

**UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA**  
**INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA**

**Modelação da Evapotranspiração em Cobertos Descontínuos**  
**Programação da Rega em Pomar de Pessegueiro**

**Maria Teresa Gomes Afonso do Paço**

**ORIENTADOR: Doutora Maria Isabel Freire Ribeiro Ferreira**

**JÚRI:**

Presidente: **Reitor da Universidade Técnica de Lisboa**

Vogais: **Doutor Richard Snyder**

Full Professor da Universidade da Califórnia, Davis, Estados Unidos da América, na qualidade de especialista

**Doutor João Manuel Dias dos Santos Pereira**

Professor Catedrático do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

**Doutora Maria Isabel Freire Ribeiro Ferreira**

Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

**Doutora Ana Maria Guedes Almeida e Silva**

Professora Associada da Universidade de Évora

**Doutor Vicente de Seixas e Sousa**

Professor Associado da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

**Doutora Isabel Maria Cerqueira Lopes Alves**

Professora Associada do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

**Engenheira Maria Lucília Gomes Ravasco Raposo Rodrigues**

Investigadora Principal do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

**DOUTORAMENTO EM ENGENHARIA AGRONÓMICA**

**LISBOA**

**2003**



**UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA**  
**INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA**

**Modelação da Evapotranspiração em Cobertos Descontínuos**  
**Programação da Rega em Pomar de Pessegueiro**

**Maria Teresa Gomes Afonso do Paço**

**ORIENTADOR: Doutora Maria Isabel Freire Ribeiro Ferreira**

**JÚRI:**

Presidente: **Reitor da Universidade Técnica de Lisboa**

Vogais: **Doutor Richard Snyder**

Full Professor da Universidade da Califórnia, Davis, Estados Unidos da América, na qualidade de especialista

**Doutor João Manuel Dias dos Santos Pereira**

Professor Catedrático do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

**Doutora Maria Isabel Freire Ribeiro Ferreira**

Professora Catedrática do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

**Doutora Ana Maria Guedes Almeida e Silva**

Professora Associada da Universidade de Évora

**Doutor Vicente de Seixas e Sousa**

Professor Associado da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

**Doutora Isabel Maria Cerqueira Lopes Alves**

Professora Associada do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

**Engenheira Maria Lucília Gomes Ravasco Raposo Rodrigues**

Investigadora Principal do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa

**DOCTORAMENTO EM ENGENHARIA AGRONÓMICA**

Dissertação apresentada neste Instituto para obtenção do grau de Doutor

**LISBOA**  
**2003**

Este trabalho foi financiado por:

- Projecto *Innovative biological indicators to improve the efficiency of water and nitrogen use and fruit quality in tree crops* (FAIR-CT 95-0030) no âmbito do Programa FAIR – UE.
- Fundação para a Ciência e a Tecnologia e FSE, no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio, mediante a concessão de uma bolsa de estudos.
- Convénio ICCTI/Embaixada de França e Projecto *WATERUSE* (EVK1-2002-00079) *Evaluation of Alternative Techniques for Determination of Water Budget Components in Water Limited Heterogeneous Land Use Systems*, no âmbito do V Programa-Quadro de IDT da UE.

Dá-me uma pinguinha de água  
Dessa que eu ouço correr  
Entre pedras e pedrinhas  
Alguma gota há-de haver

Alguma gota há-de haver  
Quero molhar a garganta  
Quero cantar como a rola  
Como a rola ninguém canta

*Alentejo - Popular*

**Ao Martim**

## AGRADECIMENTOS

A lista de pessoas a quem gostaria de manifestar o meu apreço, pela colaboração prestada na realização deste trabalho, é longa. Parece-me tarefa difícil a todos incluir. Se alguém esquecer, fica a certeza de que o reconhecimento é sincero e não cabe numa página.

Gostaria de agradecer à minha orientadora, a Professora Maria Isabel Ferreira, a amizade demonstrada e a ajuda prestada, no seio da genialidade e da clarividência que nela me habituei a encontrar ao longo dos anos comuns de trabalho; ao Eng<sup>o</sup> Vítor Lopes o encorajamento, o suavizar dos momentos complicados, a ajuda preciosa nos ensaios de campo e a partilha das ocupações familiares; ao Eng<sup>o</sup> José Silvestre o apoio e disponibilidade constantes; ao Eng<sup>o</sup> Nuno Conceição a ajuda no trabalho experimental, nomeadamente no âmbito das medições da evaporação do solo; à empresa J. P. Vinhos, Lda., a autorização para utilizar a parcela experimental e todas as facilidades concedidas; ao Eng<sup>o</sup> Jorge Manuel Leitão, por todo o auxílio e disponibilidade demonstrados na realização dos trabalhos de campo; ao investigador Mr. Charles Valancogne (INRA, Bordéus), pela ajuda prestada em diversas questões relativas à análise de resultados e pelos momentos de discussão que amavelmente proporcionou; à Mme. Sylvia Dayau pelo apoio simpaticamente demonstrado em variadas situações; ao Dr. Yves Brunet e ao Dr. Mark Irvine (INRA, Bordéus), pelo auxílio prestado na interpretação e validação de dados obtidos pelo método das flutuações instantâneas; à Dr<sup>a</sup> Teresa Quilhó, ao Dr. José Graça, ao Dr. José Carlos Rodrigues e aos colegas da Secção de Tecnologia de Produtos Florestais - Departamento de Engenharia Florestal do ISA, pelo apoio e pela cedência de equipamento, para a determinação das áreas de xilema da secção transversal do tronco; ao Dr. Richard Snyder (Universidade da Califórnia - Davis) pela colaboração prestada durante o primeiro ensaio experimental; ao Dr. Vítor Prior do Instituto de Meteorologia e à Dr<sup>a</sup> Maria João Carvalho, do Laboratório de Ensaio de Colectores Solares - Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial, as informações prestadas; à Dr<sup>a</sup> Maria da Conceição Caldeira, as oportunas sugestões na revisão do texto; à Dr<sup>a</sup> Teresa Soares David, a amável cedência de referências bibliográficas; ao grupo de alunos do ISA, que participou nas morosas medições de área foliar, entre outras tarefas; aos amigos e colegas.

E, claro, a finalizar, mas de modo algum em último lugar, à família maravilhosa que me acompanhou neste processo, com infinita paciência e disponibilidade. Sobretudo, ao Vítor e ao Martim, pelas numerosas horas excluídas à sua companhia e pelas presenças salpicadas de ausências de espírito.

<b>I. INTRODUÇÃO</b>	1
<b>II – A EVAPOTRANSPIRAÇÃO E A REGA EM COBERTOS DESCONTÍNUOS</b>	5
II.1. Necessidades hídricas e programação da rega	8
II.2. Indicadores do estado hídrico do solo e da planta	10
II.3. Balanço de energia de um coberto vegetal descontínuo	18
II.4. Medição da evapotranspiração em cobertos descontínuos	22
II.4.1. Método das flutuações instantâneas	24
II.4.1.1. Fundamento teórico do método	24
II.4.1.2. Condições de medição, selecção e validação dos dados	25
II.4.2. Medição de componentes da evapotranspiração	30
II.4.2.1. Métodos de impulsos de calor	31
II.4.2.2. Métodos de balanço de calor	32
II.4.2.3. Método de <i>Granier</i>	33
II.4.2.4. Método de deformação do campo de temperaturas	35
II.4.2.5. Medição da evaporação do solo	36
II.5. Modelação da evapotranspiração	37
II.5.1. A equação de Penman-Monteith e o uso de coeficientes culturais	37
II.5.2. A estimativa da evapotranspiração em cobertos descontínuos: particularidades	38
II.5.3. Estimativa da evapotranspiração em cobertos descontínuos: as alternativas	40
<b>III - MATERIAIS E MÉTODOS</b>	45
III.1. Objecto de estudo	45
III.1.1. Caracterização do coberto vegetal e rega	46
III.1.2. Caracterização climática	50
III.1.3. Caracterização do solo	56
III.2. Organização das experiências e descrição geral do dispositivo experimental	61
III.3. Medição directa da evapotranspiração pelo método das flutuações instantâneas	64
III.3.1. Sensores utilizados	65
III.3.2. Descrição das medições efectuadas	65
III.3.3. Procedimentos de selecção e validação dos dados	66
III.3.3.1. Análise de pegada	67
III.3.3.2. Erro de fecho da equação do balanço de energia	67
III.3.3.3. Análise espectral	68
III.3.4. Selecção de dados	68
III.3.5. Correções	70
III.3.5.1. Correção para a variação da densidade do ar	70
III.3.5.2. Correção para a absorção de radiação ultravioleta pelo oxigénio	71
III.4. Balanço de energia da superfície	71
III.4.1. Balanço da radiação	72
III.4.2. Fluxo de calor sensível para o solo	72
III.4.2.1. Dispositivo experimental	73
III.4.2.2. Estimativa da capacidade térmica volúmica do solo	74

<b>III.5. Método de <i>Granier</i></b>	75
III.5.1. Dispositivo experimental	75
III.5.2. Estimativa de $\Delta T_{max}$	76
III.5.3. Correção dos gradientes naturais de temperatura no tronco	76
III.5.4. Determinação do perfil radial de distribuição do fluxo de seiva	77
<b>III.6. Medição da evaporação do solo</b>	77
<b>III.7. Medição da condutância estomática</b>	78
<b>III.8. Medição do potencial hídrico foliar</b>	79
<b>III.9. Parâmetros do solo e do coberto vegetal no período dos ensaios</b>	80
III.9.1. Índice de área foliar e grau de cobertura	80
III.9.2. Área activa de transporte no xilema	81
<b>III.10. Observações meteorológicas e cálculo da evapotranspiração de referência</b>	82
<b>III.11. Estimativa de coeficientes culturais</b>	83
<b>IV - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	85
<b>IV.1. Medição directa da evapotranspiração – apresentação e validação dos resultados</b>	85
IV.1.1. Representatividade espacial das medições	85
IV.1.2. Considerações globais sobre o erro de fecho da equação do balanço de energia	86
IV.1.3. Análise espectral	87
IV.1.4. Correção WPL e correção O <sub>2</sub>	88
IV.1.5. Validade dos dados obtidos	89
IV.1.6. Evolução do fluxo de calor latente ao longo do dia	89
IV.1.7. Evapotranspiração diária	91
<b>IV.2. Balanço de energia da superfície</b>	92
IV.2.1. Calor latente <i>versus</i> calor sensível	93
IV.2.2. Fluxo de calor sensível para o solo	95
IV.2.3. Repartição da energia da radiação nas diferentes componentes do balanço de energia	99
IV.2.3.1. Caracterização geral da repartição de energia	99
IV.2.3.2. Análise de $G/R_n$	100
IV.2.3.3. Análise de $H/R_n$ e $\lambda E/R_n$	104
IV.2.4. Análise da variação do erro de fecho da equação do balanço de energia	105
IV.2.4.1. Em relação com a direcção do vento	105
IV.2.4.2. Em relação com $G$	106
<b>IV.3. Evaporação do solo</b>	110
<b>IV.4. Transpiração</b>	119
IV.4.1. Gradientes naturais de temperatura no tronco: influência nas medições	119
IV.4.2. Estimativa de $\Delta T_{max}$	122
IV.4.3. Análise de parâmetros para o estudo da transpiração do coberto vegetal	123
IV.4.3.1. Índice de área foliar	124
IV.4.3.2. Área activa de transporte no xilema	127
IV.4.3.2.1. Determinação através da circulação de corantes no xilema	127
IV.4.3.2.2. Correção dos fluxos através do perfil radial de distribuição do fluxo de seiva	128
IV.4.4. Estimativa da transpiração para o coberto vegetal	136
<b>IV.5. Comparação das metodologias utilizadas para a medição da evapotranspiração</b>	141
IV.5.1. Transpiração medida pelo método do balanço de calor vs. $ET$ medida pelo método das flutuações instantâneas	141
IV.5.2. Transpiração medida pelo método de <i>Granier</i> e pelo método do balanço de calor	143

IV.5.3. Transpiração medida pelo método de <i>Granier</i> vs. <i>ET</i> medida pelo método das flutuações instantâneas	146
IV.5.4. Análise qualitativa do método de <i>Granier</i> para o pomar em estudo	148
<b>IV.6. Indicadores do estado hídrico da planta</b>	151
IV.6.1. Potencial hídrico foliar	151
IV.6.2. Condutância estomática	157
IV.6.3. Análise conjunta de cinéticas diárias de potencial hídrico foliar e de condutância estomática, em situação de déficit hídrico	163
IV.6.4. Transpiração relativa	167
IV.6.5. Análise da evolução conjunta de indicadores do estado hídrico	168
IV.6.5.1. Condutância estomática vs. potencial hídrico foliar de base	168
IV.6.5.2. Transpiração relativa vs. potencial hídrico foliar de base	172
IV.6.5.3. Relação entre a transpiração relativa, a condutância estomática relativa e o potencial hídrico foliar de base	176
<b>V. PROGRAMAÇÃO DA REGA</b>	179
V.1. Modelação da evapotranspiração na programação da rega	179
V.2. Relação entre a <i>ET</i> relativa e a <i>ET</i> acumulada desde a última rega	182
V.3. Limiares operacionais para a programação da rega	184
V.4. Medição e estimativa de coeficientes culturais	186
V.5. Optimização das técnicas de programação da rega face aos resultados encontrados	190
V.5.1. Utilização de coeficientes culturais e da evapotranspiração de referência	190
V.5.2. Utilização dos modelos empíricos propostos	191
<b>VI. CONCLUSÕES</b>	195
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	199
<b>ANEXO I</b>	222
<b>ANEXO II</b>	224
<b>ANEXO III</b>	226

## RESUMO

A evapotranspiração de um pomar de pessegueiro, localizado na zona centro de Portugal, foi quantificada durante duas épocas de rega, tendo por objectivo encontrar formas de otimizar a programação da rega, mediante um conhecimento mais preciso da evapotranspiração. Recorreu-se à utilização de métodos de medição de fluxo de seiva para determinar a transpiração e à medição directa da evapotranspiração, utilizando um método micrometeorológico. A evaporação do solo foi medida utilizando microlisímetros. A medição automatizada da transpiração permitiu a obtenção de estimativas da evapotranspiração para períodos prolongados, utilizando como referência a evapotranspiração obtida pelo método das flutuações instantâneas. Foram analisados diversos aspectos metodológicos da medição do fluxo de seiva e utilizou-se um novo processo de cálculo do fluxo, recorrendo ao conhecimento do perfil radial de distribuição da densidade de fluxo. Mediram-se e estimaram-se coeficientes culturais para o pomar em estudo. A análise do balanço de energia da superfície permitiu caracterizar a forma como a energia se repartia nas diferentes componentes e a importância relativa das mesmas. A indução de ciclos de défice hídrico permitiu o estudo de alguns indicadores de *stress* hídrico e o estabelecimento de relações utilizáveis na programação da rega.

**Palavras-chave:** *Prunus persica*, evapotranspiração, programação da rega, fluxo de seiva, *stress* hídrico.

## ABSTRACT

### EVAPOTRANSPIRATION MODELLING IN DISCONTINUOUS CANOPIED CROPS IRRIGATION SCHEDULING IN PEACH ORCHARD

Peach orchard evapotranspiration has been quantified for two irrigation seasons in central Portugal with the main objective of obtaining information on peach water relations and improving irrigation scheduling. Sap flow measurements were used for monitoring the transpiration component while evapotranspiration was measured using a micrometeorological method (eddy covariance) and soil evaporation using microlysimeters. Several methodological aspects related to sap flow measurements were analysed and an innovative way of calculating transpiration fluxes was followed. The followed approach includes the radial variation in sap flux density within the trunk. The relationship between measured evapotranspiration and soil evaporation plus transpiration, obtained from sap flow measurements, was analysed, allowing the estimation of evapotranspiration for most of the vegetative cycle. Crop coefficients were measured and estimated for the orchard under study. The analysis of the surface energy balance made possible the partition of energy into the different components and an evaluation of their relative importance. Induction of periods of water stress allowed several water stress indicators to be studied. Useful indicators for improved irrigation scheduling were evaluated from the construction or analysis of simple models.

**Keywords:** *Prunus persica*, evapotranspiration, irrigation scheduling, sap flow, water stress indicators.

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolo		Unidade
$A$	área da secção transversal condutora do tronco	$m^2$
$A'$	área de xilema condutor da parcela	$m^2$
$A_f$	área foliar	$cm^2$
$A_i$	área da secção radial $i$ do tronco	$m^2$
$A_T$	área da secção transversal total do tronco	$m^2$
$C_o$	concentração de oxigénio na atmosfera	
$cov(x,y)$	covariância	
$c_p$	capacidade térmica mássica do ar a pressão constante	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$c_{pav}$	capacidade térmica mássica média dos constituintes sólidos do solo	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$c_{pw}$	capacidade térmica mássica da água	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$
$c_v$	capacidade térmica volúmica	$J\ m^{-3}\ K^{-1}$
$C_{xy}(f)$	função do cospectro (análise espectral, método das flutuações instantâneas)	
$d$	altura de deslocamento do plano de referência (análise de pegada, método das flutuações instantâneas)	$m$
$D$	densidade de fluxo de seiva; por vezes também representado por $u$ por conveniência de escrita	$m^3\ m^{-2}\ s^{-1}$
$D_e$	densidade de fluxo de seiva representativa	$m^3\ m^{-2}\ s^{-1}$
$D_i$	densidade de fluxo de seiva na secção radial $i$ do tronco	$m^3\ m^{-2}\ s^{-1}$
$D_m$	diâmetro médio do tronco das árvores de uma parcela	$m$
$D_{ma}$	diâmetro médio do tronco de uma amostra de árvores	$m$
$e$	pressão de vapor de água no ar	$Pa$
$E$	evaporação	$kg\ m^{-2}$
$E_i$	evaporação do solo estimada de acordo com Allen <i>et al.</i> (1998)	$mm\ dia^{-1}$
$E_{pot}$	evaporação do solo potencial	$mm\ dia^{-1}$
$E_s$	evaporação de água do solo	$mm\ dia^{-1}$
$E_{si}$	evaporação da fracção de solo em condições idênticas ao solo do lisímetro $i$	$mm\ dia^{-1}$
$ET$	evapotranspiração	$mm\ dia^{-1}$
$ET_c$	evapotranspiração cultural	$mm\ dia^{-1}$
$ET_{ec}$	evapotranspiração medida pelo método das flutuações instantâneas	$mm\ dia^{-1}$
$ET_m$	evapotranspiração máxima da cultura	$mm\ dia^{-1}$
$ET_o$	evapotranspiração de referência	$mm\ dia^{-1}$
$ET_{o\ aj}$	evapotranspiração de referência ajustada (evaporação do solo)	$mm\ dia^{-1}$
$F$	fluxo de seiva	$m^3\ s^{-1}$
$f$	frequência de medição	$Hz$
$f_c$	fracção da superfície do solo coberta pela vegetação	
$f_{c\ eff}$	fracção efectiva de superfície do solo coberta ou sombreada pela vegetação	
$f_{ew}$	fracção da superfície do solo simultaneamente exposta e humedecida	
$f_k$	correção $O_2$ do fluxo de calor latente	
$F_T$	fluxo total de seiva do coberto	$m^3\ s^{-1}$
$f_w$	fracção da superfície do solo humedecida pela rega	
$G$	densidade do fluxo de calor sensível de e para o solo	$W\ m^{-2}$ ou $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$
$g_c$	condutância estomática do coberto	$cm\ s^{-1}$
$g_s$	condutância estomática (pontual)	$cm\ s^{-1}$
$G_s$	densidade do fluxo de calor sensível à superfície do solo	$W\ m^{-2}$
$G_z$	densidade do fluxo de calor sensível medido à profundidade $z$	$W\ m^{-2}$
$H$	densidade do fluxo de calor sensível para a atmosfera	$W\ m^{-2}$
$H$	altura do coberto	$m$
$H_m$	teor em água no solo (referido à massa)	$kg\ kg^{-1}$
$HR$	humidade relativa	$Pa\ Pa^{-1}$
$H_v$	teor em água do solo (referido ao volume)	$cm^3\ cm^{-3}$
$J$	dia do ano	
$k$	constante de <i>von Karman</i> (análise de pegada, método das flutuações instantâneas)	

$k$	índice de fluxo (método de <i>Granier</i> )	
$K_c$	coeficiente cultural	
$K_{c\ ec}$	coeficiente cultural obtido a partir de medições com o método das flutuações instantâneas	
$K_{c\ max}$	valor máximo do coeficiente cultural depois de uma rega ou chuva	
$K_{c\ min}$	coeficiente cultural mínimo para solo nu	
$K_{cb}$	coeficiente cultural basal	
$K_{cb\ adj}$	coeficiente cultural basal ajustado	
$K_{cb\ full}$	coeficiente cultural basal estimado durante a fase de máximo desenvolvimento vegetativo	
$K_e$	coeficiente de evaporação do solo	
$k_o$	coeficiente de absorção do oxigénio (Tanner <i>et al.</i> , 1993)	
$K_s$	coeficiente de secura	
$K_v$	coeficiente de absorção do vapor de água (Tanner <i>et al.</i> , 1993)	
$LAI$	índice de área foliar	
$m_o$	massa molecular do oxigénio	kg mol <sup>-1</sup>
$n_a$	número de árvores por unidade de superfície	árvores ha <sup>-1</sup>
$n_p$	número teórico de árvores por unidade de superfície, na ausência de falhas	árvores ha <sup>-1</sup>
$P$	pressão atmosférica	Pa
$Q$	contribuição dos fluxos acumulados entre o ponto de medição e um ponto situado a uma determinada distância $x$ (Análise de pegada)	W m <sup>-2</sup>
$Q_o$	densidade de fluxo medida no ponto $x = (0, z)$ (Análise de pegada)	W m <sup>-2</sup>
$R$	constante universal dos gases	J K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
$r_a$	resistência aerodinâmica	s m <sup>-1</sup>
$r_c$	resistência estomática do coberto	s m <sup>-1</sup>
$R_n$	densidade de fluxo correspondente ao balanço da radiação	W m <sup>-2</sup>
$R_s$	densidade de fluxo de radiação solar global	W m <sup>-2</sup>
$r_s$	resistência estomática (pontual)	s m <sup>-1</sup>
$r_t$	raio do tronco (sem considerar a casca)	cm
$r_x$	fracção do raio do tronco correspondente à área de xilema	cm
$S$	quantidade de calor armazenada numa camada de solo entre a superfície e uma determinada profundidade	W m <sup>-2</sup>
$Sx(f)$	função espectral (Análise espectral)	
$T$	temperatura	°C ou K
$T_{bc}$	transpiração da parcela obtida pelo método do balanço de calor	mm dia <sup>-1</sup> ou mm h <sup>-1</sup>
$T_G$	transpiração da parcela obtida pelo método de <i>Granier</i> utilizando o conhecimento do perfil radial	mm dia <sup>-1</sup> ou mm h <sup>-1</sup>
$T_{G_a}$	transpiração média da amostra obtida pelo método de <i>Granier</i>	mm dia <sup>-1</sup> ou mm h <sup>-1</sup>
$T_{G_x}$	transpiração da parcela obtida pelo método de <i>Granier</i> utilizando a quantificação da área de xilema activo	mm h <sup>-1</sup>
$TR$	transpiração relativa	
$u$	densidade de fluxo de seiva; por vezes também representado por $D$ por conveniência de escrita	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
$U$	velocidade do vento considerada média entre a superfície e a altura de medição	m s <sup>-1</sup>
$u_*$	velocidade de atrito (análise de pegada, método das flutuações instantâneas)	m s <sup>-1</sup>
$\bar{u}$	densidade média de fluxo de seiva do coberto	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
$VPD$	défice da pressão de vapor do ar	kPa
$w$	velocidade vertical do vento	m s <sup>-1</sup>
$x_L$	distância na direcção do vento dominante entre o ponto considerado e o limite da parcela	m
$z_o$	rugosidade aerodinâmica da superfície	m
$\Delta T_{max}$	diferença de temperatura entre as duas sondas do sensor em situação de densidade de fluxo nulo	°C
$\Delta T$	diferença de temperatura entre as duas sondas do sensor em situação de densidade de fluxo positiva	°C

$\Psi_b$	potencial hídrico foliar de base	MPa
$\Psi_{b\ max}$	potencial hídrico foliar de base máximo ocorrido antes de um ciclo de déficit hídrico	MPa
$\Psi_f$	potencial hídrico foliar	MPa
$\Psi_{min}$	potencial hídrico foliar mínimo	MPa
$\Psi_{stem}$	potencial hídrico dos ramos	MPa
$\beta$	razão de <i>Bowen</i>	
$\beta'$	parâmetro da equação de calibração do método de <i>Granier</i> (eq. III.7)	
$\beta_e$	parâmetro característico da evaporação do solo (modelo Boesten <i>et al.</i> , 1986)	
$\lambda$	calor latente de vaporização da água	J kg <sup>-1</sup>
$\lambda E$ ou $LE$	densidade de fluxo de calor latente libertado pela superfície	W m <sup>-2</sup>
$\lambda E_d$	densidade de fluxo de calor latente corrigido (correção WPL)	W m <sup>-2</sup>
$\lambda E_{d,o}$	densidade de fluxo de calor latente corrigido (WPL e O <sub>2</sub> )	W m <sup>-2</sup>
$\mu$	razão entre as massas moleculares do ar seco e do vapor de água	
$\sigma_x^2$	variância	
$\alpha$	parâmetro dependente das características hidráulicas do solo (Ritchie, 1972)	
$\alpha'$	parâmetro da equação de calibração do método de <i>Granier</i> (eq. III.7)	
$\Omega$	coeficiente de desacoplamento (Jarvis e McNaughton, 1983, 1986)	
$\gamma$	“constante” psicrométrica	Pa K <sup>-1</sup>
$\Delta$	declive da curva da pressão de vapor de saturação	Pa K <sup>-1</sup>
$\sigma$	razão entre as densidades médias do vapor de água e do ar seco	
$\mu$	razão entre as massas moleculares do ar seco e do vapor de água	
$\rho$	densidade do ar húmido	kg m <sup>-3</sup>
$\rho_a$	densidade do ar seco	kg m <sup>-3</sup>
$\rho_b$	massa volúmica do solo	kg m <sup>-3</sup>
$\rho_v$	humidade absoluta	kg m <sup>-3</sup>

## Abreviaturas

---

<i>ABA</i>	ácido abscísico
<i>CWSI</i>	<i>crop water stress index</i> (índice de <i>stress</i> hídrico da cultura)
<i>dda</i>	dia do ano
<i>FAN</i>	fluxo acumulado normalizado (análise de ‘pegada’, método das flutuações instantâneas)
<i>HD</i>	<i>heat dissipation</i> (dissipação de calor)
<i>HFD</i>	<i>heat field deformation</i> (deformação do campo de temperaturas)
<i>HPV</i>	<i>heat pulse velocity</i> (velocidade dos impulsos de calor)
<i>LAI</i>	<i>leaf area index</i> (índice de área foliar)
<i>MDS</i>	<i>maximum daily shrinkage</i> (contração máxima diária)
<i>RDI</i>	<i>regulated deficit irrigation</i> (rega deficitária controlada)
<i>RDTS</i>	<i>relative daily trunk shrinkage</i> (contração relativa diária do diâmetro do tronco)
<i>SHB</i>	<i>stem heat balance</i> (balanço de calor do tronco)
<i>THB</i>	<i>tissue heat balance</i> (balanço de calor dos tecidos)
<i>TU</i>	tempo universal

Figura III.1 – Localização do pomar de pessegueiros onde decorreu o trabalho experimental.....	45
Figura III.2 – Ortofotomapa do local onde foram realizados os ensaios experimentais (ver também Figura III.20); a seta branca assinala a parcela onde foram colocados os sensores e a sua direcção corresponde à do vento dominante.....	46
Figura III.3 – Fotografia dos frutos de pessegueiro da variedade <i>Silver King</i> .....	46
Figura III.4 – Aspecto das linhas de plantação do pomar em estudo.....	47
Figura III.5 – Dimensões do diâmetro do tronco de cada árvore em relação à média de todas as árvores da parcela; as letras indicam as linhas de árvores e os números a posição na linha; as células sombreadas indicam as árvores amostradas, 1998: D-40 (12), D-41 (11), D-43 (10), D-44 (9), D-48 (8), D-49 (7) – amostra submetida a <i>stress</i> hídrico, H-30 (6), H-32 (5), H-34 (4), H-36 (3), H-40 (2), H-41 (1) – amostra de parcela regada, 1999: D-29 (6), D-35 (9), E-30 (7), E-34 (8), E-42 (10) – amostra submetida a <i>stress</i> hídrico, G-28 (1), G-34 (2), G-38 (3), G-41 (4), G-44 (5) – amostra de parcela regada; as células vazias indicam falhas ou árvores de dimensão muito reduzida; ▼ indica a localização da torre de observações (vd. III.2 para esclarecimentos).....	48
Figura III.6 – Rega do pomar em 1998.....	49
Figura III.7 – Rega do pomar em 1999.....	49
Figura III.8 – (a) temperatura média mensal do ar; (b) humidade relativa média mensal nas estações climatológicas de Pegões e do Montijo/ Base Aérea, média de 30 anos e medida localmente, durante os anos referidos.....	51
Figura III.9 – Velocidade média mensal do vento nas estações climatológicas de Pegões e Montijo/ B. Aérea (INMG, 1991) e medida localmente.....	52
Figura III.10 – Frequência média da direcção do vento para o conjunto dos meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro, nas estações climatológicas de Pegões e do Montijo/Base Aérea e no local dos ensaios experimentais.....	52
Figura III.11 – Temperatura média do ar (médias de 30 minutos), (a) 1998 e (b) 1999.....	53
Figura III.12 – Velocidade média do vento (médias de 30 minutos); (a) 1998 e (b) 1999.....	54
Figura III.13 – Evolução ao longo do tempo, durante o período experimental, do défice de pressão de vapor do ar 52 ( <i>VPD</i> ) medido no pomar, (a) 1998, (b) 1999; médias de 30 minutos.....	54
Figura III.14 – Balanço diário da radiação para períodos diurnos (entre as 8 e as 20 h); medições realizadas como descrito em III.4.1; (a) 1998, (b) 1999.....	55
Figura III.15 – Precipitação diária numa estação meteorológica próxima (Vendas Novas - Rede Meteorológica INAG) durante os períodos dos ensaios experimentais (fonte: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos – <a href="http://snirh.inag.pt">http://snirh.inag.pt</a> ); (a) 1998, (b) 1999.....	56
Figura III.16 – Comparação de medições das principais variáveis meteorológicas na Atalaia e em três estações meteorológicas próximas (dados semi-horários, Julho de 1998).....	57
Figura III.17 – Perfil do solo na linha de plantação.....	58
Figura III.18 – Densidade aparente do solo determinada em dois perfis distintos, localizados sobre a linha de plantação.....	60
Figura III.19 – Perfil da capacidade de campo; $H_v$ – volume de água existente por unidade de volume de solo, expresso em percentagem; 17 de Junho de 1998.....	60
Figura III.20 – Quadro geral de medições e regas (na parcela em condições de rega normal - Rega A e na parcela submetida a défice hídrico - Rega B); 1998.....	62
Figura III.21 – Quadro geral de medições e regas (na parcela em condições de rega normal - Rega A e na parcela submetida a défice hídrico - Rega B); 1999.....	63

