	15,9	7	0,93	19,5	6	0,96	12,7	5
	80	0,47	0,78	16,1	7	0,93	20,3	6	0,96	13,8	5
	81	0,44	0,82	14,5	7	0,90	17,4	6	0,95	10,8	5
	88	0,39	0,78	15,3	7	0,88	18,8	6	0,88	12,1	5
	106	0,37	0,85	13,8	7	0,90	16,0	6	0,99	9,6	5
	108	0,33	0,89	13,0	7	0,93	14,7	6	1,00	9,3	5
	111	0,35	0,86	12,4	7	0,94	14,5	6	0,96	10,1	5
	117	0,29	0,88	14,0	7	0,94	16,1	6	0,99	10,5	5
	121	0,28	0,77	14,1	7	0,94	17,9	6	0,97	11,9	5
	122	0,28	0,83	13,1	7	0,89	15,4	6	1,00	8,9	5
	145	0,39	0,83	13,8	7	0,95	16,7	6	0,99	11,4	5
	173	0,23	0,85	12,5	7	0,91	14,6	6	0,92	9,5	5
	181	0,20	0,89	12,5	7	0,94	14,2	6	0,99	9,3	5
	185	0,20	0,90	11,3	7	0,94	12,6	6	0,99	8,4	5
	192	0,20	0,87	12,6	7	0,92	14,4	6	0,99	9,0	5
	200	0,19	0,94	11,3	7	0,97	12,3	6	1,00	8,9	5
	207	0,19	0,93	11,3	7	0,97	12,4	6	0,98	9,3	5
	213	0,19	0,96	11,2	7	0,97	12,0	6	0,99	9,0	5
	227	0,18	0,85	13,0	7	0,91	15,1	6	0,97	9,4	5
	234	0,18	0,91	12,3	7	0,93	13,5	6	0,92	9,4	5

(c)



ANEXO K. Profundidade de amortecimento (em cm) obtidas a partir da regressão dos logaritmos das amplitudes térmicas medidas sobre as profundidades respectivas  $[\ln A(z) = -z/D + \ln A(0)]$ , a vários teores médios de humidade do solo, nos dias Julianos indicados, nos solos Pmg (J1) e Cb (J2), em perfis hídricos não uniformes ao longo do perfil, ao longo dos quais a distribuição da humidade não apresentou um sentido predominante.

ANO	DIA	Teor médio de humidade do solo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Prof. de amort. (cm)	ANO	DIA	Teor médio de humidade do solo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Prof. de amort. (cm)
	JUL.				JUL.		
1993	320	0,23	12,1	1995	4	0,24	10,4
	325	0,24	10,6		9	0,22	11,1
	327	0,22	10,3		13	0,21	9,7
	329	0,23	12,1		17	0,21	14,1
	334	0,23	10,6		20	0,25	10,4
	336	0,25	12,9		24	0,23	9,9
	342	0,24	13,4		26	0,23	8,9
	348	0,23	10,8		48	0,25	9,7
	353	0,23	13,2		51	0,24	9,8
	355	0,22	10,9		53	0,24	9,5
	357	0,22	13,2		79	0,19	10,6
	364	0,22	12,4		83	0,14	10,8
1994	7	0,28	13	86	0,11	10,9	
	10	0,30	12,2	95	0,13	10,6	
	14	0,27	11,7	100	0,11	10	
	131	0,12	9,6	114	0,14	11,1	
	133	0,18	9,3	128	0,12	13,3	
	143	0,31	14,5	130	0,16	10,5	
	145	0,25	15,3	142	0,12	11,2	
	149	0,20	15,8	160	0,09	10,2	
	151	0,17	15,2	207	0,06	11,9	
	164	0,14	13,5	225	0,03	11,1	
	169	0,13	13,7	256	0,14	13,5	
	165	0,13	11,7	268	0,12	12,4	
	248	0,06	11,6	261	0,11	11,5	
	259	0,06	10,7	268	0,08	10,9	
	272	0,08	10	271	0,11	11,1	
	306	0,16	11,2	277	0,09	10,5	
	315	0,24	13,2	1996	18	0,32	9,7
	319	0,21	10,9		39	0,30	10,5
	327	0,19	10,9		58	0,29	11,7
	329	0,18	10,3		74	0,28	10,3
332	0,17	9,1	110		0,12	10,5	
334	0,23	12,1	119		0,22	8,4	
346	0,25	10,4	135		0,21	10,8	
348	0,28	9,8	142		0,31	12,8	
			153	0,10	9,5		
			167	0,13	11,2		

(a)

ANO	DIA	Teor médio de humidade do solo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Prof. de amort. (cm)	ANO	DIA	Teor médio de humidade do solo (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Prof. de amort. (cm)
	JUL.				JUL.		
1993	338	0,43	6,9	1995	83	0,32	10,4
	341	0,46	7,5		88	0,34	9,9
	343	0,44	7,6		93	0,33	9,4
	347	0,44	10,7		96	0,32	9,7
	349	0,43	7,6		111	0,31	11,8
	353	0,44	8,2		114	0,29	11,0
	357	0,41	9,2		118	0,42	8,6
	364	0,41	8,7		121	0,34	12,5
1994	7	0,49	8,0		123	0,33	11,9
	10	0,47	14,3		133	0,34	11,6
	12	0,48	9,7		135	0,33	11,9
	14	0,41	9,7		137	0,32	10,1
	17	0,46	7,4		142	0,30	11,2
	19	0,43	8,8		158	0,52	11,6
	21	0,43	7,9		184	0,17	9,9
	24	0,40	8,0		187	0,23	8,6
	26	0,38	8,2		194	0,17	7,8
	31	0,39	7,8		208	0,16	10,1
	33	0,34	9,8		229	0,15	9,4
	35	0,49	9,8		251	0,36	10,8
	38	0,45	9,1		252	0,34	8,0
	45	0,45	9,9		256	0,35	11,5
	182	0,21	7,1		258	0,31	11,1
	243	0,18	6,7		261	0,30	12,6
	271	0,17	7,2		263	0,35	12,7
	287	0,26	10,2		268	0,28	11,9
	292	0,37	10,1		276	0,25	10,7
	293	0,35	9,9		300	0,42	10,9
	298	0,36	9,9	301	0,39	11,5	
	304	0,33	10,1	345	0,49	10,1	
	306	0,37	9,4	1996	37	0,52	10,3
	314	0,46	9,9		64	0,44	10,3
320	0,41	8,9	94		0,46	8,5	
322	0,40	9,3	127		0,47	10,3	
1995	6	0,42	10,4		129	0,49	13,4
	18	0,42	11,7		134	0,36	9,9
	18	0,42	11,7		141	0,43	11,4
	25	0,42	8,2		144	0,38	10,6
	44	0,44	10,2		146	0,39	11,6
	51	0,42	9,8		149	0,35	10,0
	53	0,42	11,1		155	0,30	9,7
	55	0,41	9,6		248	0,16	6,5
	62	0,38	13,7	255	0,22	6,5	
	67	0,38	12,2	261	0,33	8,8	
	69	0,42	15,3	267	0,34	11,1	
	72	0,43	10,1	270	0,35	10,5	
74	0,38	11,1	271	0,33	11,9		
76	0,40	12,5	276	0,34	12,7		
79	0,35	11,0	278	0,32	13,2		
				282	0,27	12,8	