Figura III.22 – Esquema do pomar e localização da torre utilizada para as medições micrometeorológicas (■); as áreas tracejadas estavam ocupadas por pessegueiros ou ameixeiras, as outras por culturas baixas ou em pousio.....	64
Figura III.23 – Esquema de localização dos microlisímetros, utilizados para medir a evaporação do solo. Os círculos numerados indicam a localização relativa de cada lisímetro. As restantes áreas numeradas representam as áreas de influência, consideradas para identificar as condições associadas aos lisímetros; a área 3 tem uma largura igual a 0.4 m.....	78
Figura IV.1 – (a) Densidade de fluxo relativa (‘pegada’ monodimensional); (b) Fluxo acumulado normalizado; $x$ – distância horizontal entre o ponto de medição e um determinado ponto da região donde são originários os fluxos; $x_L$ – distância entre o ponto de medição e o limite da região donde são originários os fluxos.....	85
Figura IV.2 – Espectro de variância de $w$ (componente vertical da velocidade do vento), $T$ (temperatura do ar) e $q$ (concentração de vapor de água); $f$ é a frequência de medição (não normalizada, dado as medições terem sempre decorrido no mesmo local e à mesma altura) e $fS_x(f)/\sigma_x^2$ a função espectral normalizada; série temporal recolhida no dia 26.06.98.....	87
Figura IV.3 – Coespectro dos sinais associados da componente vertical da velocidade do vento e temperatura do ar ( $C_{wT}$ ) e da componente vertical da velocidade do vento e concentração de vapor de água ( $C_{wq}$ ); $f$ é a frequência de medição (não normalizada, dado as medições terem sempre decorrido no mesmo local e à mesma altura) e $fC_{xy}(f)/cov_{xy}$ a função do coespectro normalizada; série temporal recolhida no dia 26.06.98.....	88
Figura IV.4 – Exemplos do efeito das correcções WPL e $O_2$ nos fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ), para dias representativos, em 1998; ‘LE WPL’ representa a densidade do fluxo de calor latente depois de efectuada a correcção WPL, ‘LE $O_2$ ’ representa a densidade do fluxo de calor latente depois de efectuada a correcção $O_2$ e ‘LE medido’ representa a densidade do fluxo de calor latente medida, sem qualquer correcção.....	89
Figura IV.5 – Densidade de fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ) medida pelo método das flutuações instantâneas; J representa o dia do ano; 1998.....	90
Figura IV.6 – Densidade de fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ) medida pelo método das flutuações instantâneas; J representa o dia do ano; 1999.....	91
Figura IV.7– Evapotranspiração diária medida pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}$ ). .....	92
Figura IV.8 – Variação ao longo do dia dos fluxos de calor sensível e latente, para o conjunto de medições seleccionadas em 1998; os momentos em que as medições são interrompidas evidenciam-se na Tabela IV.2 com um tracejado vertical. ....	93
Figura IV.9 – Variação ao longo do dia dos fluxos de calor sensível e latente, para o conjunto de medições seleccionadas em 1999; os momentos em que as medições são interrompidas evidenciam-se na Tabela IV.3 com um tracejado vertical. ....	94
Figura IV.10 – Variação diária da razão $H/\lambda E$ com o $VPD$ máximo diário; (●) na ausência de restrições hídricas, (+) na presença de restrições hídricas. ....	94
Figura IV.11 – Evolução do fluxo de calor sensível para o solo ( $G$ ) durante alguns dias consecutivos, medido com o sistema de duas placas; (a) 1998, (b) 1999.....	96
Figura IV.12 – Evolução do fluxo de calor sensível para o solo ( $G$ ) durante alguns dias consecutivos (1998), medido com o sistema de oito placas.....	97
Figura IV.13 – Evolução da densidade de fluxo de calor sensível para o solo ( $G$ ), ao longo de um dia representativo de condições de céu limpo (15/07/1998), em vários pontos de medição distribuídos regularmente entre duas linhas de plantação e segundo uma recta perpendicular a estas; os índices 1 a 8 representam a identificação das placas de medição estando a placa 8 colocada sobre a linha mais a este....	97
Figura IV.14 – Diferença de fase entre $G$ e $R_n$ em dias de céu limpo (exemplo para os dias do ano 190-193); $G$ medido pelo sistema de 8 placas, 1998. ....	98
Figura IV.15 – Relação entre $G$ obtido com o sistema de 8 placas e $R_n$ ( $t+1$ ), fazendo ‘coincidir’ os máximos das duas curvas, 1998; dias de céu limpo (valores semi-horários). ....	98
Figura IV.16 – Comparação entre $G$ medido pelo sistema de 8 placas e $G$ estimado com a equação IV.1. ....	99

Figura IV.17 – Exemplo de séries temporais (médias de 30 minutos) dos componentes da equação do balanço de energia considerados; $G$ estimado a partir do balanço da radiação; (a) 1998; (b) 1999.....	100
Figura IV.18 – Razão $G/R_n$ em dias de (a) céu limpo (dias do ano 186, 190-200), (b) céu nublado (182-184, 188), (c) céu nublado subsequentes a dias de céu limpo (187 e 201) e (d) céu limpo subsequentes a dias de céu nublado (185, 189 e 202); a linha representa a média para cada intervalo de 30 minutos; valores diurnos (8.00-17.00 h), $G$ medido pelo sistema de 8 placas, 1998.....	102
Figura IV.19 – Balanço da radiação e fluxo de calor para o solo diário: em dias de céu nublado, subsequentes a dias de céu limpo (182, 187 e 201, ○) e subsequentes a dias de céu nublado (183, 184 e 188, □) e em dias de céu limpo, subsequentes a dias de céu limpo (186, 190-200) e subsequentes a dias de céu nublado (185, 189 e 200); (o objectivo de apresentar $R_n$ é apenas relacionar com a ocorrência de dias de céu limpo e dias de céu nublado).....	103
Figura IV.20 – Evolução da razão $G/R_n$ calculada para 24 horas no período indicado.....	103
Figura IV.21 – Evolução das razões $H/R_n$ e $\lambda E/R_n$ diurnas ao longo dos períodos de medição com o método das flutuações instantâneas; (a) 1998, as setas indicam a falha do sistema de rega nos dias 177 (seta tracejada) a 179 e o respectivo recomeço (seta a cheio); (b) 1999.....	104
Figura IV.22 – Fecho da equação do balanço de energia segundo a direcção do vento dominante (troncos de cone posteriores), erro zero significa $(LE+H+G)/R_n = 1$ ; (a) 1998 (dias do ano 184-187, 189-191, 193, 196, 197 e 199); (b) 1999 (dias do ano 190, 191, 196, 197, 202, 203, e 210-214); os valores entre parêntesis referem o número de observações em cada direcção (n); a percentagem correspondente está graficamente representada nos troncos de cone anteriores; $R_n > 60 \text{ W m}^{-2}$ .....	106
Figura IV.23 – Balanço de energia da superfície, calculado com medições semi-horárias; (a) dias do ano 196 e 197, para o dispositivo de 2 placas em 1998; (b) dias do ano 196 e 197, para o dispositivo de 8 placas, 1998.....	107
Figura IV.24 – Balanço de energia da superfície, calculado com medições semi-horárias; dias do ano 191, 196, 197, 202, 203, 210 – 214, para o dispositivo de 2 placas, 1999.....	108
Figura IV.25 – Balanço de energia da superfície, calculado com medições semi-horárias; dias do ano 184, 187, 189, 190, 191, 196 e 197, para o dispositivo de 8 placas, em 1998.....	108
Figura IV.26 – Fecho da equação do balanço de energia, utilizando $G$ estimado a partir de $R_n$ , para dias de céu limpo (dias do ano 172-174, 178, 179, 205, 206, 208 e 211 – 1998).....	109
Figura IV.27 – Fecho da equação do balanço de energia, utilizando $G$ estimado a partir de $R_n$ , para dias de céu limpo em que se realizaram medições de fluxo de calor latente (dias do ano 190, 191, 196, 197, 202, 203, 210-214); 1999.....	110
Figura IV.28 – Evaporação do solo média diária para a parcela em estudo; (a) 1999; (b) 1998.....	111
Figura IV.29 – Exemplo dos resultados da medição de $E_s$ ao longo do dia, em intervalos de meia-hora, para o dia 251 (9 de Setembro), em 1998.....	111
Figura IV.30 – Comparação entre a estimativa de $E_s$ pelo modelo $E_s = 0.064 e^{-0.267N} ET_o$ e $E_s$ medida; as setas indicam a ocorrência de precipitação.....	112
Figura IV.31 – Precipitação diária numa estação meteorológica próxima (Vendas Novas - Rede Meteorológica INAG) no período que antecede as experiências (01.05.98, dia do ano 121, a 15.06.98, dia do ano 166) (fonte: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos – <a href="http://snirh.inag.pt">http://snirh.inag.pt</a> ).....	113
Figura IV.32 – Evolução diária da $E_s$ com a $ET_o$ ; (a) para todos os dias em que se realizou a medição da $E_s$ em 1998 e 1999, (b) apenas para o período entre o dia do ano 174 e o dia do ano 202, em 1999; a linha representa a equação $E_s = 0.05 ET_o$ .....	113
Figura IV.33 – Modelo de estimativa da evaporação do solo, na ausência de precipitação; $E_{s_i}$ é a evaporação do lisímetro $i$ , $t$ é o tempo decorrido após o início do ciclo de dessecação [dias]. O resultado para cada grupo de lisímetros (1, 2, 4, 5/3/6, 7, 8, 9) é calculado para a área de influência associada [ $\text{kg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ].....	115
Figura IV.34 – Modelo de estimativa da evaporação do solo a seguir à ocorrência de precipitação; $E_{s_i}$ é a evaporação ocorrida na área de influência correspondente ao lisímetro $i$ , por unidade de superfície e por dia,	

$t$ é o tempo decorrido após o início do ciclo de dessecação [dias]. O resultado para cada grupo de lisímetros (1, 2, 4, 5/3/6, 7, 8, 9) é calculado para a área de influência associada [ $\text{kg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ].	116
Figura IV.35 – Evaporação do solo ( $E_s$ ) estimada para o período em que decorreu o trabalho experimental pelo modelo desenvolvido para o pomar em estudo a utilizar na ausência de precipitação (modelo A) e medida para alguns dias da fase final (1998); $\neq$ assinala a ocorrência de orvalho em dias de medição de $E_s$ .	117
Figura IV.36 – Evaporação do solo ( $E_s$ ) medida e estimada usando os modelos desenvolvidos para o pomar em estudo (A e B), em 1999; as setas assinalam a ocorrência de precipitação nos dias 208, 215, 219 e 220; $\neq$ assinala a ocorrência de orvalho em dias de medição de $E_s$ .	118
Figura IV.37 – Evaporação do solo estimada na zona submetida a <i>stress</i> hídrico, durante 2 ciclos de dessecação; (a) 1998, (b) 1999; os pontos assinalados por asteriscos são extrapolações, dado o modelo só produzir estimativas até ao 5º dia dos ciclos de dessecação, os losangos representam as medições efectuadas.	119
Figura IV.38 – Exemplo de alguns padrões das curvas de $\Delta T$ obtidas sem aquecimento; os números da legenda referem a identificação das árvores, 1999.	120
Figura IV.39 – Diferença de temperatura entre sondas de um sensor <i>Granier</i> , numa árvore individual (árvore 9, em 1999, que se encontrava junto de um gotejador) em dias em que não ocorreu rega nem aquecimento da sonda superior.	121
Figura IV.40 – Diferença de temperatura entre sondas de um sensor <i>Granier</i> , na mesma árvore da figura anterior (árvore 9, em 1999, que se encontrava junto de um gotejador), em dias em que ocorreu rega e na ausência de aquecimento da sonda superior; a seta assinala o início da rega.	121
Figura IV.41 – Evolução conjunta do $\Delta T$ , já corrigido para os efeitos dos gradientes naturais (linha a cheio) e da humidade relativa (linha tracejada); exemplo para a árvore 1, em 1998.	123
Figura IV.42 – Evolução diária do $\Delta T$ máximo, não corrigido e corrigido para o efeito dos gradientes naturais de temperatura; exemplo para a árvore 1 em 1998; a linha cinzenta representa os valores finais utilizados (envolvente).	123
Figura IV.43 – Estimativa da área foliar em função do comprimento das folhas, em plantas de pessegueiro, para duas situações experimentais distintas.	125
Figura IV.44 – Estimativa da área foliar em função do número de folhas, em plantas de pessegueiro, para duas situações experimentais distintas.	125
Figura IV.45 – Número de folhas de cada árvore e <i>LAI</i> estimado em pleno Verão; em 1998 a estimativa foi realizada entre o final de Julho e o princípio de Agosto, em 1999 foi realizada em Julho.	126
Figura IV.46 – Relação entre o <i>LAI</i> e o diâmetro do tronco; (a) representação gráfica das observações referentes a cada uma das amostras, (b) mesmos pontos com análise de regressão.	126
Figura IV.47 – (a) Área de xilema activo determinada através da circulação de corantes no tronco (% em relação à área total da secção transversal); (b) Avaliação da mobilidade dos corantes utilizados, através da medição da área corada em secções sucessivas, a partir do ponto de inserção do corante.	127
Figura IV.48 – Aspecto da secção transversal do tronco após a circulação de corantes; (a) <i>verde-rápido</i> numa secção perto do ponto de inserção do corante; (b) <i>verde malaquite</i> numa secção perto do ponto de inserção do corante; (c) <i>verde-rápido</i> numa secção no extremo oposto ao da inserção de corante; (d) <i>verde malaquite</i> numa secção no extremo oposto ao da inserção de corante.	128
Figura IV.49 – Perfil radial de distribuição da densidade de fluxo de seiva medido pelo método dos impulsos de calor; exemplo para o dia do ano 211, de 1999 (28 de Julho). O ponto de medição 1 corresponde à posição mais externa.	129
Figura IV.50 – Perfil radial de distribuição do fluxo de seiva, (a) árvore 37-D; (b) árvore 36-D; médias obtidas num período de 8 dias, entre as 12 e as 15 horas (hora local); a escala representada em abcissas indica a profundidade no tronco a que foram realizadas as medições.	130
Figura IV.51 – Perfil radial de distribuição do fluxo de seiva obtido pelo método de deformação do campo de temperaturas, cerca das 13 horas (hora local) do dia 186, 1999 (5 de Julho); a escala representada em abcissas indica a profundidade no tronco a que foram realizadas as medições.	130
Figura IV.52 – Cálculo da razão $D_i/D_{eq}$ para duas árvores amostradas pelo método dos impulsos de calor e para uma árvore amostrada pelo método de deformação do campo de temperaturas.	132

Figura IV.53 – Raio do tronco de árvores de pessegueiro (variedade <i>Maybelle</i> - Águas de Moura-Setúbal, 1993 e 1996) não considerando a casca ( $r_t$ ) e fracção do raio correspondente à área de xilema ( $r_x$ ); as árvores tinham 3 anos em 1993. ....	133
Figura IV.54 – Simulação do perfil radial de distribuição de fluxo de seiva através de medições pelo método de impulsos de calor e pelo método de deformação do campo de temperaturas; os pontos representam a densidade de fluxo de seiva afectada de um factor de normalização; a curva representa a equação de regressão estabelecida; o raio do tronco não considera a casca. ....	134
Figura IV.55 – Evolução da razão $D_i/D_{eq}$ ao longo do raio; a área tracejada representa o integral da densidade do fluxo, a área sombreada representa a área equivalente se a medição da densidade de fluxo de seiva for efectuada num ponto representativo. ....	135
Figura IV.56 – Comprimento teórico das sondas de medição de fluxo de seiva, para que a medição pudesse ser realizada num ponto representativo (a 0.22 ou 1.68 cm de profundidade no xilema);  assinala os pontos de medição representativos. ....	135
Figura IV.57 – Relação da área activa de transporte de seiva (determinada com corantes) com as dimensões do tronco. ....	136
Figura IV.58 – Relação entre a densidade de fluxo de seiva ( $u$ ) total diária de cada árvore e o $LAI$ ; $u$ calculada para períodos de dias de céu limpo: 190-197/1998 e 208-215/1999. ....	137
Figura IV.59 – Relação entre a densidade de fluxo de seiva ( $u$ ) total diária de cada árvore e o diâmetro do tronco; $u$ calculada para períodos de dias de céu limpo: 190-197/1998 e 208-215/1999; a linha tracejada indica o diâmetro médio do tronco determinado para a parcela em 1998. ....	137
Figura IV.60 – Resultados da medição do fluxo de seiva em árvores individuais (método de <i>Granier</i> ); exemplo para o dia do ano 197 em 1998; os números referem a identificação das árvores. ....	138
Figura IV.61 – (a) Informação qualitativa relativa à transpiração medida pelo método de <i>Granier</i> durante o 2º ciclo de <i>stress</i> hídrico realizado em 1998 (não normalizada, vd. explicação de normalização em IV.6.4), (b) balanço da radiação, (c) défice da pressão de vapor do ar; as setas indicam a ocorrência de rega na parcela submetida a <i>stress</i> hídrico. ....	139
Figura IV.62 – Transpiração medida pelo método de <i>Granier</i> ; os pontos assinalados com triângulos (a partir do dia 261) indicam dias em que não foi possível utilizar uma correcção para o efeito dos gradientes naturais de temperatura; 1998. Analisar apenas evolução qualitativa (vd. IV.5). ....	140
Figura IV.63 – Transpiração medida pelo método de <i>Granier</i> ; os pontos assinalados com triângulos (a partir do dia 261) indicam dias em que não foi possível utilizar uma correcção para o efeito dos gradientes naturais de temperatura; 1999. Analisar apenas evolução qualitativa (vd. IV.5). ....	140
Figura IV.64 – Relação entre a transpiração obtida pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ) e a transpiração estimada pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}-E_s$ ); $ET_{ec} - E_s = 1/(0.10 + 1.71e^{-T_{bc}})$ ( $r^2 = 0.88$ ). ....	141
Figura IV.65 – Medição da $ET_{ec}$ e da $T_{bc}$ ao longo do dia para os dias do ano 189 a 197, em 1998. ....	142
Figura IV.66 – Medição da transpiração ao longo do dia pelo método de <i>Granier</i> ( $T_G$ ) e pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ), para os dias do ano 189 a 197, em 1998. ....	143
Figura IV.67 – Relação entre a transpiração obtida pelo método de <i>Granier</i> ( $T_G$ ) corrigida utilizando o perfil radial de distribuição e a transpiração obtida pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ); $T_{bc} = 1/(-3.08 + 5.20 e^{-T_G})$ ( $r^2 = 0.95$ ). ....	144
Figura IV.68 – Evolução da transpiração obtida pelo método de <i>Granier</i> - $T_G$ (cálculo a partir do conhecimento do perfil radial) e $T_{G_x}$ (cálculo com a área de xilema activo determinada pela utilização de corantes) - e pelo método do balanço de calor - $T_{bc}$ , 1998. ....	144
Figura IV.69 – Transpiração relativa normalizada calculada pelo método do balanço de calor e pelo método de <i>Granier</i> ; a linha tracejada indica os dias em que todas as plantas amostradas se encontravam em conforto hídrico. ....	145
Figura IV.70 – Medição da $ET_{ec}$ e da $T_G$ ao longo do dia, para os dias do ano 189 a 197, em 1998. ....	146

Figura IV.71 – Relação entre a transpiração obtida pelo método de Granier ( $T_G$ ) e a transpiração estimada pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}$ e $ET_{ec}-E_s$ ) para os dias seleccionados de medições de $ET_{ec}$ em 1998.....	147
Figura IV.72 – Comparação entre a transpiração obtida pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ) e pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}-E_s$ ) com a transpiração obtida pelo método de Granier ( $T_G$ ).....	149
Figura IV.73 Relação entre $k$ (índice de fluxo) e a densidade de fluxo de água ( $u$ ) determinada por vários autores, em diversos meios. ....	150
Figura IV.74 – Equação de calibração experimental (Granier, 1985, 1987a e b) e fornecida por um modelo de diferenças finitas para diferentes condutividades térmicas da madeira (K1, K2, K3, K4 e K5, sendo K5 a mais elevada); (derivado de Thomsen e Ferreira, 2003). ....	150
Figura IV.75 – Potencial hídrico foliar medido de madrugada ao longo da estação, média e desvio-padrão; (a) 1998 (n=12); (b) 1999 (n=10); ☀ assinala os dias em que se realizaram cinéticas de potencial hídrico foliar. ....	152
Figura IV.76 – Variação de $\Psi_f$ ao longo do dia, em dias de céu limpo, em que todas as plantas estavam a ser regadas de acordo com o procedimento habitual no pomar (dias do ano 204, 211, 217 e 231) 1998; nos dias do ano 211, 217 e 231 o valor de $\Psi_b$ considerado foi obtido por interpolação de medições em dias vizinhos. ....	154
Figura IV.77 – Variação de $\Psi_f$ ao longo do dia, em dias de céu limpo, para plantas regadas e plantas submetidas a défice hídrico, 1998; dda = dia do ano (vd. Figura IV.75 (a) para identificação relativamente à ocorrência dos ciclos de <i>stress</i> ).....	155
Figura IV.78 – Variação de $\Psi_f$ ao longo do dia, em dias de céu limpo, em que todas as plantas estavam a ser regadas de acordo com o procedimento habitual no pomar (dias do ano 166, 183, 190 e 197), 1999. ....	155
Figura IV.79 – Variação de $\Psi_f$ ao longo do dia, em dias de céu limpo, para plantas regadas e plantas submetidas a défice hídrico, 1999; dda = dia do ano. ....	156
Figura IV.80 – Evolução do potencial hídrico foliar mínimo ( $\Psi_{min}$ ) e do potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ) ao longo do período de medições; (a) 1998, (b) 1999; as setas indicam o afastamento entre $\Psi_{min}$ de plantas regadas e $\Psi_{min}$ de plantas submetidas a défice hídrico, no fim dos ciclos de <i>stress</i> hídrico. ....	157
Figura IV.81 – Cinéticas diárias de condutância estomática em dias de céu limpo, excepto o dia 3 de Julho (dia do ano 184, em que se verificou alguma nebulosidade a meio do dia); média e desvio-padrão, 1998. ....	159
Figura IV.82 – Cinéticas diárias de condutância estomática em dias de céu limpo, excepto o dia 207 (em que se verificou alguma nebulosidade), 1999. ....	160
Figura IV.83 – Condutância estomática medida após o meio-dia solar, média e desvio-padrão; (a) 1998; (b) 1999.....	162
Figura IV.84 – Condutância estomática relativa (razão entre a condutância de plantas submetidas a <i>stress</i> hídrico e a condutância de plantas em conforto hídrico) ao longo dos ciclos de <i>stress</i> hídrico, 2º ciclo 1998 (a), 1º ciclo 1999 (b) e 2º ciclo 1999 (c). ....	163
Figura IV.85 – Cinética diária de $g_s$ (a) e de $\Psi_f$ (b) realizada no dia do ano 198 (17 de Julho), durante o 2º ciclo de <i>stress</i> hídrico realizado em 1998 (a última rega decorreu no dia 190 à noite); $\diamond$ - plantas regadas, $\blacksquare$ - plantas submetidas a 2 ciclos de <i>stress</i> , $\blacktriangle$ - plantas submetidas a 1 ciclo de <i>stress</i> ; (c) - balanço da radiação ( $R_n$ ), défice da pressão de vapor ( $VPD$ ) e velocidade do vento para o mesmo dia. ....	164
Figura IV.86 – Cinética diária de $g_s$ (a) e de $\Psi_f$ (b) realizada no dia do ano 207 (26 de Julho), durante o 2º ciclo de <i>stress</i> hídrico realizado em 1999 (a última rega decorreu no dia 201 à noite); $\diamond$ - plantas regadas, $\blacksquare$ - plantas submetidas a 2 ciclos de <i>stress</i> ; (c) - balanço da radiação ( $R_n$ ), défice da pressão de vapor ( $VPD$ ) e velocidade do vento para o mesmo dia. ....	165
Figura IV.87 – Cinética diária de $g_s$ (a) e de $\Psi_f$ (b) realizada no dia do ano 210 (29 de Julho), durante o 2º ciclo de <i>stress</i> hídrico realizado em 1999 (a última rega decorreu no dia 201 à noite); $\diamond$ - plantas regadas, $\blacksquare$ - plantas submetidas a 2 ciclos de <i>stress</i> ; (c) - balanço da radiação ( $R_n$ ), défice da pressão de vapor ( $VPD$ ) e velocidade do vento para o mesmo dia. ....	166
Figura IV.88 – Evolução ao longo do tempo da transpiração relativa, durante o aumento progressivo do défice hídrico; 2º ciclo de <i>stress</i> 1998; as setas assinalam o último dia em que regou, antes do início do ciclo de <i>stress</i> e o dia em que volta a regar. ....	167

Figura IV.89 – Evolução da transpiração relativa normalizada, obtida com o método do balanço de calor, com a $ET_o$ , durante o 2º ciclo de <i>stress</i> hídrico em 1998.....	168
Figura IV.90 – Relação entre a condutância estomática ( $g_s$ ) medida após o meio-dia solar e o potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ); (a) 1998, (b) 1999: ● = 1º ciclo de <i>stress</i> , ○ = 2º ciclo de <i>stress</i> .....	169
Figura IV.91 – Condutância estomática ( $g_s$ ) medida após o meio-dia solar e potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ); conjunto das observações efectuadas durante 3 ciclos de défice hídrico, nos dois anos de trabalho experimental.....	169
Figura IV.92 – Relação entre a condutância estomática relativa e o potencial hídrico foliar de base; (a) 1998, $\Delta$ = $g_s$ relativa de plantas submetidas a 1 ciclo de <i>stress</i> , $\blacktriangle$ = $g_s$ relativa de plantas submetidas a 2 ciclos de <i>stress</i> , (b) 1999 ● = 1º ciclo de <i>stress</i> , ○ = 2º ciclo de <i>stress</i> .....	169
Figura IV.93 – Relação entre a condutância estomática relativa normalizada e o potencial hídrico foliar de base, durante o aumento progressivo do défice hídrico, em 3 ciclos de <i>stress</i> hídrico; as equações das rectas de regressão representadas são as seguintes: 1998, 2º ciclo, $y = 123.9 x + 111.6$ ( $r^2 = 0.95$ ); 1999, 1º ciclo, $y = 107.1 x + 101.8$ ( $r^2 = 0.95$ ); 1999, 2º ciclo, $y = 109.9 x + 122.8$ ( $r^2 = 0.94$ ).....	170
Figura IV.94 – Relação entre a condutância estomática relativa e o potencial hídrico foliar de base, obtida para pessegueiro em diferentes locais; os pontos destacados (representados na figura por triângulos) dizem respeito a um pomar em condições edafo-climáticas e de coberto distintas.....	171
Figura IV.95 – Relação entre a transpiração relativa ( $TR$ ) e o potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ), utilizando uma função do tipo $TR = a e^{b\Psi_b}$ para (a) a variedade <i>Silver King</i> – Atalaia, Montijo, 1998, (b) comparação entre as diferentes curvas do tipo $TR = a e^{b\Psi_b}$ ajustadas para a variedade <i>Maybelle</i> – Águas de Moura, Setúbal (* Valancogne <i>et al.</i> , 1997; ** Ferreira <i>et al.</i> , 1997b).....	173
Figura IV.96 – As rectas a e b representam as funções definidas em Valancogne <i>et al.</i> (1997) ( $a = -0.62 \psi_{b\max} + 1.13$ e $b = 3.43 \psi_{b\max} + 2.16$ ), os pontos representam os coeficientes a e b obtidos experimentalmente no âmbito deste estudo.....	174
Figura IV.97 – Comparação entre $TR$ estimada a partir de $\Psi_{b\max}$ (de acordo com Valancogne <i>et al.</i> , 1997) e $TR$ obtida por análise de regressão dos dados recolhidos na Atalaia, Montijo (2º ciclo de <i>stress</i> hídrico, 1998). .....	174
Figura IV.98 – Utilização da equação IV.10 para representar a relação entre o potencial de base ( $\Psi_b$ ) e a transpiração relativa ( $TR$ ), utilizando $\Psi_{b\max}$ (Valancogne <i>et al.</i> , 1997), para a variedade <i>Silver King</i> – Atalaia, Montijo, 1998 e a variedade <i>Maybelle</i> – Águas de Moura, Setúbal (* Valancogne <i>et al.</i> , 1997; ** Ferreira <i>et al.</i> , 1997b).....	175
Figura IV.99 – Dedução da relação matemática entre a transpiração relativa ( $TR$ ) normalizada e a condutância estomática ( $g_s$ ) relativa e comparação com valores medidos ( $\Delta$ ); (a) relação entre $g_s$ relativa e $\Psi_b$ , (b) relação entre $TR$ e $\Psi_b$ , (c) equação resultante da conjugação matemática das equações estabelecidas em (a) e (b) (Atalaia, Montijo, 1998). .....	177
Figura IV.100 – Relação entre a transpiração relativa ( $TR$ ) e a água disponível no solo (% da reserva útil entre 0 e 1.1 m de profundidade) na parcela submetida a défice hídrico, durante o 2º ciclo de dessecção em 1998. .....	177
Figura V.1 – Equação de estimativa da transpiração em função da medição pelo método de <i>Granier</i> , em 1998: $ET_{ec} - E_s = 1/(-2.19 + 3.77 e^{-T_G})$ ( $R^2 = 0.89$ ).....	180
Figura V.2 - Equação de estimativa da transpiração em função da medição pelo método de <i>Granier</i> , em 1999: $ET_{ec} - E_s = 0.75/(-1.69 + 3.38 e^{-(T_G+0.08)})$ ( $R^2 = 0.95$ ). .....	180
Figura V.3 – Transpiração diária ( $ET_{ec}-E_s$ ) estimada a partir das medições de fluxo de seiva pelo método de <i>Granier</i> e obtida a partir da medição de $ET$ e estimativa de $E_s$ (equações V.1 e V.2), respectivamente para 1998 (a) e 1999 (b) .....	181
Figura V.4 – Estimativa da evapotranspiração a partir da medição de fluxo de seiva pelo método de <i>Granier</i> , pelos modelos propostos e evapotranspiração de referência, (a) 1998, (b) 1999.....	182
Figura V.5 – (a) Evolução de $K_s$ com a $ET$ acumulada ao longo do 2º ciclo de défice hídrico em 1998; (b) comparação da estimativa de $K_s$ no dispositivo experimental de Atalaia, Montijo, durante o 2º ciclo de	

déficit hídrico realizado em 1998, com a estimativa para pomar de pessegueiro na região de Águas de Moura, Setúbal (linha mais ténue) (Ferreira e Valancogne, 1997). .....	184
Figura V.6 – Coeficientes culturais obtidos a partir das medições de $ET$ com o método das flutuações instantâneas ( $K_{c\ ec}$ ). .....	186
Figura V.7 – Coeficientes culturais estimados a partir dos modelos empíricos de estimativa da transpiração e da evaporação do solo, desenvolvidos para o pomar em estudo (vd. V.1, equações V.1 e V.2, e IV.3, Figuras IV.33 e IV.34). .....	187
Figura V.8 – Figura V.8 – Coeficientes culturais: medição no pomar em estudo, utilizando o método das flutuações instantâneas ( $K_{c\ ec}$ ) e estimativa utilizando a metodologia FAO 56 (Allen <i>et al.</i> , 1998); as linhas ponteadas representam a média de $K_{c\ ec}$ ; (a) 1998; (b) 1999. ....	188
Figura V.9 – Comparação entre a evapotranspiração cultural estimada de acordo com a metodologia FAO 56 ( $ET_c$ ) e medida pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}$ ); ● 1998, + 1999. ....	188
Figura V.10 – Evaporação do solo medida ( $E_s$ ) e estimada de acordo com Allen <i>et al.</i> (1998) ( $E_i$ ). ....	189
Figura V.11 – Evapotranspiração da cultura medida ( $ET_{ec}$ ), estimada por Allen <i>et al.</i> (1998) ( $ET_c$ com $K_{c\ full} = 0.84$ para 1998 e 0.81 para 1999) e estimada pela mesma metodologia com um valor de $K_{cb\ full}$ ajustado à cultura ( $ET_c$ com $K_{c\ full} = 0.59$ ); (a) 1998, (b) 1999. ....	190
Figura V.12 – Recursos hídricos mobilizados para a rega e para a evapotranspiração do pomar. ....	192

Tabela III.1 – Principais variáveis meteorológicas para as estações climatológicas de Montijo/Base Aérea e Pegões, valores médios para o período de 1951-1980 (INMG, 1991); humidade relativa do ar (TU).....	50
Tabela III.2 – Análise granulométrica e textura do solo; o bolbo e a parte lateral formam o horizonte Ap..	59
Tabela III.3 – Caracterização do solo quanto ao pH, teor de carbono (C) e teor de matéria orgânica (M. O.), para os diferentes horizontes.....	59
Tabela III.4 – Sequências de medição da evapotranspiração com o método das flutuações instantâneas; as células sombreadas a preto representam os dados utilizados depois de se realizar o processo de selecção e validação; as células a cinzento, os restantes dados.	69
Tabela III.5 – Densidade aparente ( $D_{ap}$ ), teor de água ( $H_m$ – expresso em massa) e estimativas da capacidade térmica volúmica do solo ( $c_v$ ) associados aos pontos de colocação das placas de medição de fluxo de calor.	74
Tabela III.6 – Diâmetro do tronco ( $\emptyset$ ), altura acima do solo ao nível da sonda aquecida ( $h_a$ ) e orientação das sondas.....	76
Tabela III.7 – Sequências de medição da condutância estomática; as células sombreadas a preto representam dias em que se realizaram cinéticas diárias; as células a cinzento representam dias em que apenas se efectuou a medição ao princípio da tarde.	79
Tabela IV.1 – Selecção dos dados de acordo com a análise de pegada. As zonas sombreadas a cinzento indicam as direcções do vento predominantes em dias de dados seleccionados. FAN – fluxo acumulado normalizado.....	86
Tabela IV.2 – Evolução da razão $H/\lambda E$ ao longo do período de medições em 1998.	93
Tabela IV.3 – Evolução da razão $H/\lambda E$ ao longo do período de medições em 1999.	94
Tabela IV.4 – Erro de fecho aproximado da equação do balanço de energia da superfície, calculado com medições semi-horárias; NP: número de placas de fluxo de calor do dispositivo experimental.	108
Tabela IV.5 – Estimativa da área foliar em função das dimensões da folha ( $A_f = f(c^2)$ ) e do número de folhas ( $\Sigma A_f = f(nf)$ ); $A_f$ = área foliar, $c$ =comprimento, $l$ =largura, $nf$ = número de folhas; o tipo de função $A_f = f(c^2)$ em destaque, foi a escolhida, dada a facilidade de utilização e a possibilidade de comparação com resultados anteriores em pessegueiro (Ferreira <i>et al.</i> , 1997a e b).....	124
Tabela IV.6 – Correções a utilizar no cálculo do fluxo de seiva pelo método de <i>Granier</i> , para a determinação da densidade de fluxo de seiva equivalente, obtidas através do estudo do perfil radial de distribuição de fluxo de seiva.....	134
Tabela IV.7 – Comparação entre a transpiração obtida pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ) e por medição gravimétrica, ao longo do dia, em situação de subestimativa de $T_{bc}$ .	142
Tabela IV.8 – Comparação entre a transpiração diária obtida pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ) e por medição gravimétrica, em situação de subestimativa de $T_{bc}$ .	142
Tabela IV.9 – Comparação entre a transpiração diária obtida pelo método de <i>Granier</i> ( $T_G$ ) e pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}-E_s$ ), em situação de subestimativa de $T_G$ .	147
Tabela IV.10 – Comparação entre a transpiração obtida pelo método de <i>Granier</i> e por medição gravimétrica, ao longo do dia, em situação de subestimativa de $T_G$ .	148
Tabela IV.11 – Coeficientes $a$ e $b$ obtidos experimentalmente para a função $TR = a e^{b\Psi_b}$ e valores de $\Psi_{b\ max}$ para a situação correspondente - média de valores de $\Psi_b$ obtidos em condições de conforto hídrico.	173
Tabela V.1 – Necessidades úteis de água para rega em pessegueiro (fonte: <i>IDRHa</i> , 2002; URL: <a href="http://www.idrha.min-agricultura.pt">http://www.idrha.min-agricultura.pt</a> ).	191

«Depois, apenas uma linha escura  
e a nódoa branca de uma fonte amiga;  
a fazer-me sedento, de a ouvir,  
a água, num murmúrio de cantiga,  
ajuda a serra a dormir».

*Sebastião da Gama, 1945*

## I – INTRODUÇÃO

A água assume uma importância fundamental no desenvolvimento e sustentabilidade a uma escala global. Rego (1987) resumiu numa pequena frase a imprescindibilidade que lhe reconhecemos: “A água é, entre todos os recursos naturais, o mais importante para a existência e bem-estar da humanidade e mesmo essencial a qualquer forma de vida.”

A água é um recurso limitado e a quantidade de água disponível por pessoa e por ano tem vindo a diminuir, tendendo a tornar-se um recurso cada vez mais escasso. Segundo Winpenny (2002), as causas para a escassez da água podem ser de origem natural ou humana, ou resultar de uma associação entre ambas; as mais frequentes relacionam-se com alterações climáticas que tendem a tornar mais seco o clima de algumas regiões, com a modificação da paisagem e do uso da terra, por exemplo através da destruição de florestas em larga escala, com a contaminação das águas superficiais e subterrâneas e com o crescimento da população. Uma causa frequentemente considerada fundamental para o aumento da escassez da água reside contudo no crescimento constante da população e no conseqüente aumento da procura de alimentos que, por sua vez, tem levado à expansão da agricultura regada. Cerca de 40% dos alimentos disponíveis são produzidos recorrendo à rega, representando a área regada cerca de 18% da área agricultada total (Postel, 2001).

Na realização da rega, a actividade agrícola consome a maior parte dos recursos hídricos disponíveis a nível mundial. Em Portugal, de acordo com o *Plano Nacional para o Uso Eficiente da Água* (Instituto da Água, 2001), a agricultura é responsável pela utilização de um volume de água correspondente a 87% do total, sendo o consumidor mais importante face às utilizações registadas para os abastecimentos urbano e industrial. Face aos outros sectores, o sector agrícola apresenta porém a vantagem de devolver à atmosfera, pelo processo de evaporação, grande parte da água utilizada, sem a carga poluente patente nos outros usos. No que diz respeito à eficiência de utilização, o sector agrícola regista também uma baixa eficiência.

A melhoria da produtividade da água no sector agrícola pode ser conseguida através do aumento da eficiência e da precisão na programação da rega, do uso de água reciclada ou da introdução de variedades de plantas com menores necessidades hídricas (vd., por exemplo, Postel, 2001). Melhorar a precisão da rega implica a aproximação das estimativas das necessidades hídricas das plantas às suas necessidades reais e o conhecimento dos consumos vai permitir uma distribuição de recursos mais racional.

A sobrestimativa das necessidades de rega conduz a um desperdício da água disponível, com um aumento dos custos de produção e com indesejáveis conseqüências ao

nível do ambiente e da gestão dos recursos naturais. Em algumas regiões e contextos, a exploração dos recursos hídricos do subsolo, para uma cultura regada, tem como consequência uma redução da água disponível para a vegetação circundante, o que poderá ter impactos negativos no ambiente. Quanto menor a quantidade de água utilizada, maior será a possibilidade de prevenir estes impactos. Existe também a necessidade de restringir a lixiviação do solo, associada à perda de nutrientes e a um risco potencial de poluição, quando ocorre no seio de sistemas intensivos de produção, que recorrem a elevadas incorporações de fertilizantes. Nos últimos vinte anos, tem-se verificado um crescimento regular do teor de nitratos das águas superficiais e subterrâneas, em numerosos países desenvolvidos. Diminuir a quantidade de água utilizada pela rega contribui para minorar estes problemas, sobretudo se se utilizarem sistemas de rega localizada, evitando o humedecimento generalizado do solo. Mais recentemente, têm surgido as contaminações com produtos fitossanitários, essencialmente herbicidas, provenientes na sua maioria de práticas agrícolas e que se encontram frequentemente relacionadas com a intensificação cultural permitida pela rega (Delacourt, 1998; Cerejeira *et al.*, 2003). O uso excessivo das águas subterrâneas pode ainda levar à intrusão de água salina na toalha freática e à consequente salinização do solo.

Face a estas preocupações, as formas de minimizar o consumo de água assumem cada vez maior importância. No nosso país, existe um vasto conjunto de medidas propostas, para que seja possível melhorar a eficiência de utilização da água na agricultura, nos próximos dez anos, de 58 para 66% (Instituto da Água, 2001). Neste contexto, é salientada a importância da adequação dos volumes de rega às necessidades hídricas das culturas, adequação essa que está implicitamente relacionada com o conhecimento da evapotranspiração das culturas. A evapotranspiração alia a evaporação, que consiste na passagem de vapor de água de um solo húmido para a atmosfera e a transpiração, que se traduz na libertação de vapor de água por parte das plantas, também para a atmosfera. O Instituto da Água considera que a disponibilidade de informação sobre a evapotranspiração das culturas permitiria poupar, em média, 20% da água consumida pela rega, no nosso país.

A oportunidade e o volume da rega são muito frequentemente decididos nas explorações agrícolas com base numa análise subjectiva, assente num processo de tentativa, erro e correcção. Todavia, toda a problemática relacionada com a escassez da água não se coaduna com esta situação, oferecendo o procedimento empírico de determinação das necessidades de rega uma margem para melhoria.

Existe então um leque alargado de razões que salientam a necessidade de melhorar as estimativas das necessidades hídricas das plantas e a possibilidade de satisfazer essa necessidade mediante uma maior racionalidade do uso. Neste contexto, e tendo em vista que o custo da água tenderá a aumentar a médio prazo, interessa encontrar soluções que permitam aos agricultores otimizar a sua utilização.

Na programação da rega tem sido frequentemente utilizada a estimativa da evapotranspiração, calculada a partir dos dados climáticos da região e de uma cultura de referência, de características conhecidas. A evapotranspiração assim estimada é então

afectada por um coeficiente relativo à cultura em questão, o coeficiente cultural, obtendo-se a evapotranspiração da cultura. Esta metodologia tem demonstrado resultados relativamente bons em muitas situações, sobretudo se se tratar de cobertos baixos e uniformes. No caso de culturas com um certo desenvolvimento acima do nível do solo e anisotrópicas, como é o caso dos cobertos esparsos lenhosos (por exemplo, vinhas e pomares), verifica-se por vezes desajustamento nas estimativas.

No entanto, se a estimativa da evapotranspiração pode apresentar algumas dificuldades, a medição directa também nem sempre constitui uma alternativa simples. Os métodos de medição da evapotranspiração têm tido uma vulgarização restrita, recorrendo frequentemente a sensores caros e que requerem conhecimentos científicos aprofundados por parte dos utilizadores. Uma outra abordagem consiste em medir separadamente a transpiração e a evaporação do solo. Contudo, a passagem das medições obtidas à escala da planta (ou mesmo pontualmente) para a escala da população ou para diferentes períodos de tempo, implica uma análise cuidadosa, para evitar erros nos resultados globais, que poderão ser importantes.

Quantificar o consumo de água de forma mais exacta significa melhorar as metodologias existentes e procurar novas metodologias, que permitam avaliações mais precisas. A aplicabilidade das metodologias é também um aspecto importante, aliado ao seu grau de potencial vulgarização. As soluções mais lógicas a seguir, para minimizar o consumo de água e realizar uma programação da rega mais ajustada, parecem ser melhorar o estado do conhecimento sobre a evapotranspiração das culturas, através da medição directa (que se desejaria auxiliada por uma crescente simplificação dos métodos e técnicas de medição) e, simultaneamente, tornar mais rigorosos os métodos de estimativa, necessários a uma utilização mais generalizada ao nível das regiões e das explorações agrícolas. Determinar com maior exactidão a oportunidade da rega poderá também passar pelo desenvolvimento de novos indicadores de défice hídrico ou pela optimização e sistematização dos conhecimentos sobre os existentes actualmente. Além de um conhecimento mais preciso da evapotranspiração das culturas, é ainda importante conhecer o funcionamento hídrico dos ecossistemas, onde se encontram inseridas as áreas agricultadas.

O presente trabalho aborda esta problemática no caso concreto dos pomares. Mediu-se e estimou-se a evapotranspiração de um pomar de pessegueiros, tendo em vista o desenvolvimento de modelos simples de programação da rega, que permitissem saber, com um maior rigor, em relação aos critérios até então utilizados, quando e quanto regar, as questões fundamentais de todo o processo.

Os objectivos que pautaram este estudo são assim encabeçados pela quantificação do consumo de água do pomar e pela monitorização do comportamento da cultura do pessegueiro em função das disponibilidades hídricas, nomeadamente em situações de défice hídrico, tendo em vista a programação optimizada da rega e uma melhor gestão da água. A compreensão do funcionamento hídrico de um pomar está estreitamente associada ao

anisotropismo deste tipo de coberto, obrigando a um especial cuidado na selecção de metodologias e de abordagens. Procurou-se assim, contribuir também, para o estudo da adaptabilidade das técnicas utilizadas.

O trabalho desenvolvido assenta na medição directa e na estimativa da evapotranspiração, ou dos seus componentes (transpiração das plantas e evaporação directa do solo). A medição directa da evapotranspiração foi efectuada recorrendo a um método micrometeorológico (método das flutuações instantâneas) durante períodos curtos, ao longo de duas épocas de rega. A transpiração foi medida recorrendo a sensores de fluxo de seiva automatizáveis, durante períodos prolongados, para as mesmas épocas, enquanto que a evaporação do solo foi quantificada recorrendo a microlisímetros. Pretendeu-se aliar a precisão do método das flutuações instantâneas à facilidade de utilização e possibilidade de recolha de informação de forma contínua dos sensores de fluxo de seiva, relacionando os resultados de ambos, para a obtenção de modelos simples que permitissem caracterizar o consumo hídrico da cultura durante uma época de rega. São também objecto de estudo alguns indicadores de défice hídrico (ou de *stress* hídrico, utilizando uma designação da terminologia anglo-saxónica muito vulgarizada), cujos valores críticos poderão ser uma ferramenta útil na programação da rega.

O trabalho experimental iniciou-se no Verão de 1998, tendo prosseguido durante o Verão do ano seguinte com o objectivo de reforçar o conjunto de informação obtida, nomeadamente a relativa à transpiração e à evapotranspiração e sobretudo a respeitante à evaporação do solo. Em 2001, foi ainda realizado algum trabalho experimental, apenas para estudo de aspectos particulares das medições de fluxo de seiva.

A especificidade do estudo aqui apresentado reside: 1) na quantificação da evapotranspiração para a época de rega, a partir de medições contínuas automatizáveis do fluxo de seiva numa espécie lenhosa, utilizando como referência medições da evapotranspiração em períodos restritos, 2) na análise de indicadores de *stress* hídrico e 3) numa proposta de alteração do método de estimativa da evapotranspiração cultural para as condições encontradas. Com carácter mais secundário, mas também de forma inovadora, foi utilizado um processo de cálculo para determinação do fluxo de seiva que recorre ao perfil radial de distribuição, comparados diferentes métodos para a determinação do referido perfil e realizado um estudo de comportamento de diversos corantes utilizados para a determinação da área de xilema condutor.

Este trabalho foi dividido em seis partes, ou capítulos. Um primeiro, o presente capítulo, consiste numa introdução geral. Num segundo, é feito um enquadramento do tema, enquanto caso particular do estudo da evapotranspiração, dado ser dedicado a um coberto descontínuo. O terceiro capítulo apresenta as características do sistema estudado (planta – clima - solo) e a descrição do dispositivo experimental realizado, bem como dos métodos usados. No quarto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos e no quinto capítulo analisa-se a aplicação desses resultados. No sexto capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho.

## II – A EVAPOTRANSPIRAÇÃO E A REGA EM COBERTOS DESCONTÍNUOS

O revestimento vegetal da superfície terrestre apresenta, em muitas situações, um aspecto uniforme e contínuo. Tal é o caso de variadas culturas agrícolas, nomeadamente os cereais, as culturas hortícolas ou as pastagens, quando dispostos de forma a cobrir totalmente o solo. Outras situações existem, no entanto, em que a disposição espacial das plantas leva à existência de uma cobertura do solo incompleta ou heterogénea. Esta disposição consiste na existência de descontinuidades entre a massa vegetal lenhosa e o solo ou a vegetação mais rasteira, dando origem aos cobertos descontínuos. Os cobertos descontínuos representam uma parte importante das culturas agrícolas (por exemplo, pomares e vinhas) e florestais (por exemplo, os montados), ocorrendo ainda na forma de vegetação natural ou mesmo em paisagens intervencionadas, como os jardins ou a vegetação urbana. Este tipo de cobertos possui características particulares quanto à utilização dos recursos hídricos. A sua estrutura descontínua origina zonas de utilização diferenciada da água, consoante o solo se encontre coberto pelas plantas, nu ou revestido por vegetação herbácea. Por outro lado, estas plantas, geralmente lenhosas, têm uma maior dimensão que a generalidade das culturas agrícolas. Destas características resulta um coberto com uma superfície rugosa, ou seja, tal como definido por Rosenberg *et al.* (1983), uma superfície não homogénea, que apresenta protuberâncias.

A perda de água de um coberto para a atmosfera, ou evapotranspiração, tem duas componentes: a transpiração das plantas e a evaporação directa de água do solo. A contribuição da evaporação do solo para a evapotranspiração aumenta, de uma maneira geral, à medida que diminui a cobertura do solo pelas plantas. Assim, nos cobertos descontínuos, as duas componentes da evapotranspiração podem assumir um papel importante.

A transpiração das plantas é regulada, entre outros factores, pelo grau de abertura estomática (Monteith, 1965, 1985; vd. II.5.1). A condutância estomática (ou o seu inverso, a resistência estomática,  $r_s$ ) é muito variável e está sob a acção da planta, assumindo, no caso dos cobertos descontínuos, grande relevância no controlo da transpiração. O comportamento dos estomas é, genericamente, regulado pelos seguintes factores: a temperatura e a humidade do ar, a radiação, a concentração atmosférica de dióxido de carbono e o estado hídrico da planta.

A condutância estomática global do coberto, obtida a partir da condutância estomática média das folhas individuais ( $\bar{g}_s$ ) e do índice de área foliar ( $LAI$ <sup>1</sup>), é designada por condutância estomática do coberto,  $g_c$ , e pode ser determinada experimentalmente por (Katerji, 1982; Jones, 1992):

$$g_c = \bar{g}_s LAI \quad (II. 1)$$

---

<sup>1</sup> Área foliar por unidade de superfície total de solo.

No processo de transferência de vapor de água entre a planta e o solo intervêm também a resistência correspondente à difusão turbulenta até um determinado nível na atmosfera que, em conjunto com a resistência da camada limite das folhas, forma a resistência aerodinâmica ( $r_a$ ).

Para a generalidade das plantas, a transpiração, além de ser regulada pelo controlo estomático, é ainda condicionada pela energia disponível, pelo gradiente de pressão de vapor do ar entre a atmosfera e o copado e pelo vento. Para os cobertos lenhosos, sobretudo se esparsos, as condições microclimáticas vigentes no interior do copado decorrentes da complexidade estrutural não são, no entanto, tão determinantes para a transpiração como a resistência estomática (Ferreira, 1996a). As plantas lenhosas podem apresentar uma resistência estomática relativamente alta, que assume então um papel importante no controlo das perdas de vapor de água por transpiração. Comparando o seu comportamento com o de plantas não lenhosas, é possível constatar que a razão entre  $r_c$  e  $r_a$  ( $r_c/r_a$ ) quando determinada por exemplo em florestas, assume frequentemente o valor 50, enquanto que para muitas culturas agrícolas de reduzida extensão vertical, se aproxima frequentemente de 1 (Monteith e Unsworth, 1990). As diferenças quanto ao comportamento estomático entre plantas de reduzida extensão vertical e plantas de porte elevado foram analisadas por McNaughton e Jarvis (1983), Jarvis (1985) e Jarvis e McNaughton (1986) mediante a utilização de um coeficiente a que chamaram coeficiente de desacoplamento ( $\Omega$ ), definido do seguinte modo:

$$\Omega = [1 + (r_c / r_a)\gamma / (\Delta + \gamma)]^{-1} \quad (\text{II. 2})$$

em que  $\gamma$  representa a “constante” psicrométrica e  $\Delta$  o declive da curva da pressão de vapor de saturação.  $\Omega$  varia entre 0 e 1, apresentando valores mais elevados, por exemplo, para uma pastagem do que para uma floresta. Numa situação em que  $r_a$  tende a ser elevada, como é o caso de cobertos pouco rugosos como as pastagens,  $\Omega$  é elevado, ou seja, o grau de ligação do coberto às condições atmosféricas é reduzido, exercendo os estomas um controlo menos evidente da transpiração. Se, pelo contrário,  $r_a$  for baixa, como se verifica em cobertos rugosos de elevada extensão vertical, como algumas florestas,  $\Omega$  tem um valor reduzido, existe um grau de ligação mais importante e o controlo estomático assume maior relevância no controlo da transpiração.

O processo de evaporação directa do solo, a outra componente da evapotranspiração, pode ser dividido em três fases distintas (Philip, 1957; Ritchie, 1972; Ritchie e Johnson, 1990; Itier e Brunet, 1996). A primeira fase decorre enquanto a superfície do solo se encontra humedecida, sendo a taxa de evaporação limitada apenas pela quantidade de energia disponível. Numa segunda fase, a taxa de evaporação é limitada pelas características hidráulicas do solo e decorre até que as forças de adsorção nas interfaces solo-água exerçam controlo sobre a taxa de evaporação (Rosenberg *et al.*, 1983). Segue-se a terceira fase, em que apenas uma pequena parte da energia recebida à superfície do solo, cerca de 5%, é utilizada

no processo evaporativo (Massei e Carey, 1978). Como abordado em II.4.2.4, a evaporação do solo pode representar uma fracção significativa da evapotranspiração, nomeadamente nos cobertos descontínuos, em que existe uma área apreciável de solo exposta à radiação.

O conhecimento do balanço de energia do coberto pode ser uma informação útil para a compreensão destes processos. O balanço de energia de uma superfície agrícola coberta por vegetação pode ser descrito, de forma simplificada, pela equação:

$$R_n - G = H + \lambda E \quad (\text{II. 3})$$

em que  $R_n$  representa o balanço da radiação,  $G$  o fluxo de calor sensível para o solo e  $H$  e  $\lambda E$ , os fluxos de calor sensível e calor latente (ou seja, a evapotranspiração), respectivamente, libertados para a atmosfera pela superfície (Tanner, 1960; Sharma, 1985; Monteith e Unsworth, 1990; Jones, 1992; Oke, 1990). Nesta equação só se consideram fluxos verticais, não se considerando os horizontais que ocorrem por advecção. Desta forma, esta equação só pode ser aplicada a superfícies extensas de vegetação homogénea. Outros factores, como a energia acumulada ou libertada pela planta e a energia usada na actividade metabólica, representam, segundo por exemplo Allen *et al.* (1998), uma pequena fracção da energia disponível e podem considerar-se desprezáveis; a energia acumulada poderá contudo ser significativa em plantas que possuam um importante volume de biomassa, a que correspondem geralmente cobertos com maior desenvolvimento vertical, como é o caso das florestas (Arya, 1988; Jones, 1992; Allen *et al.*, 1996).

O balanço de energia de uma superfície é uma forma de caracterizar essa superfície, permitindo avaliar o modo como a energia resultante do balanço da radiação, é repartida nos fluxos  $\lambda E$ ,  $H$  e  $G$ . Na secção II.3 é abordado este assunto, apresentando-se alguns aspectos mais relevantes para o caso de cobertos rugosos.

Nos cobertos de porte elevado, o calor sensível e o vapor de água têm origens distintas: o copado propriamente dito e o sobcoberto ou o solo. Sendo necessário considerar os fluxos provenientes destas origens distintas, é também importante considerar a interacção entre fluxos. Neste contexto, o calor sensível proveniente do solo seco por baixo do copado pode, por exemplo, incrementar a transpiração do mesmo, dado o aumento de temperatura que induz (vd. Daamen e McNaughton, 2000) ou induzir fecho estomático pela redução relativa de humidade atmosférica (Ferreira e Katerji, 1992).

Em pomares com apreciável afastamento entre linhas, em que existem áreas significativas de solo exposto, torna-se relevante avaliar a contribuição relativa da evaporação do solo para a evapotranspiração. Se a baixa densidade de plantação for combinada com rega localizada, correntemente utilizada em muitos pomares, a importância da evaporação do solo vai ser, no entanto, mais limitada, mesmo se a rega for de alta frequência. Shuttleworth e Wallace (1985) salientam as diferenças entre este tipo de estrutura organizada e a vegetação esparsa de distribuição aleatória. Numa cultura em linhas, além da repartição de energia entre o solo e a planta é ainda necessário considerar a energia repartida entre o solo debaixo da

vegetação e o solo entre linhas. Acresce o facto de ser necessário ter em conta a estrutura tridimensional das plantas, por exemplo no que diz respeito à intercepção da radiação solar, condicionada pela orientação das linhas. O objecto de análise deste trabalho, um pomar organizado em linhas, com baixa densidade de plantação e rega localizada, é assim um coberto de características muito particulares, no âmbito do estudo da evapotranspiração.

A maioria dos métodos de medição da evapotranspiração, que se utilizam em cobertos de reduzida extensão vertical, não são facilmente aplicáveis em cobertos de porte arbóreo (ver II.4). Como consequência, não existe muita informação sobre a evapotranspiração deste tipo de cobertos, disponível para a construção e validação de modelos. No entanto, em Portugal, cerca de 2/3 da superfície produtiva é ocupada por cobertos lenhosos (Raposo, 1994). Uma revisão de Ferreira (1996a) aborda as particularidades deste tipo de cobertos, na região mediterrânica, no contexto do estudo da evapotranspiração e do comportamento face ao défice hídrico, tendo em vista a gestão da água. Para os cobertos lenhosos de cariz agrícola, onde se inserem os pomares, além da necessidade de conhecer a evapotranspiração como informação relevante para a caracterização do uso da água, acresce o facto de serem frequentemente sistemas onde se incorpora água artificialmente, pelo processo da rega. O conhecimento da evapotranspiração vai permitir ajustar a quantidade de água a fornecer e idealmente limitar o consumo a níveis estritamente necessários.

## II.1. Necessidades hídricas e programação da rega

A produtividade máxima de uma cultura é comumente associada à manutenção de condições de conforto hídrico, em que a evapotranspiração é também máxima. Para que esta situação aconteça é necessário muitas vezes regar a cultura, programando a rega. Assim, a programação da rega é, regra geral, efectuada tendo como ponto de partida uma estimativa da evapotranspiração ( $ET$ ) máxima da cultura.

Frequentemente, esta estimativa é realizada recorrendo ao uso de coeficientes culturais ( $K_c$ ) e ao cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), designando-se neste caso por evapotranspiração cultural ( $ET_c = ET_o K_c$ ). A  $ET_o$  é a evapotranspiração de uma superfície de referência, frequentemente a relva, e pretende reflectir apenas o efeito das condições climáticas, nas necessidades hídricas das plantas. Os coeficientes culturais são coeficientes obtidos experimentalmente que representam o efeito das características da cultura, nas necessidades hídricas globais. Este procedimento clássico foi abordado numa perspectiva de divulgação por Doorenbos e Pruitt (1977) e mais recentemente por Allen *et al.* (1998). Esta abordagem apresenta algumas dificuldades de aplicação, dado que os coeficientes culturais podem não ser generalizáveis a todas as situações, dependendo das práticas culturais (Ritchie e Johnson, 1990). Os factores responsáveis pelas maiores variações dos  $K_c$  prendem-se com a frequência de humedecimento do solo (Jagtap e Jones, 1989), com o grau de ligação entre o coberto e a atmosfera, decorrentes da altura e rugosidade do coberto (Jarvis e McNaughton,

1986) ou com a densidade de plantação (Ritchie e Johnson, 1990). Uma discussão mais detalhada desta questão é feita no ponto II.5.1.

A estimativa da evapotranspiração real pode realizar-se recorrendo a equações aplicáveis em diversas escalas temporais e variando no grau de complexidade e precisão (revisões sobre este assunto podem ser consultadas em Burman, 1980 e Rosenberg *et al.*, 1983). Destas, destaca-se a equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965, 1985). Esta equação tem sido também usada para estimar a  $ET_o$ , desde que usados os parâmetros de uma relva bem regada, tal como referido em II.5.1. Ferreira-Gama (1987) apresenta resultados obtidos em Portugal, para a comparação de diversas equações para o cálculo da  $ET_o$  e para a aplicação dessas equações, com determinados coeficientes culturais, na cultura do tomate.

Como se tem verificado em diversas situações (Ferreira-Gama, 1987; Ferreira, *et al.* 1989; Itier *et al.*, 1990; Ferreira e Valancogne, 1997) a  $ET$  pode ser inferior à  $ET$  máxima da cultura em grande parte do tempo, mesmo em culturas regadas em que se pretende a produtividade máxima da cultura. Assim, é necessário possuir ferramentas que possibilitem a avaliação do défice hídrico a que a cultura está sujeita, o que pode ser conseguido mediante a utilização de um coeficiente (coeficiente de *stress* –  $K_s$ ) que quantifica a redução imposta à  $ET$ . O valor de  $K_s$  corresponde à razão entre a  $ET$  real e a  $ET$  máxima ( $ET_m$ ) da cultura ( $K_s = ET/ET_m$ ), sendo então a  $ET$  estimada por  $ET = ET_o \cdot K_c \cdot K_s$ . Denmead e Shaw (1962) relacionaram  $K_s$  com a disponibilidade hídrica no solo, tendo estabelecido curvas para diferentes condições. O cálculo de  $K_s$  pode ser efectuado em função do défice hídrico no solo (Itier *et al.*, 1990) ou da resistência estomática ou de outra variável indicadora do défice hídrico avaliado nas plantas (Ferreira, 1996b). Quando se trata de culturas rugosas com um valor de  $\Omega$  reduzido, e se a radiação não constituir um factor limitante, então a  $ET$  vai ser restringida pela condutância estomática, assumindo ainda maior relevância a necessidade de utilizar  $K_s$  (Ferreira, 1996b). Em V.2 é abordado o procedimento de obtenção de  $K_s$ .

O défice hídrico pode ser também deliberadamente induzido. É o caso de uma técnica habitualmente designada por *RDI* (*Regulated Deficit Irrigation*). Esta técnica teve aparentemente a sua origem na Austrália e foi inicialmente concebida para controlar o vigor vegetativo em pomares de elevada densidade, durante a fase de crescimento vegetativo rápido, mediante a aplicação de uma rega deficitária. Chalmers *et al.* (1981) aplicaram o método a pessegueiros durante a fase de aumento do peso seco dos frutos, tendo observado um acréscimo significativo da produção e do crescimento dos frutos, desde que a redução da rega se processasse enquanto existisse excessivo vigor vegetativo, passível de ser suprimido a favor do crescimento dos frutos. Mitchell e Chalmers (1982) utilizaram também uma rega deficitária durante a fase de rápido crescimento vegetativo, verificando que era possível obter frutos de tamanho semelhante e produções idênticas aos obtidos sem restrições da rega, a par do controlo do crescimento vegetativo e de uma apreciável economia da água de rega (cerca de 30%, na situação analisada).

Posteriormente, a *RDI* tem sido também aplicada noutras fases do ciclo vegetativo, nomeadamente na fase após a colheita, em variedades precoces. Johnson *et al.* (1992)

observaram que, nesta fase, a redução da rega diminuiu as necessidades de poda e aumentou a densidade da floração de plantas de pessegueiro na estação seguinte. Girona *et al.* (1993), utilizando a *RDI* também após a colheita e, anteriormente, durante o desenvolvimento dos frutos, em variedades de maturação tardia, verificaram ser possível uma economia de água de cerca de 40%, com consequências pouco importantes no que dizia respeito à produção e ao tamanho dos frutos. Boland *et al.* (1993), face a esta relativa insensibilidade da produção à introdução da rega deficitária em pessegueiro, associaram os mecanismos de adaptação ao défice hídrico durante a prática da *RDI*, ao fecho estomático e à redução da área foliar.

Em pessegueiro, os resultados disponíveis sobre a utilização da *RDI* (discutidos ainda em Chalmers *et al.*, 1983; Boland *et al.*, 1993; Behboudian e Mills, 1997) indicam assim que a produção não é afectada de forma significativa por esta redução da rega, desde que aplicada no momento adequado e tendo em conta a precocidade relativa da variedade, existindo, no entanto, vantagens claras no que diz respeito a uma maior facilidade de gestão da cultura e a uma melhor eficiência de utilização dos recursos hídricos.

A programação da rega pode realizar-se usando como base o balanço hídrico do solo ou a evolução de alguns indicadores do estado hídrico, tanto do solo como da planta (vd. II.2), além da estimativa ou da medição da *ET* como referido anteriormente. A monitorização do estado hídrico do solo tem sido utilizada frequentemente mas os métodos baseados nas reacções fisiológicas das plantas, decorrentes do seu grau de hidratação, têm vindo a captar cada vez maior atenção. Na maioria destes métodos é necessária a medição de variáveis discretas (como por exemplo o potencial hídrico foliar) cuja interpretação carece de uma comparação com limiares críticos previamente estabelecidos. A necessidade de desencadear a rega é determinada quando se verifica uma aproximação a esses limiares, estando a detecção oportuna relacionada com a frequência de medição. Estas variáveis fisiológicas podem ser utilizadas como indicadores do défice hídrico, correspondendo a uma mudança de comportamento, observada à medida que se acentua a indisponibilidade de água no solo. Fornecem uma indicação sobre o momento em que se deverá fornecer água à planta sem, no entanto, contribuírem por si para a quantificação do volume a aplicar.

Alguns dos métodos de avaliação do défice hídrico das plantas não são fáceis de utilizar regularmente, dado serem exigentes quanto à intervenção do utilizador, necessitarem de amostragens frequentes ou serem de difícil interpretação. Para o pessegueiro, existe um conjunto de informação disponível sobre a adequabilidade de algumas variáveis fisiológicas para a programação da rega, obtidas por Ferreira *et al.* (1996) e que se aborda em II.2.

## II.2. Indicadores do estado hídrico do solo e da planta

A avaliação do estado hídrico pode ser feita realizando medições no solo ou na planta. Os indicadores do estado hídrico do solo referem-se, por exemplo, à determinação do teor de água ou do potencial hídrico no solo. Para a planta existem uma série de variáveis que podem

ser medidas. Dois dos indicadores mais frequentemente utilizados são o potencial hídrico foliar e a resistência estomática. Outros indicadores que apresentam algum interesse no contexto deste estudo, como a diferença de temperatura entre as folhas e o ar, ou entre dois níveis acima do coberto, a cavitação, a variação de diâmetro do tronco ou dos ramos e ainda a presença de ácido abscísico (*ABA*) no xilema, são referidos, de forma breve, nesta secção.

O teor de água do solo ou o potencial hídrico do solo são frequentemente utilizados na programação da rega. Uma revisão alargada sobre os métodos mais comuns é apresentada em Phene *et al.* (1990) e em Chanzy *et al.* (1997). A estes métodos é frequentemente apontada a desvantagem de não traduzirem de forma fiel o estado hídrico ao nível das raízes da planta, dado a secagem do solo não se processar de forma homogénea além de que, para plantas de grande desenvolvimento radicular, existe dificuldade no acesso a estas maiores profundidades (Ferreira, 1996a; Decroix e Puech, 1985). Os limiares críticos para o desencadeamento da rega, baseados na avaliação do estado hídrico do solo, variam com as características da cultura e do solo. Se a determinação desses limiares não for adequada para as condições da cultura, utilizando-se por exemplo um valor médio, este pode não ser suficientemente preciso. Consequentemente, a planta pode já estar em *stress* hídrico antes de ser atingido o limiar pré-determinado (Garnier e Berger, 1985; Itier *et al.*, 1996). Procurar localizar correctamente os sensores, em pontos representativos da zona das raízes, tem sido objecto de estudo (p. ex., Isbérie, 1985; Isbérie *et al.*, 1994).

A medição directa do estado hídrico na planta é realizada em muitas situações recorrendo à determinação do potencial hídrico foliar ( $\Psi_f$ ). O potencial hídrico foliar medido de madrugada, antes do nascer do sol, ou potencial de base ( $\Psi_b$ ) é considerado um indicador do estado hídrico do solo na zona radicular (Katerji, 1997) dado corresponder ao estado de hidratação da planta ao fim da noite. A medição neste momento do dia pressupõe que se estabeleceu um equilíbrio entre a água do solo e a água da planta, estando a planta no seu estado máximo de hidratação possível para as condições hídricas do solo consideradas. O humedecimento heterogéneo do solo ou a existência de raízes muito profundantes podem dificultar a avaliação do estado hídrico do solo, utilizando esta técnica (vd. parte final desta secção).

O potencial foliar mínimo ( $\Psi_{min}$ ) ocorre geralmente um pouco depois do meio-dia solar e indica o grau de desidratação máximo atingido pela planta nesse dia. Por vezes, o potencial mínimo é medido em folhas em que se impediu a transpiração durante algum tempo, com o objectivo de permitir que o potencial hídrico das folhas se equilibre com o potencial hídrico dos ramos ( $\Psi_{stem}$ ). Para este efeito, a folha ainda presa ao ramo é inserida num saco de plástico opaco, durante algum tempo antes da medição. Espera-se, desta forma, obter uma medição de  $\Psi_f$  que seja representativa de  $\Psi_{stem}$ . Segundo McCutchen e Shackel (1992),  $\Psi_{stem}$  é menos influenciado pelas condições ambientais e relaciona-se com o estado hídrico do solo de forma mais clara.

O potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ) parece ser uma medida mais sensível do estado hídrico das plantas do que  $\Psi_{min}$  (Jones, 1990). O  $\Psi_{min}$ , além de fortemente influenciado pelas condições ambientais, apresenta grandes variações associadas a pequenas variações de  $\Psi_b$ . Diferentes culturas podem também apresentar valores do  $\Psi_f$  muito diferentes, ainda que sujeitas a condições ambientais semelhantes (Hsiao, 1990). Algumas plantas tendem a reduzir as perdas de água durante o dia, mediante o fecho acentuado dos estomas, referenciando-se este comportamento como isohídrico. Outras, pelo contrário, não têm esta tendência, baixando o seu grau de hidratação e apresentando um comportamento anisohídrico. Existem ainda situações intermédias. Em pessegueiros regados, o comportamento de  $\Psi_f$  ao longo do dia foi observado por Olsson (1977) e Chalmers e Wilson (1978) que encontraram valores muito próximos de zero antes do nascer do sol ( $\Psi_b$ ) e que se tornavam progressivamente mais negativos até um valor mínimo cerca do meio-dia ou algum tempo depois. Durante a tarde registava-se uma recuperação do  $\Psi_f$ , voltando-se a atingir os valores observados de manhã cedo, quando ocorria o pôr-do-sol ou pouco depois. Este é o padrão habitual mas, segundo Chalmers *et al.* (1983), os  $\Psi_{min}$  observados nesta espécie são mais baixos do que em muitas culturas, o que indica tendência para um comportamento de tipo anisohídrico. Em trabalhos anteriores, o pessegueiro mostrou um comportamento intermédio entre o comportamento típico de uma espécie isohídrica e o de uma anisohídrica (Ferreira, 1996a). No entanto, para uma determinada espécie, o comportamento de uma variedade poderá não ser generalizável a outras variedades (Valancogne, 1995).

É também fundamental conhecer as características do sistema radicular para a interpretação clara do comportamento das árvores, no que diz respeito ao  $\Psi_f$ . As árvores com um sistema radicular mais superficial apresentam alterações no  $\Psi_f$  mais precocemente durante um ciclo de dessecação, do que árvores com um sistema radicular profundante (Garnier e Berger, 1985). A maior sensibilidade ao *stress* hídrico de plantas com um padrão de enraizamento mais superficial pode ser devida a um desenvolvimento mais rápido dos sinais que evidenciam o défice hídrico, ou ao aparecimento de um défice mais severo (ver discussão em Goldhamer *et al.*, 1999).

Em árvores, a medição de  $\Psi_f$  ao longo do dia apresenta dificuldades acrescidas, dado que a amostragem é mais difícil do que nas culturas herbáceas. Quando medido durante o dia,  $\Psi_f$  é influenciado por numerosos factores como a exposição das folhas, a altura e a posição da folha dentro da copa e idade da folha, entre outros factores. No entanto, o  $\Psi_f$  é uma forma prática de avaliar o estado hídrico das árvores e as necessidades de rega, utilizando-se para esse fim em muitas situações, como no caso da rega localizada (Ferreira e Goldhamer, 1990).

Diversos estudos têm sido realizados em pessegueiro para avaliar o interesse do  $\Psi_f$  medido durante o dia, como indicador de défice hídrico. Garnier e Berger (1985), com o objectivo de encontrar um indicador de *stress* hídrico suficientemente sensível para programar a rega, analisaram a evolução do  $\Psi_f$  ao longo do dia, durante um ciclo de dessecação (rega a 50% da *ET* real), concluindo que não se detectavam diferenças evidentes entre plantas regadas e não regadas. Contudo, o comportamento das plantas em *stress* hídrico diferenciava-se

claramente se o indicador utilizado fosse  $\Psi_{stem}$ . Existem diversos estudos (p. ex., McCutchan e Shackel, 1992; Shackel *et al.*, 1998; Shackel *et al.*, 2000a; Shackel *et al.*, 2000b) que utilizam  $\Psi_{stem}$  em plantas do mesmo género do pessegueiro (ameixeira e amendoeira) e em que o método revelou ser interessante para utilização na condução da rega. No entanto,  $\Psi_{stem}$  é influenciado pela variação que se verifica, de dia para dia, no  $VPD$  do ar, o que dificulta o estabelecimento de limiares críticos para este indicador (Marsal *et al.*, 2002).

Xiloyannis *et al.* (1980) encontraram efeitos ligeiros no  $\Psi_{min}$  de pessegueiros regados a 50% da  $ET$  real, quando comparados com pessegueiros regados a 100%, e efeitos severos apenas em árvores não regadas. Acevedo *et al.* (1973) não conseguiram observar nenhuma tendência clara no  $\Psi_f$  medido durante o dia, quando os pessegueiros foram submetidos a períodos de dessecação. No pessegueiro, este indicador parece assim poder assumir valores semelhantes para diferentes graus de abertura estomática (Garnier e Berger, 1985). Naor (1998), num estudo efectuado com nectarinas sujeitas a diversos regimes hídricos, verificou existir uma baixa correlação entre  $g_s$  e  $\Psi_f$  medidos ao longo do dia. Durante a manhã ocorriam valores baixos de  $\Psi_f$  para todos os regimes, com uma reduzida variação ao longo do dia. No entanto, num estudo conduzido em pessegueiro, Goldhamer *et al.* (1999) concluíram que  $g_s$  não se revelou um indicador tão sensível ao *stress* hídrico quanto os indicadores baseados na medição do estado hídrico da planta, embora  $\Psi_f$  apresentasse menor sensibilidade que o potencial hídrico dos ramos ( $\Psi_{stem}$ ). Concluíram também que os indicadores monitorizados de forma contínua (p. ex., a variação de diâmetro do tronco, referido adiante) se revelaram mais sensíveis ao *stress* hídrico que os utilizados em medições discretas (potencial hídrico da planta e  $g_s$ , nomeadamente).

Parece assim não poder ser generalizado o comportamento do potencial hídrico foliar, medido ao longo do dia, em pessegueiros sujeitos a défice hídrico, requerendo alguma cautela a sua utilização como indicador de *stress* hídrico para a programação da rega. Como referido anteriormente nesta secção, é frequentemente preferido o uso de  $\Psi_b$ , em detrimento de medições de  $\Psi_f$  realizadas durante o dia, se as plantas apresentarem um comportamento isohídrico.

Dada a importância da resistência estomática nos cobertos rugosos, em que a resistência aerodinâmica é mais reduzida, observa-se um forte condicionamento da  $ET$  pelo funcionamento estomático, na ausência de intercepção da precipitação. A medição da resistência estomática pode apresentar porém algumas dificuldades. A resposta dos estomas à variação dos factores ambientais pode, nomeadamente, ser difícil de avaliar em ensaios de campo, dada a presença de outros factores (por exemplo, rajadas de vento ou a passagem de nuvens) que podem perturbar o resultado que pretendemos observar (Burrows e Milthorpe, 1976). Por outro lado, a medição da resistência estomática, que é feita frequentemente recorrendo a porómetros de difusão, origina valores pontuais, difíceis de generalizar a todo o coberto (Pearcy *et al.*, 1991) sem uma amostragem suficientemente boa.

Em estudos realizados em pessegueiro (Chalmers *et al.*, 1983; Garnier e Berger, 1987) tem sido observada a ocorrência de valores máximos de condutância estomática durante a

manhã, a partir dos quais se verifica, habitualmente, um decréscimo gradual durante o resto do dia. Olsson (1977), comparando medições realizadas em pomar de pessegueiro, na Austrália, no 1º e 9º dias a seguir à rega, encontrou valores de  $g_s$  máximos diários de cerca de 0.4 e 0.3  $\text{cm s}^{-1}$ , respectivamente, para folhas de uma camada média da copa; verificou que existia uma diminuição de  $g_s$  com a crescente dessecação do solo, nas duas camadas superiores da copa, enquanto que na primeira se registava um ligeiro aumento. Observou também que, para cada momento considerado, os valores mais elevados de  $g_s$  se registavam na camada superior da copa.

Xiloyannis *et al.* (1980) mediram  $g_s$  próximo do meio-dia solar em pomar de pessegueiro, na Califórnia, com rega gota-a-gota, em que utilizaram três diferentes regimes de rega durante uma estação de crescimento (Junho a Outubro): 100% *ET* (139 l/árvore/dia), 50% *ET* e 0% *ET*. Estes autores observaram que, enquanto para os dois primeiros tratamentos se verificaram apenas diferenças ligeiras na  $g_s$ , para as árvores não regadas e a partir do meio de Julho, ocorreu uma diminuição de  $g_s$  muito rápida, atingindo o valor de 0.02  $\text{cm s}^{-1}$ . Esta diminuição aconteceu quando a depleção da água do solo, nos primeiros 90 cm, atingiu 80% do total.

O mecanismo de fecho dos estomas, apesar de estreitamente relacionado com o estado hídrico da planta, pode ser influenciado pela presença de substâncias químicas, das quais o ácido abscísico (*ABA*) é frequentemente referido. A forma de actuação do *ABA* não está completamente esclarecida, mas intervém claramente no funcionamento dos estomas, tornando mais célere a resposta à restrição hídrica (Davies *et al.*, 1986; Zhang *et al.*, 1987; Zhang e Davies, 1990; Correia, 1993) e desempenhando um papel importante na adaptação das plantas ao *stress* hídrico (Leung e Giraudaut, 1998). Em pessegueiro foi observada uma estreita relação entre a diminuição de  $g_s$  e o aumento da concentração de *ABA* no xilema (Correia *et al.*, 1997). Os mesmos autores concluíram que o *ABA* presente no xilema poderia ser responsável pelas diferenças no *stress* hídrico encontradas entre plantas, sujeitas a diferentes disponibilidades hídricas ao nível do pomar. A avaliação do défice hídrico mediante a quantificação do *ABA*, na perspectiva da programação da rega, não se afigura porém muito viável dada a natureza e o custo das medições necessárias (Ferreira, 1996a).

A diferença de temperatura entre as folhas e o ar é outro indicador do estado hídrico das plantas. Como resultado do fecho estomático é alterado o balanço energético do copado e a temperatura das folhas aumenta. Diversos autores (p. ex., Jackson *et al.*, 1977; Ehrlér *et al.*, 1978; Idso *et al.*, 1981) utilizaram a diferença de temperatura entre as folhas e o ar para desenvolver metodologias de detecção do *stress* hídrico. A temperatura do copado é geralmente medida com um termómetro de infravermelhos, sendo facilmente automatizável. A dificuldade do método reside no facto de a diferença de temperatura entre o copado e o ar poder ser influenciada por diversos factores, tais como a pressão de vapor do ar, a radiação e o vento, além do estado hídrico da planta, e de não ser muito sensível na detecção de um défice hídrico moderado (Hsiao, 1990). Utilizada em pessegueiro por Glenn *et al.* (1989) esta técnica mostrou ter potencial interesse para monitorizar o uso da água e para a programação da rega.

Estes autores encontraram, no entanto, uma relação entre a diferença de temperatura (entre as folhas e o ar) e o déficit da pressão de vapor (*VPD*), diferente da relação linear obtida para outras plantas (Idso, 1982); a relação que encontraram apresentava uma componente curvilínea para valores de *VPD* superiores a 2 kPa, que sugeriram ser originada pelo fecho estomático consequente e pela incapacidade do sistema radicular em absorver água a uma taxa idêntica à taxa de transpiração.

Um dos indicadores que é possível utilizar, tendo por base a diferença de temperatura entre o copado e o ar, relaciona a temperatura do coberto, em plantas sujeitas a déficit hídrico e em plantas regadas, com a temperatura e *VPD* do ar e é designado por *Crop Water Stress Index (CWSI)* (Idso *et al.*, 1981). Este indicador foi utilizado em pessegueiro por Garcia *et al.* (2000), no pomar sobre o qual incide este estudo, tendo sido considerado adequado para a detecção do *stress* hídrico, apontando os resultados um valor limiar de *CWSI* igual a 0.5, para o desencadear da rega.

A diferença de temperatura entre dois níveis acima do coberto tem também sido utilizada no mesmo âmbito, sem contudo os métodos encontrados se mostrarem adequados na perspectiva da programação da rega. Katerji *et al.* (1988) aplicaram esta técnica, bem como o *CWSI*, na cultura do tomate, tendo constatado a sua sensibilidade aos fenómenos de advecção. Para os cobertos lenhosos, dada a maior turbulência existente e, consequentemente, a maior instabilidade de temperaturas, há naturalmente um agravamento destas limitações (Ferreira, 1996a).

A cavitação é outro exemplo de um potencial indicador do estado hídrico das plantas. Quando a planta se encontra submetida a um déficit hídrico, a tensão da água no interior do xilema é elevada e pode ocorrer uma ruptura no fluxo, formando-se cavidades ocupadas por ar ou vapor que se expandem, ocupando progressivamente o interior dos vasos e bloqueando o transporte (Hsiao, 1990). Este processo, que se denomina por cavitação, provoca um som que pode ser captado, sendo a intensidade do fenómeno tanto maior quanto maior o déficit hídrico e, consequentemente, maior a tensão no xilema. A dificuldade em usar esta técnica reside no facto de poder ocorrer cavitação em vários tecidos em simultâneo, não apenas no xilema, o que torna difícil a detecção isolada dos sons provenientes deste tecido (Jones, 1992).

Um outro indicador de déficit hídrico com potencial interesse, para aplicação em cobertos lenhosos, consiste na avaliação da variação do diâmetro do tronco ou dos ramos. Desde que Splinter (1969) e Klepper *et al.* (1971) relacionaram a redução do diâmetro do tronco com o estado hídrico da planta, a monitorização desta variável tem sido usada como indicador de *stress* hídrico no caso de árvores de fruto, mediante a utilização de sensores micromorfométricos. O sistema *Pepista* (Huguet *et al.*, 1992b), que tem sido divulgado comercialmente, utiliza este tipo de sensores. Este sistema tem fornecido resultados interessantes, nomeadamente em pessegueiro (Huguet *et al.*, 1992a).

O diâmetro do tronco apresenta oscilações circadianas, atingindo um valor máximo imediatamente antes do pôr-do-sol e um mínimo durante a tarde. A diferença entre os

diâmetros máximo e mínimo, ou seja, a redução máxima diária do diâmetro, é designada por *MDS* (*maximum daily shrinkage*) (Améglio e Cruiziat, 1992; Huguet *et al.*, 1992a; Génard e Huguet, 1996; Cohen *et al.*, 1997). A informação recolhida pode ser tratada em termos relativos, utilizando a razão entre a *MDS* de árvores submetidas a *stress* hídrico e a *MDS* de plantas em conforto hídrico (*RDTs* – *relative daily trunk shrinkage*, Ferreira *et al.*, 1996).

Diversos estudos têm sido realizados em pessegueiro utilizando a variação de diâmetro do tronco como indicador de défice hídrico. Garnier e Berger (1986) recorreram a este método num pomar de pessegueiros em que, numa amostra de plantas, praticaram uma redução da rega, calculada como 50% da evapotranspiração máxima. Paralelamente, analisaram a evolução do potencial hídrico dos ramos ( $\Psi_{stem}$ ) ao longo do dia, tendo observado que uma diminuição, ao longo do dia, de 0.4 MPa do  $\Psi_{stem}$  em relação ao  $\Psi_b$  era suficiente para desencadear uma redução do diâmetro do tronco. No seu estudo, aqueles investigadores concluíram que a variação de diâmetro do tronco se apresentava como um indicador sensível preconizando, contudo, a necessidade de aprofundar os conhecimentos em torno desta questão. Huguet *et al.* (1992a), utilizando o método em pessegueiro e macieira, concluíram que o mesmo era fiável para acompanhar a evolução do estado hídrico da planta, sendo no entanto necessário aprofundar as investigações sobre a sua aplicação à programação da rega. O mesmo método foi também utilizado por Ferreira *et al.* (1996) em pessegueiro, em conjunto com outros indicadores, tendo estes autores analisado a variação de diâmetro do tronco associada à transpiração relativa<sup>2</sup> (*TR*) e, indirectamente, a outros indicadores de *stress* hídrico. Numa aplicação à programação da rega, também em pessegueiro, em que se monitorizou o comportamento dos ramos, Bussi *et al.* (1999) concluíram que este método, comparativamente à utilização de tensiómetros, possibilitou uma redução significativa da quantidade de água utilizada na rega, sem afectar a produção e permitindo a melhoria da qualidade dos frutos, através do aumento da quantidade total de sólidos solúveis e da diminuição da heterogeneidade do diâmetro. Na perspectiva da programação da rega automatizada, Moriana e Fereres, (2002) realizaram medições deste tipo numa outra espécie arbórea (plantas jovens de oliveira) em simultâneo com a avaliação de outros indicadores, como a condutância estomática, o potencial hídrico dos ramos e a fotossíntese nas folhas. Estes autores concluíram que a variação de diâmetro do tronco seria o indicador mais sensível. Em pomar de pessegueiro, o método tem revelado, por vezes, algumas dificuldades de aplicação, nomeadamente em situações de *stress* hídrico muito acentuado (Goldhammer *et al.*, 1999) ou durante a ocorrência de taxas de crescimento elevadas (Goldhammer e Fereres, 2001).

O método de avaliação da variação do diâmetro tem a vantagem de poder ser automatizado e utilizado no campo durante períodos prolongados. No entanto, dado que a variação de diâmetro é influenciada por outros factores além da progressão do défice hídrico, como por exemplo o crescimento, pode ser necessário monitorizar simultaneamente plantas

---

<sup>2</sup> Razão entre a transpiração de plantas submetidas a défice hídrico e a transpiração de plantas em conforto hídrico.

em conforto hídrico, para determinar valores de referência para as variáveis analisadas, como atrás referido (*RDTs*). A determinação de valores de referência permite obter valores limiares indicadores do aparecimento do défice hídrico, muito variáveis consoante a espécie e as dimensões do tronco, apresentando também grande variabilidade entre plantas da mesma população (Katerji, 1997). Em pessegueiro, a determinação de valores de referência revela-se difícil em condições de má drenagem dos solos, dado o perigo de asfixia radicular, ou quando quantidades elevadas de água de rega induzem o aparecimento de deficiências de azoto (Goldhammer e Fereres, 2001). As diferentes taxas de crescimento, associadas à idade da árvore e às fases do ciclo vegetativo, influenciam as variações de diâmetro do tronco, como referido. Tal dificulta a interpretação dos resultados, nomeadamente na utilização do diâmetro máximo ou mínimo do tronco quando o crescimento é reduzido, ou esbatendo as diferenças no *MDS* se, pelo contrário, for elevado. Por conseguinte, a análise deste tipo de informação implica um conhecimento adequado da fisiologia e fenologia das plantas.

Em síntese, a técnica de avaliação das variações do diâmetro do tronco apresenta ainda algumas dificuldades, que será necessário ultrapassar, para possibilitar uma utilização de rotina em pomares regados.

A associação de diversos indicadores pode ajudar a determinar limiares operacionais com interesse prático na programação da rega. Em pessegueiro, a utilização conjunta da transpiração relativa e de outros indicadores, como o  $\Psi_b$  ou a variação de diâmetro do tronco, tem sido utilizada na construção de relações úteis na detecção de um limiar crítico para o desencadeamento da rega (Ferreira *et al.*, 1996 e Ferreira *et al.*, 1997b; Valancogne *et al.* 1997). Estas relações podem ser vantajosas também nas situações em que a cultura recebe uma quantidade de água inferior às necessidades máximas (por exemplo quando se utiliza a *RDI*, vd. II.1).

Valancogne *et al.* (1997) discutem a possibilidade de generalizar a relação entre *TR* e  $\Psi_b$  em árvores de fruto através de uma função do tipo  $TR = a e^{b\Psi_b}$ , em que *a* e *b* são parâmetros determinados mediante a utilização de  $\Psi_b$ , medido antes da indução do défice hídrico, como parâmetro de normalização ( $\Psi_{b\max}$ ). Estes autores determinaram para diferentes espécies, incluindo o pessegueiro, uma forte correlação entre *TR* e  $\Psi_b$ . A possibilidade de generalização confere a esta relação um acrescido interesse para a utilização na estimativa de *TR* embora, de acordo com os seus autores, a referida normalização careça de posterior validação.

No caso de existir uma distribuição heterogénea da água no solo,  $\Psi_b$  pode não se correlacionar de forma evidente com *TR* (Améglio *et al.*, 1997). Estes autores estudaram esta relação em pomar de noqueira submetido a regas reduzidas por micro-aspersão e também em plantas envasadas, em que apenas uma parte das raízes se encontrava numa zona humedecida, enquanto as restantes eram mantidas numa zona do vaso isolada e não regada. Verificaram que apesar de a *TR* indicar claramente a progressão do défice hídrico, atingindo valores mínimos próximos de 0.2, o  $\Psi_b$  apenas progredia até valores próximos de -0.5 MPa, enquanto

que, no caso de plantas em que a secura do solo se fazia sentir de forma homogénea, o  $\Psi_b$  ultrapassava -1.5 MPa.

No que diz respeito a  $g_s$ , a relação entre esta variável, medida em períodos determinados do dia, e  $\Psi_b$  tem sido estudada em diferentes espécies e situações, parecendo ser possível estabelecer uma relação significativa entre ambas (Katerji *et al.*, 1988; Loustau *et al.*, 1990) nomeadamente em pessegueiro (Ferreira *et al.*, 1997b). Esta relação apresenta por vezes uma mudança brusca do declive, a que corresponde um valor de  $\Psi_b$  passível de ser utilizado como limiar na condução da rega. Este limiar foi identificado na cultura do tomate para  $\Psi_b = -0.4$  MPa (Katerji *et al.*, 1988) e no pessegueiro para  $\Psi_b = -0.45$  MPa (Ferreira, 1996a).

Os valores limiares para a condução da rega podem ser interpretados como correspondentes a uma nítida mudança no comportamento das árvores, durante a ocorrência de ciclos de *stress* hídrico. No caso da variação do diâmetro do tronco, Ferreira *et al.* (1996) indicam, para um pomar de pessegueiros em solo arenoso, um *RDTs* igual a 2, correspondente ao limiar de  $\Psi_b$  anteriormente referido (a que corresponde uma  $g_s$  relativa igual a 0.5 e uma transpiração relativa igual a 0.65) (Ferreira, 1996a). A relação com o teor de água no solo é abordada em Ferreira *et al.* (1997b).

As técnicas de medição de  $\Psi_b$  e de  $g_s$  são descritas no capítulo III.

### II.3. Balanço de energia de um coberto vegetal descontínuo

O balanço de energia de um coberto reflecte a forma como a energia proveniente da radiação solar é repartida nas restantes componentes do balanço, permitindo avaliar a importância relativa de cada componente e, concretamente no domínio de estudo da evapotranspiração, qual a energia canalizada para este processo. Diversos factores influenciam a forma como a energia é repartida, nomeadamente a estrutura e dimensões do coberto, a fracção de solo exposto à radiação, as características edafo-climáticas e a fisiologia das plantas. Como demonstrado por Jarvis *et al.* (1976), a razão entre  $H$  e  $\lambda E$  (razão de Bowen - $\beta$ ) é aproximadamente proporcional à resistência do copado ( $r_c$ ) quando  $r_c \gg r_a$ , ou seja, quando se verifica fecho estomático. Assim, numa situação de défice hídrico, em que  $r_c$  aumenta, surgem também valores elevados de  $\beta$ .

Para analisar o balanço de energia, pode recorrer-se à quantificação da importância relativa dos diversos componentes, por exemplo através de  $\beta$ , ou das razões entre os diversos componentes e o balanço de radiação.

Nos cobertos florestais, a razão  $H/\lambda E$  é geralmente mais elevada do que em culturas agrícolas regadas de reduzida extensão vertical, para as quais, frequentemente, não excede o valor 0.5 (Jarvis *et al.*, 1976). Para uma cultura bem regada, em clima temperado, o valor médio de  $H/\lambda E$  é geralmente próximo de 0.1 (Monteith e Unsworth, 1990). Jarvis *et al.*, 1976,

apresentam uma listagem extensa de valores de medições experimentais de  $\beta$  em cobertos florestais de resinosas. Nesta listagem, em condições de copado seco,  $\beta$  assume frequentemente valores entre 0.1 e 1.5, em dias de céu limpo e na ausência de *stress* hídrico. Jarvis *et al.* (1976) evidenciam, no entanto, a existência de uma gama de valores mais alargada, que relacionaram com um acentuado fecho estomático ou com a ocorrência de valores reduzidos de *VPD*. Em condições de défice hídrico, os valores de  $\beta$  encontravam-se entre 4 e 10.

Moore (1976), para o caso de uma floresta de *Pinus radiata*, em condições de copado seco, sugeriu um valor de  $\beta$  igual a 0.8, como representativo. Baldocchi e Vogel (1996), num estudo comparativo entre uma floresta boreal de *Pinus banksiana* e uma floresta temperada de folhosas, encontraram diferenças marcadas para os valores de  $\beta$ . Na floresta temperada, os fluxos de calor latente eram cerca de três vezes superiores aos da floresta de *P. banksiana*, sendo a energia disponível determinante neste processo, enquanto que, para a floresta boreal, era notória a sensibilidade às variações do *VPD*, sendo  $H/\lambda E$  próximo de 3 de forma consistente, durante o fim do Verão, o que está de acordo com o esperado ( $\Omega$  reduzido). Para floresta de folhosas, composta por *Betula verrucosa* e *Populus tremula*, Rauner (1976) menciona também fluxos de  $\lambda E$  superiores a  $H$ , em cerca de três vezes, durante os meses de Verão. Rodrigues e Pita (1999), para um montado de sobro (*Quercus suber*) na região de Rio Frio, Montijo, encontraram uma razão  $H/\lambda E$  igual a 1.6, durante o Verão de 1997 (Julho).

Para cobertos rugosos agrícolas são menos frequentes os estudos realizados sobre o balanço de energia. Spano *et al.* (2000) analisaram a repartição destes fluxos em vinha, numa plantação com uma cobertura do solo de cerca de 60% e para plantas com uma altura próxima de 2 m. Estes autores encontraram valores de  $\beta$  próximos da unidade, embora com uma variação entre 0.23 e 1.05, em medições realizadas durante o Verão e na ausência de rega. Em pomar de limoeiro, com um grau de cobertura do solo próximo de 39% e plantas com uma altura próxima de 2.5 m, Daamen *et al.* (1999) mediram valores entre 0.78 e 1.78, mas geralmente superiores a 1, na maior parte dos dias analisados. Os valores mais baixos registaram-se no dia subsequente à ocorrência de precipitação, verificando-se um progressivo aumento de  $H/\lambda E$  nos dias seguintes.

Em Portugal, Ferreira *et al.* (1997a) encontraram, para pomar de pessegueiro, (região de Setúbal) uma razão  $H/\lambda E$  próxima da unidade, durante o mês de Julho. Neste pomar, as plantas tinham uma altura média de 3.1 m, um *LAI* estimado de 1.38 e uma distância entre linhas de 5 m. Em eucalipto, na mesma região, os mesmos autores calcularam um valor de 4, durante idêntico período, numa plantação sem sobcoberto, com uma altura média de 17.8 m, um *LAI* de 3.2 e uma densidade de 1020 árvores/ha. Para floresta de pinheiro, com uma altura média de 24.1 m e um *LAI* igual a 2.66, referem um valor de  $H/\lambda E$  mais baixo, próximo de 2.3, também para o mesmo período e em região próxima. Ainda na mesma região, mas em Agosto de 2001, uma equipa do projecto *WATERUSE* observou um valor de cerca de 2.5 para uma vinha com rega mínima (Ferreira *et al.*, comunicação pessoal). Em Silvestre (2003), apresentam-se resultados observados em vinha, nesta e noutra região da Estremadura.

Como se pode constatar pelos resultados referidos, embora seja possível detectar para  $H/\lambda E$  uma gama de variação bastante alargada, ressaltam algumas diferenças para os distintos tipos de coberto, dependendo também do regime hídrico. Observa-se uma tendência para uma razão  $H/\lambda E$  mais baixa em culturas agrícolas de reduzida altura e uma tendência para valores crescentes em culturas agrícolas rugosas (pomares e vinha) e em floresta. Nas florestas de resinosas parece existir uma gama de variação mais alargada que estará certamente relacionada com o défice hídrico a que as plantas se encontravam sujeitas nas situações analisadas.

A fracção de energia do balanço da radiação canalizada, respectivamente, para os fluxos de calor sensível e latente provenientes da superfície ( $\lambda E/R_n$  e  $H/R_n$ ) pode fornecer uma informação sobre o estado hídrico da planta e do solo. Neste contexto, a razão  $\lambda E/R_n$  tem sido, por vezes, utilizada para analisar a evolução da disponibilidade hídrica do solo. Ferreira-Gama (1987), na cultura do tomateiro, durante um ciclo de dessecação, observou a diminuição de  $\lambda E/R_n$  (entre 0.9 e 0.4) e o aumento de  $H/R_n$  progressivos, verificando que, na ausência de condições de advecção,  $\lambda E/R_n$  poderia ser um critério interessante para definir diferentes condições de alimentação hídrica. Também Itier *et al.* (1992), para a cultura da soja, utilizaram a mesma razão como critério para a condução de ciclos de *stress* hídrico, tendo constatado que o aparecimento de um défice hídrico severo correspondia a uma razão  $\lambda E/R_n$  igual a 0.5. De Lorenzi e Rana (2000) utilizaram também a razão  $\lambda E/R_n$  para avaliar a disponibilidade hídrica do solo, em vinha para uva de mesa, constatando que, a partir do 3º dia e até ao 8º dia depois da rega, aquela decrescia entre 0.8 e 0.65, indicando uma diminuição da água disponível no solo.

O fluxo de calor para o solo é geralmente reduzido relativamente aos outros componentes do balanço de energia e frequentemente desprezado em estudos do balanço de energia, efectuados para períodos de 24 horas (Brunel, 1989; Kustas *et al.*, 1990). Para avaliar a importância relativa de  $G$  na parametrização de modelos simples, tem sido estudada em diversos tipos de superfícies a razão  $G/R_n$ . Para copados esparsos e em regiões áridas ou semi-áridas, têm sido encontrados (por Brunel (1989) na Tunísia entre Janeiro e Maio e por Kustas *et al.* (1990) no Arizona, durante o mês de Junho) valores entre 0.10 a 0.20 para a razão  $G/R_n$ , considerando períodos diários, o que sugere que, em determinados tipos de coberto,  $G$  poderá não ser negligenciável (Kustas *et al.*, 1993), mesmo a esta escala temporal.

Durante a maior parte do dia, o fluxo de calor para o solo pode representar cerca de 2% do balanço da radiação, para um coberto denso. No entanto, para cobertos esparsos, com um grau de cobertura do solo reduzido, a mesma percentagem pode ser superior a 30% (Jones, 1992). Numa revisão feita por Choudhury (1987) são indicados valores diurnos de  $G/R_n$  para culturas agrícolas (beterraba, luzerna, trigo, milho e soja) que variam entre 0.05 e 0.10 e valores um pouco mais altos para pastagens e relvados: 0.10 a 0.20. Segundo Pieri *et al.* (1995), no caso dos cobertos em linhas, os fluxos de condução de calor de e para o solo, podem atingir mais de 50% do balanço de energia quando a direcção azimutal do sol é paralela à das linhas de plantação. Gutiérrez e Meinzer (1994) demonstraram que, numa

plantação em linhas de cafeeiro, com um compasso de plantação igual a 3.60 x 0.71 m e rega gota-a-gota,  $G$  diminuía progressivamente com o aumento do  $LAI$ . Estes autores encontraram, para o  $LAI$  mais baixo que estudaram ( $LAI = 1.4$ ) uma razão  $G/R_n$  de cerca de 0.24, enquanto que para o  $LAI$  mais elevado ( $LAI = 7.5$ ),  $G/R_n$  apresentava um valor reduzido (0.05). Paralelamente, constataram que quando  $G/R_n \cong 0.24$ , a evaporação do solo representava cerca de 60% da  $ET$ , enquanto que, para os valores de  $LAI$  mais elevados, o seu valor era quase nulo. Nos cobertos dispostos em linhas e com áreas apreciáveis de solo exposto, a fracção de  $R_n$  convertida em  $G$  pode, portanto, assumir valores que influenciam de forma apreciável a variação da contribuição relativa do solo e da planta para a  $ET$ .

Em florestas, pomares e zonas arbustivas, a variação do armazenamento de calor no copado pode ser importante, quando se consideram períodos de tempo inferiores a 24 horas (Oke, 1990; Allen *et al.*, 1996). Para períodos diários, aquela componente tende no entanto a ser menos relevante, exceptuando-se algumas situações em que a quantidade de biomassa do coberto é elevada. Silberstein *et al.* (2001) verificaram que, em floresta densa de eucalipto, a fracção do armazenamento de calor no copado, medida para períodos horários podia representar cerca de 10% do balanço da radiação, sendo superior à fracção correspondente de  $G$ , de forma consistente. Em situações de coberto esparso, o armazenamento de calor no copado, tende a ser menos relevante, podendo nalgumas situações não ser considerado (vd., p. ex., Smith *et al.*, 1997). A importância relativa do armazenamento de calor no copado poderá ser apreciada através da análise do balanço de energia diário da superfície. Por exemplo, num coberto arbóreo esparso de *Prosopis velutina*, com  $LAI = 1.6$ , em região de clima semi-árido, Scott *et al.* (2003) estimaram o armazenamento de energia do copado entre 5 e 10% de  $R_n - G$ , em situações em que o erro de fecho da equação do balanço de energia se situava entre cerca de 15 e 20%.

Quando se considera o balanço energético de uma superfície, o pressuposto de que essa superfície é homogénea no plano horizontal permite uma abordagem monodimensional dos fluxos de superfície. No entanto, em condições naturais, o revestimento da superfície apresenta muitas vezes uma variabilidade espacial que possibilita que, em determinada região, se faça sentir a influência de massas de ar de uma região adjacente, com características distintas. Este processo é designado por advecção (vd., p. ex., Brutsaert, 1982; Sharma, 1985; Jones, 1992) e ocorre frequentemente quando uma superfície agrícola regada se encontra rodeada de zonas mais secas e quentes. Neste caso, verifica-se uma modificação do balanço de energia da superfície, em que a energia fornecida provém simultaneamente do balanço da radiação e do calor sensível transferido da região adjacente, podendo o fluxo de calor latente exceder a quantidade de energia resultante de  $R_n - G$  (vd., p. ex., Prueger *et al.*, 1996; Todd *et al.*, 1998). O estudo do balanço de energia, considerando apenas fluxos verticais (equação II.3), só será possível em áreas suficientemente extensas e uniformes, de forma a que não se verifique o efeito de advecção.

## II.4. Medição da evapotranspiração em cobertos descontínuos

Existem diversos métodos para a medição da evapotranspiração em condições naturais, e que se podem classificar em dois tipos: os métodos hidrológicos e os métodos micrometeorológicos (Ferreira, 1996b). É ainda possível recorrer à medição das componentes da evapotranspiração, a transpiração e a evaporação directa do solo, de forma separada com métodos distintos destes.

Os métodos hidrológicos recorrem à utilização da equação do balanço hídrico, calculando a evapotranspiração como termo residual. Para este efeito, podem utilizar-se lisímetros ou metodologias que permitam determinar o teor de água no solo.

Quando se procedem a medições *in situ* da humidade do solo, coloca-se o problema de aceder a zonas onde se encontram as raízes mais profundantes e de conseguir medições representativas, dada a heterogeneidade espacial das raízes, como referido em II.2.

A utilização de lisímetros para a determinação da *ET* em culturas lenhosas apresenta algumas limitações dada a grande dimensão das plantas e a dificuldade em obter indivíduos em condições representativas do correspondente coberto. A utilização de lisímetros tem sido contudo praticada em pomares por alguns autores. Para o pessegueiro foram, por exemplo, recentemente utilizados por Goldhamer *et al.* (1999) num estudo que incluiu a caracterização da resposta das plantas ao défice hídrico em função da profundidade de enraizamento e por Girona *et al.* (2002) para a determinação de limiares do teor de água do solo, a partir dos quais se verifica uma redução da *ET*. Johnson *et al.* (2000) recorreram também ao uso de um lisímetro de grandes dimensões, com duas árvores, inserido num pomar plantado à volta do lisímetro, para a medição da *ET* da cultura e a determinação de coeficientes culturais. Estes autores encontraram um modelo simples de estimativa dos coeficientes culturais a partir do conhecimento da interceptação de luz pela copa ao meio-dia, que concluíram ser muito próximo dos obtidos para outras espécies lenhosas, também a partir de medições em lisímetros. A utilização de plantas lenhosas em lisímetros apenas permite, contudo, amostragens muito reduzidas. Goldhamer *et al.* (1999) e Girona *et al.* (2002) observaram uma resposta diferenciada por parte das plantas colocadas em lisímetros, quando comparada com a de plantas instaladas directamente no solo, no que dizia respeito ao desenvolvimento radicular, mais limitado nas primeiras; observaram também que as plantas fora dos lisímetros tinham capacidade para extrair água a profundidades bastante superiores, o que originava comportamentos distintos dos das plantas em lisímetros, face à ocorrência de défice hídrico.

Os métodos micrometeorológicos medem a *ET* através da quantificação de variáveis relacionadas com os fluxos, em um ou dois níveis acima do coberto. Estes métodos só são aplicáveis em superfícies extensas e homogéneas, de forma a respeitar a validade das equações e a evitar efeitos de advecção. No caso das culturas com uma cobertura uniforme do solo, existem menos limitações impostas à escolha dos métodos de medição da evapotranspiração. Para os cobertos descontínuos ou em linhas, existem mais restrições na aplicação destes métodos, sobretudo os que usam relações fluxo-gradiente, uma vez que as trocas de massa e energia são mais complexas (Denmead, 1984; Ferreira, 1996a).

No caso dos cobertos em linhas, a superfície do solo é um protagonista importante nas trocas de energia, assim como a variação das condições microclimáticas, tanto no plano vertical como no plano horizontal. Quer em pomares, quer em vinhas, a estrutura em linhas induz variações microclimáticas específicas que convém ter em conta para a análise da evapotranspiração. Além da possível estratificação vertical, comum a qualquer tipo de coberto, existem variações horizontais importantes, que dizem respeito por exemplo à quantidade de energia interceptada, às temperaturas de superfície e ao regime de turbulência do ar num e noutro lado das linhas (vd. Pieri *et al.*, 1995). Estas variações originam fenómenos de advecção localizada que têm consequências importantes na natureza e na quantidade das trocas de energia solo-planta-atmosfera.

Na medição da *ET* em cobertos lenhosos são frequentemente utilizados o método das flutuações instantâneas (*eddy covariance technique*) que será descrito na secção seguinte e o método da razão de *Bowen*.

O método da razão de *Bowen* (vd., p. ex., Monteith e Unsworth, 1990; Jones, 1992; Allen *et al.*, 1996) baseia-se na equação do balanço de energia e na medição de  $\beta = H/\lambda E$ . A determinação de  $\lambda E$  implica a medição de  $R_n$ ,  $G$  e dos gradientes de temperatura e humidade acima do copado. Para valores baixos de  $\beta$ , o método não é tão afectado por erros na medição de temperatura e humidade, mas sobretudo pelos que se relacionam com a medição de  $G$  e  $R_n$  (Jones, 1992). Em pomares, com valores de  $\beta$  mais elevados, o método já é muito afectado por erros na medição de temperatura e humidade. Nestes cobertos, uma parte importante da radiação atinge o solo e a aplicação do método da razão de *Bowen* deve ser cuidadosa, porque o método pressupõe que as trocas de calor sensível e latente se processam ao mesmo nível.

Recentemente, tem sido utilizada a técnica da ‘análise da renovação na superfície’ (*surface renewal analysis*) para estimar o fluxo de calor sensível a partir de medições de alta frequência da temperatura do ar. O fluxo de calor latente é então calculado a partir da equação do balanço de energia (Paw U *et al.*, 1995; Paw U e Brunet, 1991). Alguns autores aplicaram este método em pomares, tendo encontrado uma boa concordância com os resultados obtidos por outros métodos. Villalobos (1996) utilizou-o em olival, tendo encontrado um elevado coeficiente de correlação na comparação com resultados obtidos por um método de medição de fluxo de seiva (o método dos impulsos de calor, abordado posteriormente neste capítulo) embora a relação se afastasse da recta 1:1, indicando a necessidade de calibração de um ou de ambos os métodos. Spano *et al.* (2000) aplicaram-no nas mesmas condições do presente estudo e em vinha, tendo obtido resultados muito próximos dos medidos pelo método das flutuações instantâneas. Estes autores salientam a utilidade do método para a determinação da *ET* de copados esparsos e altos, não necessitando de calibração e apresentando custos relativamente baixos.

Uma revisão detalhada sobre os métodos micrometeorológicos de medição da *ET* pode ser consultada em Brutsaert (1982), Arya (1988) e Guyot (1998). Particular atenção será dada aqui ao método das flutuações instantâneas, por ter sido o método utilizado neste trabalho.

Uma discussão mais aprofundada sobre a medição da  $ET$  em cobertos descontínuos, pode ser encontrada em Oke (1990), Cellier e Brunet (1992), Allen *et al.* (1996) e Ferreira (1996b).

A medição da evapotranspiração pode ainda realizar-se medindo separadamente a transpiração e a evaporação do solo. Esta questão será abordada no ponto II.4.2.

#### II.4.1. Método das flutuações instantâneas

O método das flutuações instantâneas foi inicialmente apresentado por Swinbank (1951) e baseia-se na medição num único nível da componente vertical da velocidade do vento e da concentração da variável relacionada com a entidade cujo fluxo se pretende medir. Apesar de permitir a quantificação directa da  $ET$ , este método apresenta um certo grau de sofisticação, sendo pouco vocacionado para medições de rotina fora do âmbito da experimentação científica. É considerado por alguns autores como um método de referência (Brunet *et al.*, 1995; Itier e Brunet, 1996), tendo-se generalizado bastante a sua aplicação nas medições de fluxos de calor sensível e latente em superfícies cobertas por vegetação (Schelde *et al.*, 1999).

##### II.4.1.1. Fundamento teórico do método

De acordo com Rosenberg *et al.* (1983), no escoamento turbulento, o fluxo médio vertical ( $F$ ) de uma entidade  $s$ , durante um determinado período de tempo, pode ser descrito por:

$$F = \overline{\rho_a w s} \quad (\text{II. 4})$$

sendo  $\rho_a$  a densidade do ar,  $w$  a componente vertical da velocidade do vento, a barra indicando a média para o período considerado. A entidade  $s$  pode ser representada como a soma de uma média e de uma flutuação instantânea, processo que é conhecido por decomposição de *Reynolds* (vd. por exemplo Arya, 1988). Para um determinado período  $\tau$ , o fluxo pode ser reescrito como uma média definida em  $\tau$  e uma flutuação em volta dessa média (representada pela plica):

$$F = \rho_a \overline{w s} + \rho_a \overline{w' s'} \quad (\text{II. 5})$$

Para um período suficientemente longo e para uma superfície homogénea horizontal, a quantidade de ar ascendente é aproximadamente igual à quantidade descendente, sendo a velocidade vertical média desprezável, assumindo a equação II.5 a seguinte forma:

$$F = \rho_a \overline{w's'} \quad (\text{II. 6})$$

Se as flutuações da velocidade e da concentração vertical estiverem correlacionadas, existirá então um fluxo. No caso do fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ) e do fluxo de calor sensível ( $H$ ) é possível expressá-los, respectivamente, por (Verma, 1990):

$$\lambda E = \lambda \overline{w'\rho'_v} \quad (\text{II. 7})$$

$$H = \rho_a c_p \overline{w'T'} \quad (\text{II. 8})$$

em que  $\lambda$  é o calor latente de vaporização,  $\rho_v$  é a humidade absoluta,  $c_p$  é a capacidade térmica do ar a pressão constante e  $T$  é a temperatura do ar. As barras indicam a média para o período considerado e as plicas o desvio em relação à média.

Na aplicação do método são medidas as flutuações instantâneas da temperatura e da humidade absoluta do ar, assim como as da componente vertical da velocidade do vento, em torno da média, num dado intervalo de tempo, permitindo a determinação das covariâncias  $\overline{w'\rho'_v}$  e  $\overline{w'T'}$  e dos fluxos  $\lambda E$  e  $H$  (vd. III.3).

#### II.4.1.2. Condições de medição, selecção e validação dos dados

O método das flutuações instantâneas é considerado fiável e preciso (p. ex., Rosenberg *et al.*, 1983; Arya, 1988; Jones, 1992) obrigando no entanto a utilização de sensores com uma resposta rápida e exacta e uma taxa de amostragem adequada (McMillen, 1988). Uma avaliação detalhada dos factores limitantes na utilização dos sensores pode ser encontrada em Moncrieff (1989) e Kizer e Elliot (1991). A precisão dos instrumentos é, no entanto, menos determinante do que as condições de utilização do método, que podem influenciar fortemente a qualidade dos dados (Brunet, 1997). É assim fundamental garantir as condições necessárias para que o fluxo medido corresponda realmente ao fluxo libertado pela superfície em estudo e que são as seguintes (Baldocchi *et al.*, 1988; Berbigier *et al.*, 1996): (a) a importância relativa da difusão molecular deve ser reduzida, podendo desprezar-se quando comparada com o fluxo turbulento, condição que é sempre satisfeita; (b) acima do nível a que se realizam as medições não existem ‘fontes’ ou ‘sumidouros’, o que se traduz pela necessidade de efectuar a medição dos fluxos acima da camada de vegetação; (c) no plano horizontal a superfície é uniforme, não se verificando o efeito de advecção; e (d) a concentração média do constituinte atmosférico cujo fluxo estamos a medir e as condições micrometeorológicas não variam apreciavelmente durante o intervalo de medição.

Decorre da condição (c) que a aplicação do método pressupõe a existência de uma superfície homogénea, em que a distância entre o local de medição e o extremo da parcela, na direcção do vento dominante, é suficientemente grande para permitir que os gradientes de concentração horizontais possam ser desprezados (Brunet, 1997). Esta distância é designada por *fetch* na terminologia anglo-saxónica. Uma razão igual ou inferior a 1:100 entre a altura de medição e o *fetch*, é geralmente indicada como regra prática, para obter medições adequadas pelo método das flutuações instantâneas (Brutsaert, 1982; Tanner *et al.*, 1988; Leclerc e Thurtell, 1990; Verma, 1990; Schmid, 2002). A necessidade de garantir um *fetch* adequado para as medições, implica a escolha de uma área suficientemente extensa, para que não existam restrições daí decorrentes, o que nem sempre é possível. Em condições de *fetch* limitante ou superfície não totalmente homogénea, poderá então ser útil estimar qual a região, na direcção do vento dominante, de onde são originários os fluxos medidos. O conhecimento da dimensão espacial da distribuição do fluxo medido (*footprint* ou ‘pegada’ do fluxo), permite estimar com maior precisão o *fetch* necessário para fornecer informações adequadas à situação real. A importância deste tipo de análise é acrescida no caso de cobertos rugosos, como por exemplo as florestas, dado que tem sido verificado que a razão indicativa 1:100 se torna demasiado restritiva nesses cobertos (Leclerc e Thurtell, 1990).

A análise de ‘pegada’ (*footprint analysis*) é uma forma de identificar a região, na direcção de onde vem o vento, que afecta com maior probabilidade a medição de fluxo para a altura considerada. Este tema tem sido objecto de estudo de numerosos investigadores (p. ex., Gash, 1986; Leclerc e Thurtell, 1990; Schuepp *et al.* 1990; Horst e Weil, 1992) que analisaram a distribuição espacial das origens dos fluxos superficiais, medidos pelos sensores num ponto determinado, utilizando soluções analíticas da equação de difusão turbulenta. Schuepp *et al.* (1990) conseguiram encontrar soluções simples e aproximadas, com base em estudos anteriores de Gash (1986). Segundo Schuepp *et al.* (1990), a contribuição relativa de cada ponto tido como ‘fonte’ vai variar com a distância desse ponto ao ponto de medição ( $x$ ), com a altura a que se faz a medição ( $z$ ), com as características da camada limite turbulenta e com a estabilidade atmosférica, podendo a contribuição relativa para o fluxo vertical a uma altura  $z$ , ser calculada por:

$$\frac{1}{Q_0} \frac{dQ}{dx} = - \frac{U(z-d)}{u_* k x^2} e^{-U(z-d)/ku_*x} \quad (\text{II. 9})$$

em que  $Q_0$  representa a densidade de fluxo da entidade em estudo<sup>3</sup>, medida no ponto  $x = (0,z)$ ,  $Q$  a contribuição parcial dos fluxos acumulados<sup>4</sup> entre o ponto de medição e um ponto situado a uma determinada distância  $x$ ,  $d$  a altura de deslocamento do plano de referência,  $U$  a velocidade do vento considerada média, entre a superfície e a altura de medição,  $u_*$  a

<sup>3</sup> A densidade de fluxo ( $Q_0$ ) poderia ter sido aqui representada por  $F$  (como nas equações II.4, II.5 e II.6) tendo-se no entanto optado por respeitar a nomenclatura proposta em Schuepp *et al.* (1990) para a equação II.9.

<sup>4</sup>  $Q$  representa o somatório dos fluxos provenientes de toda uma extensão compreendida entre o ponto de medição (onde se encontra a torre com os sensores) e um ponto qualquer a uma distância  $x$  (p. ex., entre 0 e 100 m, vd. IV.1.1), sendo  $Q$  uma contribuição parcial para o fluxo total  $Q_0$ .

velocidade de atrito,  $k$  a constante de *von Karman* e  $(1/Q_0) dQ/dx$  representa a densidade de fluxo relativa. Esta função é conhecida na terminologia anglo-saxónica por *one dimensional footprint*, representando a importância relativa das origens dos fluxos oriundos de uma distância  $x$  (na direcção do vento) para a medição do fluxo realizada no ponto  $(0,z)$  ou, de forma simples, a ‘pegada’.

Calculando o zero da primeira derivada desta função em relação à variável  $x$ , obtém-se o valor de  $x$  que corresponde ao máximo da função:

$$x_{max} = \frac{U(z-d)}{u_* 2k} \quad (\text{II. 10})$$

O ponto  $x_{max}$  é o ponto situado a uma determinada distância  $x$  do ponto de observação  $(0,z)$ , a que a medição mostra maior sensibilidade (sendo principalmente afectada por fluxos com origem neste ponto).

A integração da equação (II.9) permite quantificar a contribuição relativa normalizada para a medição do fluxo, a uma altura  $z$ , em função da distância ao ponto  $(0,z)$ . Obtém-se assim o fluxo acumulado normalizado ( $FAN$ ), em que  $x_L$  representa a distância na direcção do vento a que se encontra o limite da área considerada:

$$FAN(x_L) = - \int_0^{x_L} \frac{U(z-d)}{u_* k x^2} e^{-U(z-d)/k u_* x} dx = e^{-U(z-d)/k u_* x_L} \quad (\text{II. 11})$$

Depois de efectuar a análise de ‘pegada’ para as condições de medição, é possível estimar quais as direcções em que o *fetch* é limitante. Os dados podem então ser seleccionados, eliminando os que foram recolhidos quando o vento não soprava de uma direcção favorável (se nesse caso o *fetch* fôr insuficiente). A validação dos dados e a apreciação da sua qualidade são também importantes na aplicação do método, existindo vários procedimentos para o efeito. No âmbito deste trabalho foram utilizados dois procedimentos, que se consideraram pertinentes: a análise espectral e a apreciação do erro de fecho da equação do balanço de energia (vd. III.3.3).

O método das flutuações instantâneas baseia-se no pressuposto de que é possível incorporar, nas medições, os fluxos transportados por movimentos da atmosfera representativos de todas as amplitudes que contribuem para o processo de transporte vertical. Tal implica a necessidade de dispor de séries temporais suficientemente longas que incluam os eventos de baixa frequência mas, simultaneamente, a utilização de uma velocidade de amostragem suficientemente rápida, de modo a captar os eventos de alta frequência (Brunet, 1997). Para quantificar a importância relativa das massas de ar de diferentes amplitudes, no transporte da entidade que estamos a considerar e verificar assim o adequado funcionamento do dispositivo de medição é necessário avaliar a contribuição individual para o processo no seu todo. Tal pode ser conseguido através da determinação, durante um intervalo de tempo

considerado, do espectro de turbulência da entidade atmosférica que se pretende medir. O espectro é uma função matemática que representa a contribuição para a variância total de toda a gama de escalas presentes no movimento turbulento. Se se representar em abcissas a frequência, utilizando uma escala logarítmica, a contribuição de uma determinada frequência para a variância total é proporcional à área definida abaixo da curva por essa gama de frequência. A superfície total delimitada pela curva corresponde à variância total da entidade a medir. Para uma entidade  $x$ , a variância total ( $\sigma_x^2$ ) é dada por:

$$\sigma_x^2 = \int_0^{\infty} S_x(f) df \quad (\text{II. 12})$$

sendo  $S_x(f)$  a densidade espectral e  $f$  a frequência [Hz] (Anderson *et al.*, 1986).

A análise do cospectro fornece uma informação do mesmo tipo mas, neste caso, é representada a contribuição para a covariância e a superfície delimitada pela curva é representativa da covariância total (Brunet *et al.*, 1995b). O cospectro permite assim determinar o tamanho característico dos movimentos turbulentos responsáveis pelo transporte da entidade a estudar (por exemplo, o vapor de água e o calor). De forma idêntica ao espectro, para duas entidades  $x$  e  $y$ , a covariância total ( $\text{cov}(x,y)$ ) é dada por (Brunet, *et al.* 1995a):

$$\text{cov}(x,y) = \int_0^{\infty} C_{xy}(f) df \quad (\text{II. 13})$$

Na representação gráfica do espectro e do cospectro efectua-se frequentemente uma normalização da frequência de medição ( $f$ ), que possibilita a comparação de medições em diferentes locais ou a diferentes alturas, utilizando a altura a que se realizam as medições ( $z$ ) e a velocidade média da componente horizontal do vento ( $u$ ) e que toma a forma ( $fz/u$ ). A ordenada (a função espectral  $S_x(f)$  ou a função do cospectro  $C_{xy}(f)$ ) é também habitualmente normalizada, utilizando a variância ou a covariância e a multiplicação pela frequência de medição ( $f S_x(f)/\sigma_x^2$  ou  $f C_{xy}(f)/\text{cov}_{xy}$ , respectivamente). Desta forma, é possível a comparação com curvas normalizadas universais (Kaimal *et al.*, 1972; Kaimal e Finnigan, 1994) usadas como orientação para estabelecer os requisitos de amostragem e de resposta do sensor, em qualquer situação experimental. Para o espectro, utilizando uma representação em escalas logarítmicas, estas curvas convergem no subintervalo de inércia<sup>5</sup> para uma recta de declive igual a  $-2/3$ .

Se o intervalo de integração da densidade dos fluxos tiver duração suficiente para incluir todos os processos responsáveis pelo transporte vertical, o cospectro tende para zero na zona de baixas frequências. A velocidade de amostragem adequada e o intervalo mínimo de integração podem ser estimados a partir dos valores da frequência normalizada para os quais o

<sup>5</sup> *Subintervalo de inércia*: zona do espectro em que a transferência de energia cinética turbulenta está associada a um processo de cascata, em que a instabilidade de turbilhões de maior dimensão dá origem a turbilhões de cada vez menor dimensão (Valente, 1999).

cospectro se torna negligenciável, ou seja, na zona das altas e das baixas frequências, respectivamente (Brunet, 1997).

A análise espectral contribui, desta forma, para a definição precisa de um intervalo de integração e de uma frequência de amostragem adequados às condições de medição (vd. III.3.3.3 e IV.1.3).

A determinação do erro de fecho da equação do balanço de energia<sup>6</sup> tem sido considerada uma forma importante de testar a qualidade dos dados obtidos pelo método das flutuações instantâneas, sendo frequentemente referida como um procedimento padrão, por muitos autores (p. ex., Wilson *et al.*, 2002). Pode ser aceite um erro de fecho, dentro de determinados limites, escolhidos de acordo com o objectivo do trabalho, tendo em conta a natureza do estudo e o grau de precisão pretendido. A utilização do método em estudos de turbulência pressupõe, por exemplo, um grau de precisão mais elevado do que em estudos de gestão da água ou ecofisiológicos (Lamaud *et al.*, 2001).

Em muitas situações, o método das flutuações instantâneas tem conduzido a uma subestimativa nas medições dos fluxos de calor sensível e latente (p. ex., Lee e Black, 1993; Simpson *et al.* 1998; Kustas *et al.*, 1999; Twine *et al.*, 2000; Wilson *et al.*, 2002). O erro de fecho da equação do balanço de energia encontrado é frequentemente associado à avaliação da energia disponível, apesar de Twine *et al.* (2000) demonstrarem que o erro de fecho nem sempre pode ser atribuído a erros de medição nas componentes do balanço da radiação e no fluxo de calor para o solo. Neste último estudo, desenvolvido em diversos tipos de coberto, o erro associado à medição da energia disponível era de cerca de 10%, mas o erro de fecho chegava nalgumas situações a 30%, indicando uma subestimativa na avaliação dos fluxos de calor latente e sensível. Os erros encontrados poderão resultar de um factor casual, como quando relacionado com a medição da energia disponível, como referido, ou devido à não coincidência das áreas de proveniência dos fluxos  $\lambda E$  e  $H$ , por um lado, e  $R_n$  e  $G$  por outro (no caso de  $\lambda E$  e  $H$ , a área de proveniência varia consoante a direcção do vento). No entanto,  $\lambda E$  e  $H$  apresentam frequentemente uma subestimativa, como referido, o que parece ser um erro sistemático e de difícil explicação. Twine *et al.* (2000) propõem que, desde que as medições de  $R_n-G$  possam ser consideradas precisas e representativas da área de amostragem dos fluxos, o fecho da equação seja forçado, respeitando o princípio da conservação de energia. Simpson *et al.* (1995 e 1998) propõem mesmo a utilização de um factor de correcção de 1.3 para obviar a subestimativa da medição com este método. Este factor tem sido adoptado por alguns autores (Warland *et al.*, 2001) que reconhecem, no entanto, que este procedimento é controverso e que, quando se verifica uma subestimativa, o seu valor exacto é incerto. A correcção dos fluxos medidos, mediante o fecho forçado da equação do balanço de energia, será então um procedimento que requer uma avaliação cuidada da situação, dado que poderá não se mostrar adequado.

---

<sup>6</sup> Erro de fecho da equação do balanço de energia: diferença encontrada entre os dois termos da equação quando o balanço de energia não é nulo.

#### II.4.2. Medição de componentes da evapotranspiração

A medição da transpiração das plantas pode efectuar-se mediante a quantificação das trocas gasosas recorrendo a câmaras, que consistem geralmente numa estrutura revestida por um filme plástico transparente, associada a um sensor de humidade preciso, por exemplo, um analisador de gás por infravermelho (IRGA). As câmaras podem ser sistemas fechados como, por exemplo, o descrito em Loustau e Cochard (1991), em que o fluxo de vapor de água libertado pela planta é calculado a partir da variação da concentração de vapor de água no interior da câmara, ou abertos, como o utilizado por Daudet (1987), onde um fluxo de ar constante percorre a câmara, calculando-se a transpiração a partir da diferença entre o teor de água no ar que entra e que sai da câmara. Améglio *et al.* (1993) apresentam resultados obtidos em nogueira com uma câmara deste último tipo, tendo observado uma subestimativa sistemática na transpiração, quando comparada com outros métodos, nomeadamente de medição de fluxo de seiva. Outros resultados podem ser encontrados em Balding *et al.* (1973), Greenwood e Beresford (1979 e 1980) e Gouliden e Field (1994). Esta técnica é naturalmente mais indicada para uma utilização restrita, ao nível da planta isolada ou de um pequeno número de plantas e em áreas de dimensão reduzida (Brunet, 1997). Apresenta o inconveniente de introduzir perturbações no ambiente físico das plantas, alterando o microclima que as rodeia.

Uma outra forma de determinar a transpiração em plantas individuais, largamente utilizada nos últimos anos, consiste na medição do fluxo de seiva. O conteúdo total de solutos da seiva do xilema é geralmente muito baixo (cerca de 0.1%) (Zimmermann e Brown, 1971) podendo considerar-se assim, sem incorrer em grande erro, que o fluxo de seiva medido é equivalente ao fluxo de água posteriormente transpirada. Os métodos mais utilizados baseiam-se no transporte de calor pela seiva. Existem outros métodos que não são baseados no transporte de calor, utilizando como sinal uma substância química ou radioactiva. Estes métodos não são muito utilizados, tendo uma aplicação difícil e não permitindo medições durante períodos muito prolongados (Valancogne e Nasr, 1989).

O método de *Granier (heat dissipation – HD)*, (Granier, 1985, 1987a, 1987b) recorre a uma fonte de calor constante e pontual. Os métodos de balanço de calor, indirecto ou directo (*tissue* ou *stem heat balance – THB* ou *SHB*, respectivamente) (Cermák *et al.*, 1973; Sakuratani, 1981) e o método de deformação do campo de temperaturas (*heat field deformation - HFD*) (Nadezhdina e Cermák, 1999; Nadezhdina *et al.*, 1998) recorrem também a um aquecimento contínuo, enquanto que um outro conjunto de métodos foi desenvolvido a partir da aplicação de calor de forma intermitente, sendo genericamente designados por métodos de impulsos de calor (*heat pulse velocity – HPV*).

Revisões sobre estes métodos (descritos de forma breve nas secções seguintes) podem ser encontradas em Jones *et al.* (1988), Swanson (1994), Smith e Allen (1996), Valancogne e Granier (1997), e Cermák e Nadezhdina (1998a). Os estudos elaborados por Tavares (1993), David (1995), David (2000) e Silva (2002), em Portugal, apresentam diversas aplicações e

revisões sumárias destes métodos. No nosso país, as primeiras aplicações dos métodos de medição de fluxo de seiva (mediante a introdução do método de *Granier*) foram realizadas no Instituto Superior de Agronomia, em 1992, tendo dado origem a diversos trabalhos: Tavares (1993), Tavares e Ferreira (1994), David (1995), Ferreira e Zitscher (1996), David *et al.* (1997), Ferreira *et al.* (1998), David (2000), Silvestre e Ferreira (1998), Silvestre *et al.* (2000) e Silva (2002). Posteriormente, a utilização do método de *Granier* foi divulgada a outras equipas, de diversas instituições, nomeadamente da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

Quer em estudos realizados em floresta (p. ex., Loustau *et al.*, 1996; Köstner *et al.*, 1998a), quer em pomares e vinhas (p. ex., Green *et al.*, 1989; Shackel *et al.*, 1992; Weibel e de Vos, 1994; Valancogne, 1995; Ferreira, 1996a; Silvestre e Ferreira, 1998; Braun e Schmid, 1999) os métodos de medição de fluxo de seiva têm tido uma cada vez mais larga aplicação, frequentemente em conjunto com o método das flutuações instantâneas, para determinar a contribuição individual das árvores para o fluxo de vapor de água total medido. Os métodos de medição de fluxo de seiva apresentam importantes vantagens face a outros métodos, quando se pretende medir a transpiração de plantas individuais. São facilmente automatizáveis, permitindo o registo contínuo durante períodos de tempo longos com reduzida manutenção (Granier e Loustau, 1994; Smith e Allen, 1996). A obtenção de séries contínuas de dados é particularmente útil na construção e validação de modelos para períodos alargados de tempo.

A evaporação do solo, a outra componente da *ET* além da transpiração, pode ser quantitativamente importante, dependendo das características do coberto em estudo e do regime hídrico. Assim, por vezes, interessa determinar a sua contribuição para a *ET*. Esta questão é abordada em II 4.2.5.

#### II.4.2.1. Métodos de impulsos de calor

É possível recorrer a métodos que permitem fazer a medição de fluxo de seiva e também que permitem determinar o perfil radial de fluxo de seiva, utilizando sondas inseridas radialmente no tronco, com sensores colocados a várias profundidades. Entre estes, encontram-se os que recorrem à utilização de impulsos de calor (*HPV*). Estes métodos tiveram a sua origem no trabalho desenvolvido por Huber (1932) tendo, posteriormente, tido uma primeira abordagem quantitativa com Marshall (1958). O seu desenvolvimento e aperfeiçoamento seguiu duas linhas de orientação diferentes. Numa delas (Swanson, 1974), a densidade de fluxo de seiva é estimada a partir do tempo necessário para que a temperatura, medida por sensores colocados a distâncias assimétricas em relação ao ponto onde o calor é aplicado por impulsos, se iguale, baseando-se num princípio de compensação: quando o impulso de calor é libertado, o sensor situado abaixo da fonte de calor, mais próximo, aquece

mais rapidamente que o situado acima, pelo processo de condução; mas, por outro lado, o calor transportado por convecção pela seiva vai aquecer o sensor situado acima, igualando a temperatura nos dois sensores, ao fim de algum tempo. Esta técnica de compensação foi melhorada e adoptada por diversos autores ao longo do tempo (Swanson e Whitfield, 1981; Green e Clothier, 1988; Green *et al.*, 1989; Caspari *et al.*, 1993).

Uma outra linha de trabalho foi desenvolvida por Y. Cohen *et al.* (1981 e 1985) e Y. Cohen (1994), em que a densidade de fluxo de seiva é determinada com base no intervalo de tempo necessário para que seja atingida uma temperatura máxima, num sensor colocado a determinada distância no sentido de deslocação do fluxo, depois de libertado um impulso de calor. A descrição deste método e a sua aplicação em azinheira, para a determinação da área de xilema condutor e do perfil radial de distribuição da densidade de fluxo de seiva é feita em David (2000). Para uma apreciação qualitativa, indicando as zonas de maior densidade de fluxo no xilema, é ainda possível, mediante a utilização de uma câmara de infravermelhos, a análise de imagens térmicas (Nadezhdina *et al.*, 2003) obtidas através da inserção de um aquecedor longilíneo, numa secção radial em contacto com o xilema.

#### **II.4.2.2. Métodos de balanço de calor**

Os métodos de balanço de calor baseiam-se na aplicação de calor a um determinado volume do caule e na utilização da equação do balanço energético desse volume para o cálculo do fluxo de seiva como relacionado com o termo residual da perda por convecção. Sakuratani (1981) utilizou este processo, aplicando uma quantidade de calor conhecida a uma secção completa do caule, em plantas anuais, e calculando, a partir de medições de gradientes de temperatura, as trocas de calor por condução ao longo do caule e com a atmosfera. Este sistema foi adaptado por Valancogne e Nasr (1989 e 1993) para utilização em árvores de porte pequeno a médio. A adaptação consistiu na introdução de termopares inseridos radialmente no xilema para melhorar a avaliação dos gradientes de temperatura longitudinais e no facto de tomar em consideração o armazenamento de calor na zona aquecida, estimado por uma medição de temperatura adicional nesta zona. Num outro método baseado na equação de balanço de calor, desenvolvido por Cermák *et al.* (1973) e Kucera *et al.* (1977) o calor é aplicado a um sector interno do tronco, sendo fornecido por eléctrodos de aço inoxidável, inseridos no xilema; as medições de temperatura realizam-se através de séries de termopares, inseridos também no xilema, a diferentes profundidades e a distância variável dos eléctrodos (Cermák e Nadezhdina, 1998a). Este método apenas se adapta a troncos com um diâmetro superior a 15 cm, apresentando baixa sensibilidade para fluxos reduzidos.

### II.4.2.3. Método de *Granier*

O método de *Granier* assenta na utilização de duas sondas com sensores de temperatura que se inserem radialmente no tronco, permitindo determinar a diferença de temperatura entre ambas. Uma delas, colocada em posição superior, é aquecida através de uma resistência, por efeito *Joule*. A segunda, colocada no mesmo plano vertical que a primeira, está à temperatura de referência, ou seja, à temperatura natural dos tecidos do tronco. A distância de separação entre sondas evita que o calor aplicado influencie a medição da temperatura de referência (sonda inferior). O índice de fluxo  $k$  é dado por:

$$k = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} \quad (\text{II. 14})$$

sendo  $\Delta T$  a diferença de temperatura entre a sonda aquecida e a sonda não aquecida [°C] e  $\Delta T_{max}$  o valor máximo de  $\Delta T$ , que ocorre quando o fluxo é nulo [°C]. O fluxo de seiva é calculado a partir de  $k$ , baseando-se em calibrações para determinação dos parâmetros da equação  $u = 1/\alpha k^{\beta'}$ , que conduziram a uma relação admitida como independente da espécie (Granier *et al.*, 1990; Valancogne e Granier, 1997) e que toma a forma (Granier, 1985)  $u = 118.99 \times 10^{-6} k^{1.231}$ .

O cálculo do fluxo de seiva  $F$  [m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>] é determinado a partir das equações referidas no parágrafo anterior e da área da secção transversal condutora,  $A$  [m<sup>2</sup>], sendo  $u$  a densidade de fluxo de seiva [m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>], obtendo-se (Granier, 1987b):

$$F = u A \quad (\text{II. 15})$$

Para a determinação de  $\Delta T_{max}$  é necessário que ocorra um período em que o fluxo de seiva seja nulo. No entanto, as condições climáticas favorecem por vezes a ocorrência de transpiração nocturna, não correspondendo o gradiente de temperatura medido a  $\Delta T_{max}$ . Segundo Améglio *et al.* (1993), a situação de fluxo nulo é uma situação que ocorre raramente em condições naturais. É assim aconselhado (Granier, 1987b) considerar, para o cálculo, os valores máximos absolutos encontrados para  $\Delta T_{max}$ , em períodos de cerca de dez dias.

Verifica-se com frequência o aparecimento de um pico na densidade de fluxo de seiva a meio da manhã, seguido de uma aparente subestimativa cerca do meio-dia. As discrepâncias correspondem a um gradiente natural na temperatura do tronco, independente do efeito do aquecimento. A influência nas medições de fluxo de seiva dos gradientes naturais de temperatura no tronco, tem sido analisada por diversos autores (p. ex., Cabibel e Do, 1991; Ferreira e Zitscher, 1996; Silvestre e Ferreira, 1998; Do e Rocheteau, 2002). A intensidade dos gradientes naturais parece aumentar à medida que a distância entre o solo e o ponto de medição diminui; Ferreira *et al.* (1996), baseados em medições em diversas espécies, sugerem que a adequação do método de *Granier* melhora com o aumento da dimensão das árvores e da distância entre o solo e os pontos de medição. Köstner *et al.* (1998b) apontam os cobertos

esparsos, em que a superfície do solo exposta pode ser apreciável, nomeadamente os pomares, como exemplo desta situação, em que se desenvolvem habitualmente gradientes de temperatura elevados entre o tronco e o solo. Para obviar esta questão, introduz-se uma correcção que consiste em utilizar medições obtidas na ausência de aquecimento da sonda superior, para corrigir os dados recolhidos durante os períodos em que se verificou aquecimento, como descrito em Ferreira e Zitscher (1996) e Silva (2002).

A determinação da transpiração ao nível de um povoamento pressupõe o conhecimento da área de xilema funcional, para essa escala espacial. A quantificação directa não é normalmente possível, recorrendo-se frequentemente a uma relação entre um parâmetro do povoamento facilmente mensurável em larga escala e a referida área, determinada num número mais restrito de plantas, como em Wilson *et al.* (2001) e Wullschleger *et al.* (2001) ou ainda Tavares (1993). Outros autores optam por utilizar simplesmente uma amostra de plantas que consideram representativa da população, nomeadamente no que diz respeito à área de xilema condutor (Granier e Bréda, 1996).

Para a determinação da área de xilema da secção transversal do tronco usam-se geralmente verrumadas (Granier, 1987b; Saugier *et al.*, 1997; Wullschleger *et al.*, 2000). No entanto, nem sempre é suficiente determinar a área total de xilema, dado que as áreas de xilema de formação mais antiga perdem gradualmente a sua função de condução de água (Zimmermann e Brown, 1971), sendo mais adequado determinar a área de xilema funcional. A análise de amostras obtidas por verrumadas também nem sempre mostra diferenças visíveis entre xilema condutor e não condutor (p. ex., Tavares, 1993). Em verrumadas efectuadas em 1992 em eucalipto, verificou-se que a alteração de cor não coincidia com a funcionalidade das coroas circulares (xilema) observadas por aplicação de corante (Ferreira, comunicação pessoal). Para ultrapassar estas dificuldades é possível utilizar a circulação de corantes no tronco (p. ex., Tavares, 1993; Granier *et al.*, 1994). No entanto, este método, pela sua natureza destrutiva apresenta uma aplicabilidade limitada, no caso de plantas utilizadas comercialmente, como acontece nas empresas agrícolas. Uma alternativa a este processo poderá ser a avaliação do perfil radial de distribuição da densidade de fluxo de seiva. Wullschleger *et al.* (2000) utilizam este processo para corrigir a área obtida por verrumadas, mediante a utilização de um factor médio de 0.74 para as condições do seu estudo. Em Ferreira *et al.* (1998), é proposto (e aplicado em pessegueiro) um processo de cálculo do fluxo que utiliza apenas o conhecimento do perfil radial e a dimensão do tronco na zona de inserção da sonda aquecida, dispensando a medição directa da área de xilema funcional (tal como descrito na secção IV.4.3.2.2). Para obter o perfil radial, podem-se utilizar os métodos descritos em II.4.2.1 e II.4.2.4. Com efeito, a distribuição radial da densidade de fluxo de seiva pode apresentar forte heterogeneidade nalgumas espécies (p. ex., Edwards e Warwick, 1984; Hatton *et al.*, 1990; Kelliher, *et al.* 1992; Granier *et al.*, 1994; Philips *et al.*, 1996; Cermák e Nadezhdina, 1998b). Consequentemente, a simplificação que assume que a densidade do fluxo de seiva é constante em toda a área de xilema poderá não ser adequada,

sendo importante um conhecimento mais detalhado do perfil de distribuição do fluxo de seiva em função da profundidade.

O método de *Granier* apresenta a vantagem de ser relativamente pouco dispendioso, relativamente a outros métodos de medição de fluxo de seiva, permitindo aumentar o número de plantas amostradas e, conseqüentemente, obter medições de transpiração mais fiáveis ao nível da parcela. Tem-se verificado, contudo, em muitas situações a existência de uma subestimativa, quando se efectuam comparações metodológicas. Por exemplo, Lundblad *et al.* (2001) encontraram uma subestimativa de cerca de 50% quando aplicaram o método em *Pinus sylvestris* e *Picea abies*, em simultâneo com um método de balanço de calor. Wilson *et al.* (2001), comparando resultados obtidos em floresta mista de caducifólias, por este método e pelo método das flutuações instantâneas encontraram subestimativas para a transpiração de cerca de 50 a 60%, obtidas com as copas secas. Para o pessegueiro (Ferreira *et al.*, 1997a), a transpiração obtida por este método em simultâneo com o método das flutuações instantâneas e com um método de balanço de calor, mostrou também uma subestimativa superior a 30% em relação a ambos. No entanto, a medição de fluxo de seiva pelo método de *Granier* permitiu obter valores de transpiração relativa idênticos aos fornecidos com um método de balanço de calor (Ferreira *et al.*, 1996).

Noutras situações, existe porém uma concordância boa ou aceitável, nomeadamente em estudos conduzidos em floresta, quando foi utilizado o método das flutuações instantâneas (Köstner *et al.* 1992; Berbigier *et al.*, 1996; Ferreira *et al.*, 1997a) ou um método de balanço de calor (Köstner *et al.*, 1998a e b).

A modelação (recorrendo ao método das diferenças finitas para simular o campo de temperaturas em redor de um sensor linear) forneceu resultados concordantes com a equação original de *Granier*, embora com pequenas variações relacionadas com os parâmetros físicos da madeira, pelo que as subestimativas observadas em alguns casos não encontram uma justificação no âmbito desta abordagem (Thomsen e Ferreira, 2003, vd. IV.5.4 e Anexo I).

#### II.4.2.4. Método de deformação do campo de temperaturas

O método de deformação do campo de temperaturas tem sido desenvolvido por Nadezhdina e Cermák (1999) e Nadezhdina *et al.* (1998) e baseia-se na deformação do campo de temperaturas à volta de um ponto de aquecimento constante. O campo de temperaturas apresenta uma forma elipsoidal quando o fluxo de seiva se aproxima de zero e uma forma oval alongada quando a seiva se movimenta, comportamento que é detectado pela medição de temperatura em pontos estratégicos. Um par de termopares é colocado no tronco, na direcção axial e à mesma distância do ponto de aquecimento. Um outro par é colocado assimetricamente ao nível do aquecedor. O fluxo de seiva é calculado através das diferenças de temperatura, de parâmetros físicos da madeira e geométricos do conjunto de sensores. O método permite a determinação do perfil radial do fluxo de seiva no xilema condutor e,

segundo os autores, a quantificação tanto de fluxos elevados como de fluxos mais reduzidos ou nulos (Cermák e Nadezhdina, 1998a; Nadezhdina *et al.*, 1998). São apresentados resultados obtidos com este método, por exemplo, em Cermák *et al.* (1998), Cermák e Nadezhdina (1998b) e Jiménez *et al.* (2000). A análise teórica das equações utilizadas e um protótipo têm estado em desenvolvimento, no âmbito de um projecto de investigação de âmbito europeu, *WATERUSE* (EVK1-2002-00079).

#### II.4.2.5. Medição da evaporação do solo

A evaporação de água do solo ( $E_s$ ) pode ser fortemente condicionada pelo grau de humedecimento do solo e pelo grau de cobertura da vegetação. Jones (1992) refere que a evaporação de um solo húmido pode ascender a 50% da  $ET$  quando o  $LAI$  é igual ou inferior a 2. Lascano *et al.* (1987) encontraram valores para  $E_s$  de cerca de 30% da  $ET$ , para uma cultura esparsa de algodão, com um  $LAI$  próximo de 2 e em condições de clima semi-árido. Em pomares, sobretudo de baixa densidade, a evaporação pode também representar uma fracção importante da  $ET$ . Em pomar de oliveira, com um grau de cobertura do solo de cerca de 40%, Villalobos *et al.* (2000) mediram uma  $E_s$  média igual a 24% da  $ET$ , apesar de a medição ter decorrido durante um período sem rega. Bonachela *et al.* (1999) estimaram, para um pomar de oliveiras com um grau de cobertura do solo de cerca de 36%, uma  $E_s$  equivalente a cerca de um terço da  $ET$  da cultura, estimada para uma estação de crescimento. Em pomar de pessegueiro, com um  $LAI$  igual a 1.38 e um espaçamento entre plantas de 5x2 m, Ferreira *et al.* (1997a) mediram uma  $E_s$  de cerca de 18%.

Na presença deste tipo de situações, é importante proceder à quantificação de  $E_s$ , se se pretender conhecer a repartição da  $ET$  em relação à planta e ao solo. No caso das culturas lenhosas em linhas e tal como acontece relativamente ao fluxo de calor para o solo, a evaporação do solo torna-se mais difícil de avaliar do que em culturas que cubram completamente o solo e/ou de porte reduzido, dado que a área sombreada pelas copas tende a ter maiores variações ao longo do dia. O humedecimento do solo, restrito a uma determinada área, no caso da rega localizada, vem ainda tornar a questão mais complexa, uma vez que as zonas que recebem maior quantidade de água se encontram frequentemente sombreadas e têm uma representatividade espacial reduzida.

A medição da  $E_s$  separadamente, pode ser conseguida através de lisímetros, de dimensões e características variadas, sendo particularmente frequente o uso de microlisímetros, tanto em solo nú, como em solo coberto por vegetação (Boast e Robertson, 1982; Lascano *et al.*, 1987; Daamen *et al.*, 1993). Estes lisímetros apresentam dimensões reduzidas e são geralmente utilizados com amostras de solo sem vegetação, podendo ser colocados por baixo da folhagem, para obter a  $E_s$  nestas condições. A  $E_s$  pode ainda ser obtida através da diferença entre a  $ET$  e a transpiração, se ambas as medições tiverem precisão suficiente.

## II.5. Modelação da evapotranspiração

A medição da *ET* faz-se recorrendo ao uso de equipamentos caros e que requerem um elevado grau de conhecimento por parte dos utilizadores, dificultando o seu uso ao nível das actividades correntes de uma exploração agrícola ou mesmo ao nível dos organismos de apoio ao agricultor ou similares. Em aplicações práticas, a *ET* é frequentemente estimada recorrendo a modelos. Nesta secção, indicam-se de forma breve alguns modelos de estimativa de *ET* mais representativos e as potenciais limitações na aplicabilidade a cobertos descontínuos. São ainda referidos alguns exemplos de modelos simples, para aplicações na programação da rega.

### II.5.1. A equação de Penman-Monteith e o uso de coeficientes culturais

A equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965 e 1985) é, possivelmente, o processo mais utilizado para estimar a *ET*, proporcionando resultados satisfatórios num grupo alargado de cobertos. Esta equação, deriva da equação de Penman (Penman, 1948) que, por sua vez, é obtida através da combinação da equação do balanço de energia e das equações para as transferências aerodinâmicas da superfície, razão pela qual o método de estimativa da *ET*, recorrendo a esta equação, é vulgarmente designado por método combinado (vd. revisão em Allen, 1985; Ferreira-Gama, 1987). A equação de Penman permite calcular a evaporação de uma superfície livre de água ou de um coberto em que quase não existe resistência de superfície (molhado,  $\Omega$  próximo da unidade), recorrendo à medição de variáveis climáticas. A equação de Penman-Monteith introduz o conceito de resistência de superfície para o vapor de água, evitando a utilização de um factor empírico (como acontece na equação de Penman) e sobretudo permitindo generalizar o uso a qualquer superfície, em qualquer condição hídrica. Apesar da aceitação generalizada deste processo de estimativa, alguns problemas persistem, no que diz respeito a restrições relativas às condições de aplicação e às dificuldades em determinar as resistências de superfície, necessárias à aplicação do modelo (Monteith, 1985; Allen *et al.*, 1996; Ferreira, 1996a; Todorovic, 1999). Esta questão é abordada com maior detalhe na próxima secção.

Como referido no início deste capítulo, uma alternativa muito vulgarizada para a estimativa da *ET* consiste no uso combinado da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) e de coeficientes empíricos, os coeficientes culturais ( $K_c$ ). O procedimento para o cálculo da  $ET_o$  e da evapotranspiração cultural foi largamente divulgada em Doorenbos e Pruitt (1977), como resultado de um estudo desenvolvido pela FAO (*Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Irrigation and Drainage Paper 24*). Técnicos em todo o mundo calcularam as necessidades hídricas das culturas, em diferentes condições climáticas e agronómicas, de acordo com essas orientações, dado que as medições de campo da evapotranspiração são morosas e necessitam de suportes técnicos nem sempre disponíveis. Contudo, não só foram encontradas claras sobrestimativas da  $ET_o$  pelos métodos ou versões propostos (vd. p. ex.,

Ferreira-Gama, 1987), como relativamente aos coeficientes culturais também aí propostos é possível encontrar, por vezes, algumas diferenças relativamente a observações experimentais recentes. Por exemplo, em resultados da evapotranspiração estimada por este processo e medida, nomeadamente para o pessegueiro (Ferreira *et al.*, 1996 e 1997b; Snyder *et al.*, 2000) verifica-se a obtenção local de coeficientes culturais menos elevados. A metodologia apresentada em Doorenbos e Pruitt (1977) foi recentemente revista (Allen *et al.*, 1998) tendo sido alterada a forma de cálculo da  $ET_o$  (que na versão anterior originava sobrestimativas) e propostos novos procedimentos para a determinação da evapotranspiração cultural ( $ET_c$ ). O cálculo da  $ET_o$  é realizado agora utilizando a equação de Penman-Monteith, aplicada a uma superfície de relva, com valores fixos para a resistência de superfície, o albedo e a altura da cultura. Por outro lado, a nova abordagem para determinar  $K_c$  permite a separação entre os componentes do coeficiente cultural relativos à transpiração da planta e à evaporação do solo, tal como aconteceu em estudos anteriores (Ritchie, 1972; Tanner and Jury, 1976; Kanemasu *et al.* 1979). Das duas possíveis formas de cálculo da evapotranspiração cultural ( $ET_c$ ), a primeira usa um único  $K_c$  que combina os efeitos da transpiração da cultura e da evaporação do solo, usada para um cálculo semanal ou para períodos de tempo mais extensos. A segunda, combina um coeficiente de evaporação do solo ( $K_e$ ) e um coeficiente cultural basal ( $K_{cb}$ ) para obter o  $K_c$ . O  $K_{cb}$  é definido por Burman *et al.* (1980) e Wright (1982) como o coeficiente cultural associado a condições supostamente de evaporação do solo mínima, mas com disponibilidade hídrica no solo suficiente para que o crescimento da planta ou a transpiração não sejam limitados. Nesta última abordagem, o  $K_{cb}$  descreve a transpiração da planta, enquanto que  $K_e$  descreve a evaporação do solo.  $ET_c$  é então calculada da seguinte forma:  $ET_c = (K_{cb} + K_e) ET_o = K_c ET_o$ . Este procedimento, com estimativas separadas das componentes do  $K_c$  relativas à planta e ao solo, permitiria uma observação independente e uma comparação entre ambas.

### **II.5.2. A estimativa da evapotranspiração em cobertos descontínuos: particularidades**

No caso de cobertos esparsos ou estratificados surgem algumas particularidades na aplicação da equação de Penman-Monteith para a determinação da  $ET$  real. O pressuposto de que o coberto pode ser representável por uma camada uniforme de vegetação a um determinado nível, como se fosse uma folha única (*big leaf*) pode não ser válido. Neste modelo, assume-se que o plano dentro do copado onde se verifica a absorção da quantidade de movimento se situa à mesma altura que o plano para a absorção de calor. Para os copados esparsos, isto não se verifica geralmente, dado que uma fracção importante da radiação solar pode atingir níveis inferiores, originando fluxos de calor sensível e fluxos de calor latente de níveis inferiores (Tanner, 1960; Tanner e Sinclair, 1983; Allen *et al.*, 1996). A altura média do coberto e os sumidouros para o momento e a radiação são distintos das alturas médias e da

localização das origens para o calor sensível e latente. Consequentemente, existem diferenças nas resistências aerodinâmicas dentro e acima do copado (Stewart, 1983; Denmead, 1984). A conjugação numa única resistência de superfície da resistência estomática e da resistência do solo implicaria ainda que ambas se situassem ao mesmo nível, o que não se verifica. Portanto, é ignorada a resistência aerodinâmica entre a superfície do solo e a altura média a que se verifica a evaporação do copado (Allen *et al.*, 1996), que nalguns casos não é desprezável (Silvestre e Ferreira, 1995).

Mesmo que o copado fosse encarado como uma *big leaf*, persiste a dificuldade em quantificar a resistência de superfície, no caso de copados complexos, sobretudo quando em situação de défice hídrico (Allen *et al.*, 1996; Daudet *et al.*, 1998). Esta dificuldade estende-se a outros tipos de coberto, quando se pretende realizar uma estimativa da resistência do coberto, dada a escassez de modelos simples para o efeito (Ferreira e Valancogne, 1997).

Quando se recorre à equação de Penman-Monteith para o cálculo da  $ET_o$  em conjunto com o uso de coeficientes culturais, podem também surgir algumas dificuldades. Burman *et al.* (1980) salientam que os coeficientes culturais obtidos experimentalmente são, em geral, influenciados pela fisiologia da planta, pelo grau de cobertura do solo e pelas condições ambientais. Katerji *et al.* (1990) utilizaram um parâmetro que, em condições satisfatórias de humedecimento do solo e na ausência de advecção, tem características idênticas a um coeficiente cultural e demonstraram que esse coeficiente apresentava uma reduzida variação mas que, a partir de um determinado valor crítico do défice hídrico do solo, ocorria a sua diminuição. A formulação matemática deste coeficiente, por Katerji *et al.* (1990), mostrou a sua dependência da resistência estomática do coberto. Para a aplicação de coeficientes culturais, será então importante conhecer a forma como foram obtidos. Quando o  $K_c$  incorpora informação conjunta relativamente ao solo e à planta, torna-se mais difícil a sua utilização em condições diferentes das obtidas. O  $K_c$  pode ser específico de um conjunto de determinadas práticas culturais, em consequência de diferenças relativas às datas de plantação (para plantas anuais), às características varietais, à densidade das plantas (Ritchie e Johnson, 1990), bem como ao modo de rega. Se a abordagem seguida fizer intervir o uso de  $K_{cb}$  e de  $K_e$  (tal como definido em II.5.1) para a determinação do  $K_c$ , é possível, pelo menos, separar o efeito do solo e realizar uma melhor adaptação do método às condições específicas que estamos a considerar. Isto, porque a evaporação do solo pode representar uma contribuição muito variável para a  $ET$ , dependendo da área de solo exposto, do tipo de solo e do sistema de rega. Existem por exemplo, diferenças marcadas na  $E_s$  de um solo regado em toda a sua superfície ou regado por um sistema gota-a-gota. O procedimento com estimativas separadas das componentes do  $K_c$  relativas à planta e ao solo, permite uma observação independente e uma comparação entre ambas e embora seja uma abordagem simplificada, a linha de trabalho mais razoável a seguir será provavelmente esta.

No caso dos cobertos arbóreos, dadas as características distintas que possuem, em relação a outras culturas agrícolas, como por exemplo os cereais (maior altura, estrutura mais

complexa, frequente cobertura incompleta do solo, elevada exposição ao vento e relativamente baixa condutância estomática), os mecanismos de transferência de calor e massa no interior do copado vão também ser diferentes. Segundo Daudet (1999), a utilização de coeficientes culturais em conjugação com a determinação de uma expressão padrão da procura climática não é adequada para o cálculo das necessidades hídricas destes cobertos, sugerindo em alternativa a utilização de modelos multi-camadas ou tridimensionais.

Existem alguns estudos que comparam os resultados obtidos seguindo o procedimento descrito em Allen *et al.* (1998) com os encontrados com outras metodologias. Por exemplo, Casa *et al.* (2000) recorreram ao método da razão de Bowen, na cultura do linho, tendo encontrado uma boa concordância. Allen *et al.* (2000) estudaram a aplicação a uma superfície extensa de diversas culturas, onde se inseriam alguns pomares de pessegueiro, comparando os resultados com os obtidos por detecção remota, tendo encontrado uma sobrestimativa por vezes superior a 20% para a *ET*. Apesar de a metodologia actual (Allen *et al.*, 1998) possibilitar de forma mais detalhada o acesso à informação sobre a evaporação do solo, Lascano (2000) observou que, na cultura do algodão, numa situação de *LAI* inferior a 3 e com um sistema de rega de alta frequência, o método não conseguiu descrever adequadamente a *ET* diária, mostrando uma certa insensibilidade para captar a natureza dinâmica do processo de evaporação. Uma comparação deste tipo será apresentada neste trabalho em V.4.

### **II.5.3. Estimativa da evapotranspiração em cobertos descontínuos: as alternativas**

Na estimativa da transpiração e da  $E_s$  em conjunto, como alternativa à utilização dos modelos referidos em II.5.1. (utilização da evapotranspiração de referência e de coeficientes culturais) ou a modelos mais elaborados (vd. pág. 42), podem utilizar-se modelos de base física mas simplificados (mais facilmente adaptáveis a uma utilização prática do que os modelos mecanicistas) ou modelos empíricos de uso mais restringido ao tipo de condições climáticas e agronómicas em que foram obtidos.

A estimativa da *ET* pode realizar-se procedendo separadamente à estimativa da transpiração e da  $E_s$ . Aborda-se inicialmente a estimativa da *ET* a partir desta separação de componentes e, nomeadamente, no que diz respeito à  $E_s$ .

Nos cobertos descontínuos, dada a fracção de solo exposto à radiação e como abordado em II.4.2.5, a  $E_s$  pode representar uma parte importante da *ET*. A existência de modelos de estimativa da  $E_s$  revela-se desta forma útil nalgumas situações. Têm sido propostos vários modelos mecanicistas para estimar  $E_s$ , como, por exemplo, o modelo SWEAT (Daamen e Simmonds, 1996; Daamen, 1997). Este é constituído por um modelo de simulação dos fluxos de água e de calor no solo, combinado com um modelo interactivo de estimativa de *ET* que considera separadamente os fluxos de vapor de água libertados pela planta e pelo solo para a atmosfera. Os modelos deste tipo, apesar de baseados em relações

matemáticas e na descrição física dos processos, requerem frequentemente um conjunto de dados alargado na sua aplicação, o que dificulta a utilização corrente. Uma revisão sobre estes modelos pode ser encontrada em Allen *et al.* (1996) e Conceição (2001). Os modelos empíricos são menos frequentes; uma revisão feita por Ritchie e Johnson (1990) aborda esta questão. O modelo desenvolvido por Ritchie (1972), já referido anteriormente, adaptado a culturas em linhas com cobertura incompleta do solo, baseia-se em conceitos inicialmente desenvolvidos por Black *et al.* (1969) e permite estimar a  $E_s$  em solo nú e em solo (total ou parcialmente) coberto por vegetação. Este modelo parte do pressuposto da existência de duas fases relevantes no processo de dessecação do solo (Philip, 1957), como abordado no início deste capítulo. Durante a primeira fase, a  $E_s$  é considerada idêntica à  $E_s$  potencial ( $E_{pot}$ ) enquanto que, durante a segunda, a  $E_s$  acumulada pode ser descrita pela seguinte equação (Black *et al.*, 1969):

$$\sum E_s = \alpha t^{1/2} \quad (\text{II. 16})$$

em que  $\alpha$  é um parâmetro dependente das características hidráulicas do solo, que pode ser determinado experimentalmente durante um ciclo de dessecação do solo e  $t$  representa o número de dias desde o início da segunda fase. Assume-se que  $E_s$  na zona coberta pela vegetação é semelhante à  $E_s$  de um solo nu dado que, nesta fase, o processo depende mais das características hidráulicas do solo do que da energia disponível. Pieri *et al.* (1995) utilizaram este modelo em vinha para a determinação da  $E_s$  do solo nú intercalar (da entrelinha); mesmo aplicado de forma grosseira, conduziu a resultados satisfatórios. Foi também utilizado por Villalobos (1999), com resultados satisfatórios em pomar de oliveiras, com rega gota-a-gota, e uma percentagem de cobertura do solo de cerca de 40%.

Um outro modelo simples desenvolvido por Boesten e Stroosnijder (1986) e testado por Stroosnijder (1987) relaciona a evaporação acumulada com a raiz quadrada da evaporação potencial, em vez de utilizar a raiz quadrada do tempo, dado desta forma terem sido obtidos melhores resultados para condições de campo, em solo mobilizado. Usando esta relação, é possível calcular um parâmetro característico da evaporação do solo ( $\beta_e$ ), que permite estimar a evaporação real a partir da evaporação potencial ( $E_{pot}$ ). O parâmetro  $\beta_e$  representa o declive da relação linear entre  $\sum E_s$  e  $(\sum E_{pot})^{1/2}$ . Conhecendo o parâmetro  $\beta_e$  e tendo como ponto de partida um dia em que ocorra precipitação, a evaporação do solo é então calculada por:

$$\sum E_a = \sum E_{pot} \quad \text{para a primeira fase} \quad \left( \sum E_{pot} < \beta_e^2 \right) \quad (\text{II. 17})$$

$$\sum E_a = \beta_e (\sum E_{pot})^{1/2} \quad \text{para a segunda fase} \quad \left( \sum E_{pot} \geq \beta_e^2 \right) \quad (\text{II. 18})$$

Para uma situação de pomar de pessegueiro, com rega por aspersão, Ferreira *et al.* (1997a) desenvolveram um modelo empírico, a partir de medições em lisímetros, realizadas em solo arenoso. O modelo, da forma:

$$E_s = 0.12 e^{-0.267N} ET_o \quad (\text{II. 19})$$

sendo N o número de dias após a rega e 0.12 a área de solo molhada, permitiu obter resultados satisfatórios nas condições daquele estudo. O modelo de Boesten e Stroosnijder (1986) foi testado mas verificou-se que não era adequado às condições do estudo.

Numa cultura que não cobre completamente o solo, a modelação desta não parece ser abordável sem que a  $E_s$  e a transpiração sejam consideradas separadamente (Tanner e Jury, 1976). No caso das culturas baixas em linhas, esta abordagem foi apresentada em primeiro lugar por Ritchie (1972), que desenvolveu um modelo, aplicável a culturas anuais, baseado em relações semiempíricas obtidas a partir de medições em condições naturais. Neste modelo, além da separação entre a transpiração e a  $E_s$ , é também considerada separadamente a estimativa da  $E_s$  por baixo do copado, obtida a partir do défice da pressão de vapor e da radiação líquida abaixo da copa, estimada, por sua vez, a partir da medição do índice de área foliar. A separação de componentes foi também utilizada posteriormente em modelos desenvolvidos por Tanner e Jury, (1976) e Kanemasu *et al.* (1979).

Mais recentemente, Gallardo *et al.* (1996) estabeleceram um modelo simples para uma cultura em linhas de alface, com um grau de cobertura do solo reduzido. Este modelo resultou da necessidade de otimizar a estimativa da  $ET$ , face ao risco económico elevado decorrente da rega insuficiente da cultura, quando as necessidades de rega eram calculadas a partir de coeficientes culturais e da  $ET_o$ . O modelo estima separadamente a transpiração e a evaporação do solo. A transpiração é obtida a partir de uma estimativa da  $ET$  máxima da cultura e da fracção de radiação interceptada pela vegetação que por sua vez é estimada por uma relação empírica, a partir do grau de cobertura. A evaporação do solo entre duas regas é estimada a partir de um modelo modificado, baseado no modelo de Ritchie (1972), adaptado por Stroosnijder (1987), tendo a  $ET_o$  como dado de entrada. Utilizando este tipo de abordagem, os autores verificaram uma melhoria da estimativa da evaporação do solo, em relação aos modelos anteriores, representando esta uma parte importante da  $ET$ .

Recorrendo também à separação de componentes, Tournebize *et al.* (1996) desenvolveram um modelo aplicado a uma cultura conjunta de uma leguminosa arbustiva disposta em linhas (*Gliricidia sepium*) com um sobcoberto de pastagem de uma gramínea tropical (*Dichanthium aristatum*). O modelo produziu boas estimativas para a  $ET$ , através da realização do balanço de energia à superfície do solo e à superfície das folhas, tanto de uma espécie, como de outra e considerando distintamente a folhagem exposta ao sol e a ensombrada.

Para cobertos com maior desenvolvimento vertical, os modelos de estimativa de  $ET$  consideram por vezes a existência de várias camadas no coberto (além de considerarem a separação entre a transpiração e a  $E_s$ ), cuja contribuição analisam separadamente (vd., p. ex.,

Daamen *et al.*, 2000; Sharma, 1985). Nestes modelos, que possuem um certo grau de complexidade, para cada camada são tidos em conta  $r_s$ ,  $r_a$ , a área foliar, características de exposição à radiação e de extinção desta. Exemplos de modelos deste tipo são os desenvolvidos por Shuttleworth (1979) e Lhomme (1988), requerendo uma grande quantidade de informação para a sua utilização. Um modelo mais simplificado foi desenvolvido, por exemplo, por Shuttleworth e Wallace (1985). O modelo de Shuttleworth e Wallace (1985) adapta-se a cobertos de baixa densidade e adopta uma estrutura com duas componentes, conduzindo a uma repartição da energia entre a cultura e o solo. Este modelo permite estimar a evaporação quando se encontram disponíveis medições ou submodelos da altura da cultura, da área foliar, das diversas resistências à passagem dos fluxos de vapor de água, da intercepção da radiação e do fluxo de calor sensível para o solo.

No âmbito dos cobertos descontínuos, a aplicação de modelos simples ou empíricos tem sido restrita, não sendo frequentes os exemplos patentes na bibliografia. Ferreira e Valancogne (1997), na sequência de estudos apresentados em Ferreira *et al.* (1989) e Ferreira (1996b), referem a aplicação de um modelo simples para a determinação da  $ET$  diária, para as culturas do tomate e do pessegueiro. Este modelo é aplicável em condições em que se restringe o fornecimento de água, verificando-se um défice hídrico moderado. Nestas condições, a  $ET$  real é inferior à  $ET$  máxima da cultura, sendo necessário utilizar um coeficiente de secura ( $K_s$ ) para adequar a estimativa de  $ET$  obtida por  $ET = K_c ET_o$ . O modelo pressupõe o conhecimento de  $ET_o$  e  $K_c$  e a relação entre o decréscimo da  $ET$  (em resultado de défice hídrico) e a depleção de água do solo, quantificada como a  $ET$  acumulada desde a última rega. Este modelo permite a estimativa do consumo hídrico diário, desde que conhecida a  $ET$  máxima da cultura e permite a determinação da oportunidade da rega, desde que seja determinado um limiar crítico para o desencadeamento do processo. Apresenta-se posteriormente (V.2) uma aproximação deste tipo, para a cultura estudada.

Em síntese, para os cobertos descontínuos, a utilização de modelos simples de estimativa da  $ET$  tem sido pouco estudada. Dado que os modelos mecanicistas requerem um conjunto de informação apreciável e possuem um grau de complexidade elevado, não parece plausível a sua utilização tendo em vista a programação da rega. Num contexto agrícola ou de gestão dos recursos hídricos em geral, será desejável a utilização de modelos que requeiram um conjunto de dados de entrada, cujo processo de obtenção se mostre suficientemente simples e expedito, de forma a ser exequível a sua utilização. Persiste então a necessidade de alargar o conhecimento sobre a modelação dos cobertos descontínuos, nomeadamente os agrícolas, como as vinhas e pomares, orientada para o desenvolvimento de ferramentas úteis na programação da rega. Para estes cobertos, o recurso a modelos simples e ajustados devidamente poderá permitir uma estimativa adequada das necessidades hídricas das plantas, tanto no que diz respeito à racionalidade económica, como no que se relaciona com a sustentabilidade da utilização da água, enquanto recurso a preservar.

É este o desafio que está na base deste trabalho.



### III. MATERIAIS E MÉTODOS

#### III.1. Objecto de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido num pomar de pessegueiros (*Prunus persica* (L.) Batsch) inserido numa área de cerca de 60 hectares, propriedade da empresa J. P. Vinhos, Lda.. A propriedade encontra-se localizada a cerca de 15 km a Este da cidade do Montijo, perto das aldeias de Atalaia e de Rilvas (latitude 38° 42' N, longitude 8° 48' O, aproximadamente ao nível do mar) (Figura III.1). O trabalho experimental decorreu sobretudo durante o Verão, dos anos de 1998 e 1999, tendo-se realizado ainda uma pequena parte no ano de 2001.

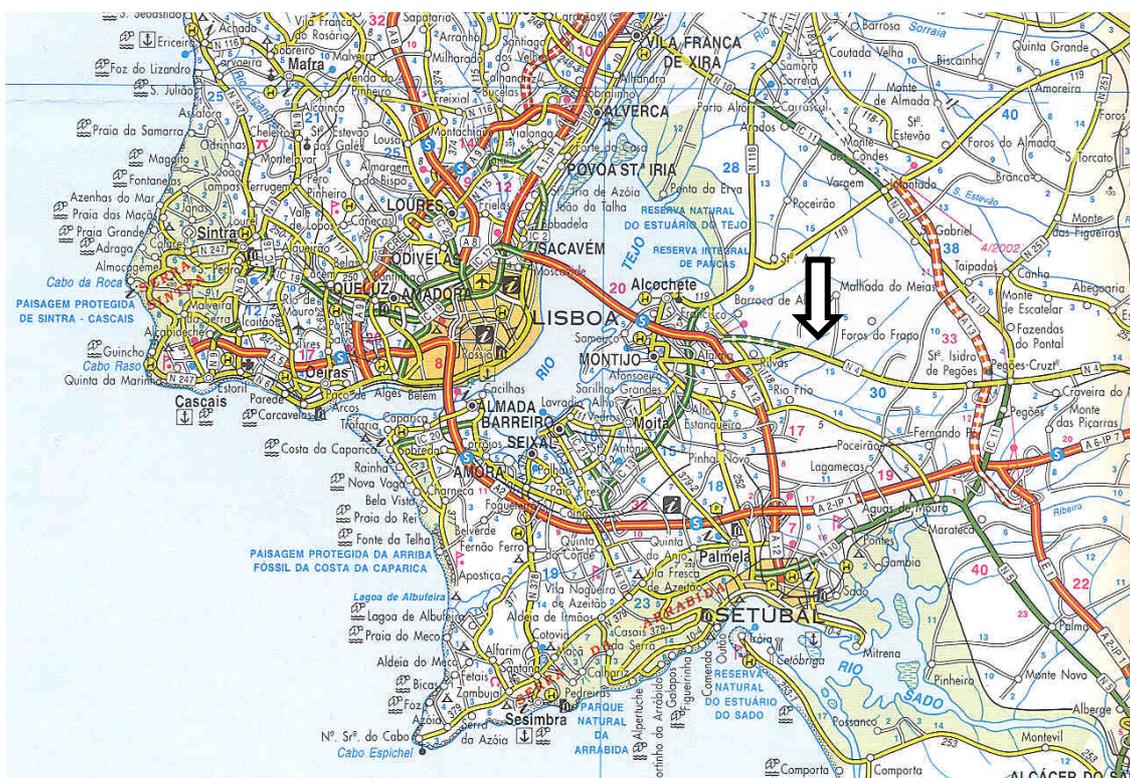


Figura III.1 – Localização do pomar de pessegueiros onde decorreu o trabalho experimental.

A zona escolhida para implantação do ensaio experimental teve em atenção a existência de uma superfície uniforme de extensão suficiente na direcção dos ventos dominantes, para a realização de medições pelo método das flutuações instantâneas. A parcela escolhida localizou-se na zona sudoeste do pomar tal como indicado na Figura III.2. Na selecção da parcela foram também tidas em conta as características das árvores, nomeadamente dos troncos (de forma a possibilitar a medição do fluxo de seiva das plantas), bem como boas práticas culturais, adequadas condições logísticas para a realização das experiências (apoio, segurança, acessibilidade, abastecimento de energia eléctrica, etc.) e possibilidade de manipulação da rega em determinados períodos da experiência.



Figura III. 2 – Ortofotomapa do local onde foram realizados os ensaios experimentais (ver também Figura III.22); a seta branca assinala a parcela onde foram colocados os sensores e a sua direcção corresponde à do vento dominante.

### III.1.1. Caracterização do coberto vegetal e rega

A superfície do pomar era maioritariamente ocupada por pessegueiros, existindo ainda algumas áreas de menor extensão ocupadas por ameixeira. As árvores sobre as quais recai este estudo eram da variedade *Silver King* (Figura III.3) colocada no porta-enxerto *GF 677* e foram plantadas em 1996, com um compasso de 5 x 2 m. Esta variedade é uma nectarina de polpa branca, que apresenta maturação precoce.



Figura III.3 – Fotografia dos frutos de pessegueiro da variedade *Silver King*.

Neste pomar, a colheita decorria habitualmente no início de Junho. Em 1998, a produção ascendeu a cerca de 18 ton/ha e em 1999 a 13 ton/ha. As árvores encontravam-se dispostas sobre um cômodo (vd. Figura III.4) e presas a arames, colocados a cerca de 1.2 m e 2.3 m acima da superfície do cômodo. Durante as observações, a altura média dos ramos mais altos era de cerca de 3.0 a 3.5 m, acima do nível da superfície do solo na zona da entrelinha.



Figura III.4 – Aspecto das linhas de plantação do pomar em estudo.

O diâmetro médio do tronco, obtido por medição directa de todas as árvores da parcela em estudo, era igual a 5.5 cm (Janeiro de 1998) (desvio padrão:  $\pm 1.1$  cm). A medição foi efectuada num nível médio do tronco (entre o solo e o início da ramificação), na zona habitualmente utilizada para a inserção das sondas de fluxo de seiva.

A Figura III.5 apresenta as dimensões relativas do diâmetro do tronco para todas as árvores da parcela em estudo, obtidas através da divisão pelo diâmetro médio. Pela sua observação é possível inferir a localização das falhas e obter uma indicação, embora aproximada, da representatividade das árvores no que diz respeito às suas dimensões.

As linhas estavam orientadas segundo uma direcção que fazia um ângulo de  $13^\circ$  com a direcção norte ( $13^\circ$  NNE) e os ventos dominantes na região, no Verão, são geralmente oriundos do quadrante formado pelas direcções norte e oeste, como se pôde comprovar (vd. Figura III.10 adiante).

O sistema de rega era um sistema gota-a-gota, com gotejadores espaçados de um metro (2000 gotejadores/ha), suspensos sobre a linha, a cerca de 0.3 m da superfície do cômodo. Foi utilizado um udómetro ARG100 (*Environmental Measurements Ltd.*, Sunderland, Reino Unido), localizado por baixo de um gotejador, com o objectivo de medir a dotação de rega utilizada e controlar a ocorrência e duração das regas diárias. O débito de cada gotejador era de cerca de 3.5 litros por hora. A rega, geralmente controlada pelo

produtor, ocorria ao princípio da noite. Em 1998, a dotação foi em média de 4 mm e decorreu de acordo com o esquema da Figura III.6. Em 1999, foi de cerca de 4.5 mm até ao dia 3 de Agosto e de cerca de 1 mm depois desse dia (Figura III.7). A seguir à rega, a área molhada era cerca de 6.4% da área total, localizando-se na linha de árvores, por baixo das copas.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	0.9	0.4	1.3	1.4	1.2	1.1	1.1	1.1	1.0	0.9	1.2	0.9	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	0.9	1.1
2	1.0	1.5	0.7	0.8		1.2	1.2	1.0	1.0	1.1	0.9	1.1	1.0	0.7	0.6	1.0	1.0	0.9	1.1
3	0.9	1.2	1.3	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	1.0	0.8	1.1	1.2	1.0	1.1	1.1	0.9	1.0	1.1	1.0
4	1.0	1.2	1.0	1.0		1.2	1.2	1.2	0.9	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.2	1.0	1.2	1.0	1.2
5	1.0	1.5	1.3	1.1		1.3	1.2	1.1	1.2	0.9	1.0	1.0	0.6	1.1	0.7	1.0	1.1	1.1	1.2
6	1.2	1.0	1.1	1.0		0.6		1.1	0.9	0.9	0.9	1.1	1.2	1.2	1.3	1.0	1.0	0.9	1.1
7	1.0	1.2	1.0	1.1	1.2	1.2	1.4	1.0	1.0		1.1	0.5	1.0	1.1		0.9	0.8	0.9	1.0
8	1.3	0.4	1.2		1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	0.5	1.0	0.9	1.2	1.1	0.4	1.2	0.3	0.9	1.0
9	0.9		0.5		1.2	0.5	1.1	1.1	1.0	0.5	1.0	1.2	1.1	0.9	1.2		1.0	0.8	1.0
10	1.0	1.4			1.2	0.9	0.9	1.0	0.9		1.0	0.8	1.0	1.0	1.0		0.7	0.4	1.1
11	1.3	0.8	1.2			1.2	1.0	0.8	1.0	1.0	0.8	1.1	0.9	1.1	1.0	1.1	0.8	1.0	1.1
12	1.2	0.5				1.1	1.1	1.0	1.1	0.3	0.5	1.2	0.7	0.5	1.0	1.0	0.7	1.0	1.1
13	0.7	1.2	0.4			1.0	1.4	1.0	1.2	1.4	1.2	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0
14	1.0	1.2	0.4			1.1	1.0	0.8	0.3	0.4	0.8	1.2	1.1	1.1	1.0	0.6	0.8	1.0	1.1
15	1.0	1.2	0.4			1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	0.9	1.2	0.8	1.0	1.0
16	1.0	1.3	1.4	1.1	1.4	1.4	1.0	1.2	1.0	1.1	1.2	1.0	1.2	1.0	1.2		0.8	1.0	0.4
17	1.1	1.2	1.2	1.2	▼	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	1.0	0.9	1.0	1.0	1.1	0.9	0.8	1.0
18	1.1	1.1	1.3	1.2	1.3	1.0		1.4	1.0	1.1	0.5	1.1	1.0	1.0	1.2	1.0	0.9	0.8	0.9
19	1.2	1.2	1.2	0.7	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.0	0.9	1.2	1.0	1.0	1.1	1.0	0.6	0.9	0.9
20	1.2	1.2	1.4	1.2		1.0	1.1	1.1	1.2	1.0	1.1	1.2	1.2	1.0	0.8	1.2	0.8	0.9	
21	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	0.7	1.0	1.1	1.2	1.0	1.1	0.8	1.1	1.1	1.0	0.9	0.8	0.9	1.0
22	1.2	1.1	0.7	1.1	1.2	1.1	0.4	1.0	1.0	0.7	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9	0.8	0.8
23	1.1	1.2	1.2	0.6	1.2	1.2	1.0	1.1	1.2	1.0	1.0	1.2	1.1	0.9	0.9	0.9	0.7	1.1	0.8
24	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	1.2	1.0	1.1	1.0	1.0	0.8	1.0	1.0	1.0	0.9	0.7	1.0	1.0
25	1.2	1.2	1.0	1.1		1.1	0.9	1.3	1.1	1.0	1.0	1.2	1.0	1.1	1.0	0.4	0.8	0.9	1.0
26	1.4	1.3	1.1	1.0	1.2	1.2	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	0.3	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	1.2	0.6
27	1.2	1.3	1.1	1.2	1.2	1.0	1.0	1.2	1.1		1.0	1.1	0.8	1.0	1.1	1.3	0.6	0.2	1.1
28	0.9	0.5	1.0	1.1	1.1	0.9	1.1	1.0	1.1	0.3	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	0.6	0.8	1.0	1.0
29	1.1	1.0	1.2	1.1	1.2	1.0	1.1	1.1	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	0.9	0.3	1.0
30	1.2	1.0		1.2	1.1	0.9	1.1	1.1	1.2	1.0	1.2	0.9	1.1	1.0	0.3	1.0	0.9	0.8	1.0
31	1.2	1.1	1.4	1.2	1.4	1.0	1.0	1.1	1.2	1.0	1.2	1.0	1.1	1.0	1.3	0.8	0.9	0.3	0.6
32	1.2	1.0	1.1	0.6	1.1	1.3	1.3	1.2	1.2	0.7	1.3	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.7
33	1.2	1.1	1.0	1.4	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.1	0.6	1.1	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.7
34	1.0	0.9	1.2	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.0	1.2	1.2	0.9	1.1	1.0	1.1	1.0	0.8	0.3	0.9
35	1.2	1.1	1.0	1.1		1.2	1.0	1.2	1.0		1.2	1.0	1.0	1.0	1.1	0.9	0.7	0.7	0.8
36	0.2	1.0	1.1	1.1		1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.0	1.1	1.1	0.9	0.7	1.0
37	1.2	1.0	1.0	1.1		1.0	1.0	1.1	1.1	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.7	0.6	0.3
38	1.0	1.1	1.1	1.0		1.1	1.1	1.2	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	0.8	0.7	0.7	0.8
39	1.2	1.2	1.1	1.0		0.9	1.2	1.0	1.0	1.1	1.0	0.8	1.0	0.9	1.1	1.1	0.7	0.8	0.6
40	0.9	1.1	1.0	1.0		1.0	1.2	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.4	1.0	1.1	1.1	0.8	0.7	0.8
41	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.2	1.0	1.0	1.0	0.6	1.0	1.0	0.8	1.0		1.0
42	1.0	1.0	0.8	0.9	1.1	1.0	1.1	1.1	1.2	0.8	1.0	1.0	0.6	0.9	1.1	1.2	0.4	0.8	0.8
43	1.0	1.2	1.2	1.0	0.9	0.8	1.0	1.2	0.9	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	0.8	0.8
44	1.0	0.6	1.0	1.2	1.0	1.2	1.1	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	0.9	1.1	1.0	0.8	0.8
45	1.0	1.1				0.9	1.2	1.0	1.1	1.0	1.1	0.9	1.2	1.0	1.0	0.8	1.0	0.7	0.7
46	1.1	0.3	1.0	1.1	1.0	1.1	0.5	1.0	1.8	0.9	1.0	0.9	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	0.8	0.6
47	0.5	1.2		1.0		1.1	1.3		1.1	1.1	1.2	0.9	1.1	1.1	1.2	1.0	1.0	0.9	
48	1.1	1.0	1.0	1.1		0.5			1.1	1.0	1.1	0.9	0.6	0.9	1.1	1.3	1.1	0.6	1.0
49	1.0	1.1	0.9	1.1		1.0		0.5	1.0	1.0	1.2	1.0	1.1	0.8	1.0	0.8	1.2	1.1	0.7
50	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0	1.4	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.0	0.9
51	0.6	1.1	1.1	1.2			1.3	0.6	1.0	1.0	1.2	1.2	1.0	1.0	1.1	1.1	1.3	1.0	1.0
52	1.0	1.0	1.0	1.2		0.5		1.1	1.2	1.0	1.2	0.9	1.0	1.2	1.2	1.0	1.2	1.0	1.0
53	1.1	1.2	1.0	1.1	1.4				0.9	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	0.3	1.1	1.0
54	1.1	1.0	1.0	1.1		1.2	1.4	0.3	1.0	0.9	1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	0.8	1.1	1.2	1.0
55	0.9	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.3	1.0	0.9	1.1	1.0	1.0	0.9	1.2	0.3	1.0		0.3
56	1.2	1.0	1.0	1.1		0.6	1.2	0.5	1.1	0.9	1.0	0.5	1.1	0.9	1.2	0.2	1.0	1.1	1.0
57						1.0	1.2		1.0	0.8	1.1	0.8	1.1	0.8	1.2	0.7	1.1	1.1	1.0
58										1.0		0.8	0.8		0.4	1.1	1.0	0.5	0.9
59															1.0	0.9	1.0	0.9	0.7
60															1.0	0.9	1.0	0.9	

Figura III.5 – Dimensões do diâmetro do tronco de cada árvore em relação à média de todas as árvores da parcela; as letras indicam as linhas de árvores e os números a posição na linha; as células sombreadas indicam as árvores amostradas, 1998: D-40 (12), D-41 (11), D-43 (10), D-44 (9), D-48 (8), D-49 (7) – amostra submetida a stress hídrico, H-30 (6), H-32 (5), H-34 (4), H-36 (3), H-40 (2), H-41 (1) – amostra de parcela regada, 1999: D-29 (6), D-35 (9), E-30 (7), E-34 (8), E-42 (10) – amostra submetida a stress hídrico, G-28 (1), G-34 (2), G-38 (3), G-41 (4), G-44 (5) – amostra de parcela regada; as células vazias indicam falhas ou árvores de dimensão muito reduzida; ▼ indica a localização da torre de observações (vd. III.2 para esclarecimentos).

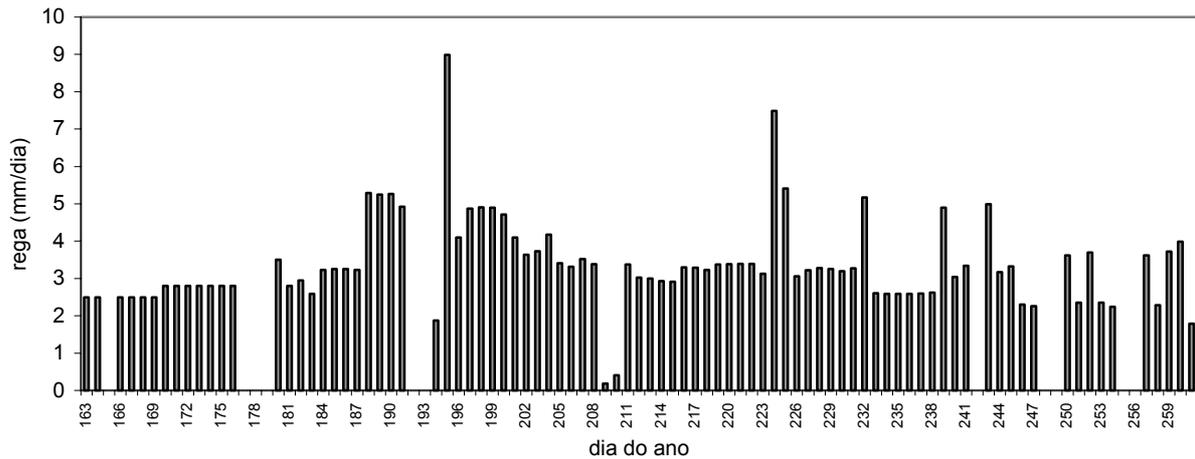


Figura III.6 – Rega do pomar em 1998.

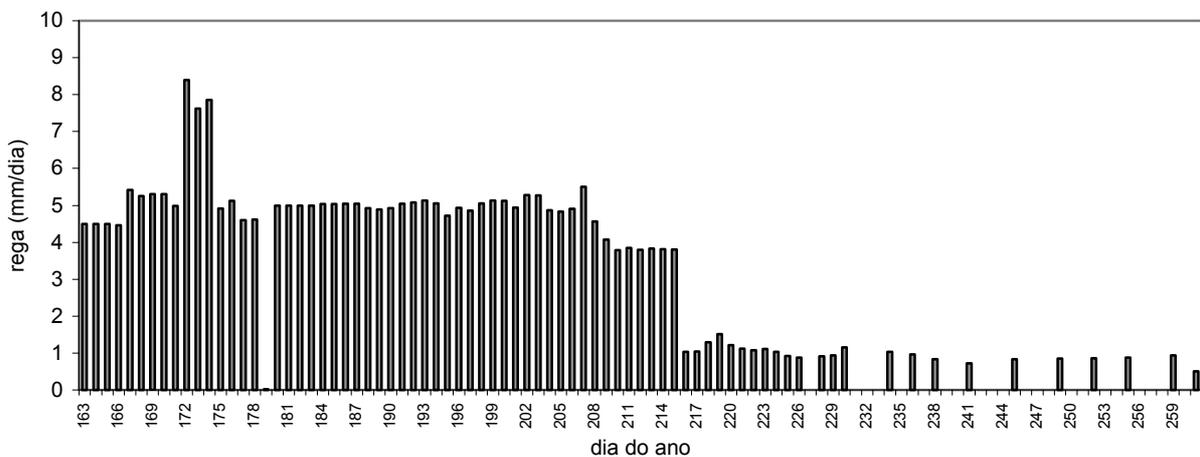


Figura III.7 – Rega do pomar em 1999.

Em 1998, numa linha de árvores intencionalmente submetida a *stress* hídrico a rega foi cortada durante os seguintes períodos:

- 24 de Junho, dia do ano 175 (vd. Anexo III) (última rega na noite de dia 23, dia do ano 174) a 2 de Julho, dia do ano 183 (a rega recomeçou no dia 3 à noite, dia do ano 184) incluindo 4 árvores onde se mediu a transpiração;
- 10 de Julho (dia do ano 191) a 18 de Julho (dia do ano 199), incluindo 6 árvores onde se mediu a transpiração;

Em 1999, procedeu-se também à realização de dois ciclos de *stress* hídrico, utilizando critérios semelhantes aos de 1998, durante os seguintes períodos, abrangendo 5 árvores onde se mediu a transpiração:

- 15 de Junho, dia do ano 166 (última rega na noite de dia 14, dia do ano 165) a 22 de Junho, dia do ano 173 (a rega recomeçou no dia 23 à noite, dia do ano 174);
- 21 Julho (dia do ano 202) a 28 Julho (dia do ano 209).

### III.1.2. Caracterização climática e observações das variáveis meteorológicas

Nesta secção é feita (1) uma caracterização do clima do local onde se realizou o trabalho experimental, (2) uma caracterização das condições meteorológicas durante a realização dos ensaios e a sua comparação com as encontradas para um ano médio e (3) uma verificação da concordância entre as medições meteorológicas na parcela e as efectuadas em estações meteorológicas próximas, tendo em vista o cálculo da  $ET_o$ . Optou-se por juntar nesta secção a caracterização climática do local e as observações meteorológicas realizadas, dado ter sido necessário comparar a informação meteorológica obtida a partir de estações próximas com a obtida localmente.

A caracterização climática do local foi feita com base nos dados publicados das estações climatológicas do Instituto de Meteorologia, mais próximas (Montijo/ Base Aérea – 38° 42' N, 9° 03' W; Pegões – 38° 38' N, 8° 39' W) e de acordo com a classificação climática de Köppen (Reis e Gonçalves, 1981; Peixoto, 1987). Os dados das estações climatológicas são referentes ao período 1951-1980 (INMG, 1991). Foram consideradas estas duas estações e não apenas uma delas, dada a distância de cada uma ao local de estudo ser similar.

A tabela III.1 apresenta os valores médios anuais das principais variáveis meteorológicas.

Tabela III.1 – Principais variáveis meteorológicas para as estações climatológicas de Montijo/ Base Aérea e Pegões, valores médios para o período de 1951-1980 (INMG, 1991); humidade relativa do ar (TU).

	Montijo/ Base Aérea	Pegões
Temperatura média anual (°C)	16.2	15.6
Temperatura média do mês mais quente (°C)	22.5	22.0
Humidade relativa do ar, média anual (%)		
9 h	80	78
15 h	63	-
18 h	-	66
Precipitação média anual (mm)	576.9	708.0
Evaporímetro de Piche média anual (mm)	1011.9	1347.2
Velocidade do vento média anual ( $m s^{-1}$ )	4.3*	1.7**
(altura do anemómetro: * 19.2 m, ** 6 m)		

De acordo com as variáveis climáticas analisadas e segundo a classificação de Köppen, o clima é mesotérmico húmido com estação seca no Verão. A estação de Pegões situa-se numa situação de transição entre um Verão quente (Csa) e pouco quente mas extenso (Csb), enquanto que a estação do Montijo/Base Aérea apresenta um Verão quente (Csa).

No local de estudo foram instalados sensores meteorológicos (ver descrição em III.10) que permitiram a monitorização das principais variáveis meteorológicas (temperatura, humidade, velocidade e direcção do vento e radiação, mas observadas acima do coberto a uma altura de 3.5 m ou de 6 m, no caso da radiação).

A temperatura média mensal do ar, medida localmente, apresentou valores próximos das médias calculadas para 30 anos, com base em dados das estações climatológicas mais próximas, tanto em 1998, como em 1999 (Figura III.8 (a)). A maior diferença regista-se para

Junho de 1999, em que na Atalaia a temperatura média (21.5°C) foi ligeiramente superior às médias de 30 anos para a temperatura das estações climatológicas: 19.4°C (Pegões) e 20.2°C (Montijo), respectivamente. No mês de Julho a temperatura ronda os 22°C em todas as situações. No mês de Agosto oscila entre os 22 e os cerca de 23°C. No mês de Setembro rondou os 20°C na Atalaia, enquanto nas estações climatológicas a média de 30 anos se aproxima dos 21°C. A média do mês de Junho, referente à zona do ensaio experimental não é representada no gráfico dado o registo se ter iniciado no dia 9 desse mês. Para o período compreendido entre o dia 9 e o final do mês, a temperatura média do ar foi de cerca de 20° C.

Para a comparação dos registos de humidade relativa do ar, utilizou-se a média mensal dos valores medidos localmente às 9 horas (TU) e os correspondentes valores, obtidos à mesma hora, das estações climatológicas, dado serem considerados uma boa aproximação da média diária observada (Reis e Gonçalves, 1981). Verifica-se que os valores medidos localmente se aproximam bastante das médias obtidas para o período 1951-1980 (ver Figura III.8 (b)). Os valores observados localmente em Junho (1998 e 1999) dizem respeito a períodos inferiores ao mês, não sendo incluídos no gráfico. Em 1998 a média observada para o período de 10 a 30 de Junho foi de 62% e em 1999, para o período compreendido entre 12 e 30 de Junho, foi de 63%.

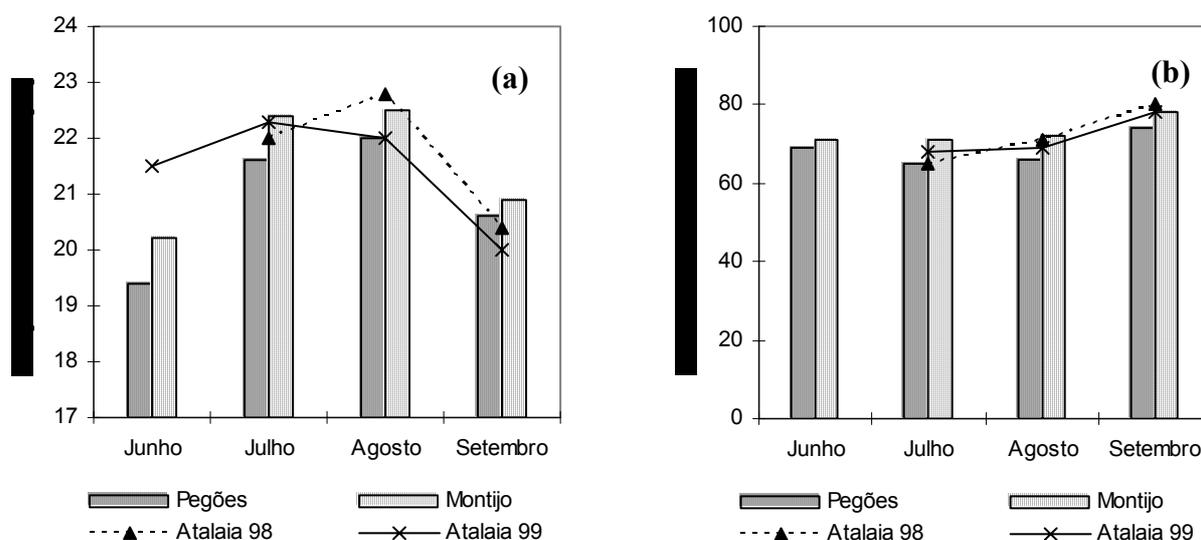


Figura III.8 – (a) temperatura média mensal do ar; (b) humidade relativa média mensal nas estações climatológicas de Pegões e do Montijo/ Base Aérea, média de 30 anos e medida localmente, durante os anos referidos.

A velocidade média mensal do vento, medida localmente (Figura III.9) apresenta valores ligeiramente inferiores aos observados na estação de Pegões. Nesta estação, as medições foram realizadas a 6 m de altura, tendo-se aplicado a equação do perfil logarítmico do vento, para ajustar os dados obtidos para a altura padrão de 2 m. O mesmo procedimento foi efectuado para a estação de Montijo/ Base Aérea, onde as medições foram realizadas a 19.2 m. Esta estação apresenta velocidades mais elevadas, cerca de 1.5 m s<sup>-1</sup> superiores às registadas localmente. Tal poderá estar relacionado com a proximidade de uma massa de água

de grande dimensão, ocasionando maior turbulência na zona onde se localiza a estação, do que na zona do pomar. Esta diferença resultará assim de condições locais muito específicas, na área de influência da estação, e não de uma particularidade das medições na zona do pomar. Dado não existirem registos para alguns dias dos meses de Junho e Setembro de 1999 e de Junho de 1998, não são indicadas as médias mensais. A velocidade do vento média, registada para o período de 12 a 30 de Junho de 1999 foi de  $0.85 \text{ m s}^{-1}$ . Para o período de 1 a 12 de Setembro do mesmo ano foi de  $0.58 \text{ m s}^{-1}$ . Para o período de 12 a 30 de Junho, em 1998, foi de  $1.18 \text{ m s}^{-1}$ .

Em conclusão, considerou-se que os anos em estudo foram próximos do ano médio.

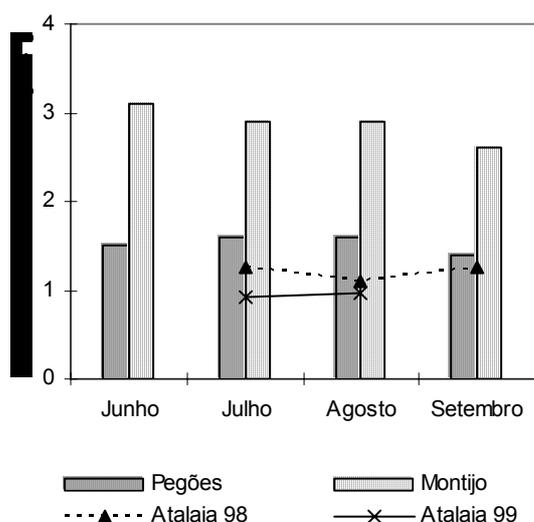


Figura III.9 – Velocidade média mensal do vento nas estações climatológicas de Pegões (a 6 m) e Montijo/ B. Aérea (a 19.2 m) (INMG, 1991) e medida localmente.

Na Figura III.10 pode observar-se a frequência média da direcção do vento para os meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro. Apresentam-se os dados para as estações climatológicas de Montijo/ Base Aérea e Pegões (1951-1980) e os obtidos localmente. Para todos os locais, os ventos dominantes sopram do 1º quadrante, havendo uma certa supremacia da direcção norte na estação de Montijo/ Base Aérea. Localmente a frequência mais elevada é a da direcção noroeste.

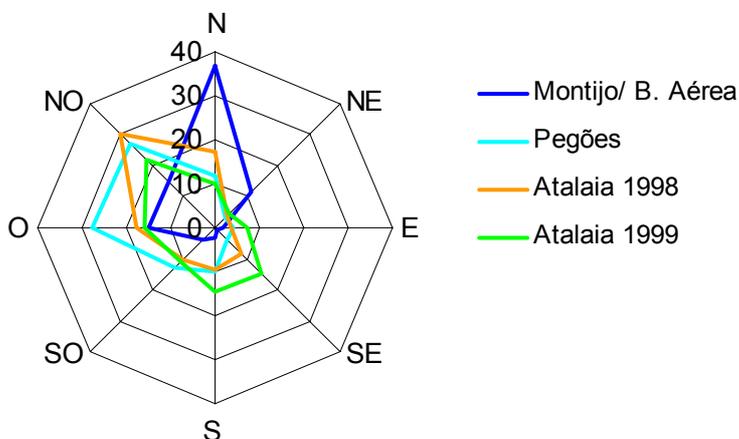


Figura III.10 – Frequência média da direcção do vento para o conjunto dos meses de Junho, Julho, Agosto e Setembro, nas estações climatológicas de Pegões e do Montijo/ Base Aérea e no local dos ensaios experimentais.

As Figuras III.11, 12 e 13 apresentam os registos obtidos localmente durante o período dos ensaios experimentais, para a temperatura média do ar, a velocidade média do vento e o défice médio da pressão de vapor do ar, respectivamente.

Para o período indicado na Figura III.11, a temperatura do ar variou aproximadamente entre 10 e 38°C, em ambos os anos. Em 1998, o valor máximo observado ocorreu no dia do ano 198 (38.35°C). A temperatura mínima registada ocorreu no dia 174 (9.5°C). Em 1999, o valor máximo observado foi de 38.4°C (dia 188). O valor mínimo foi igual a 8.6°C (dia 258).

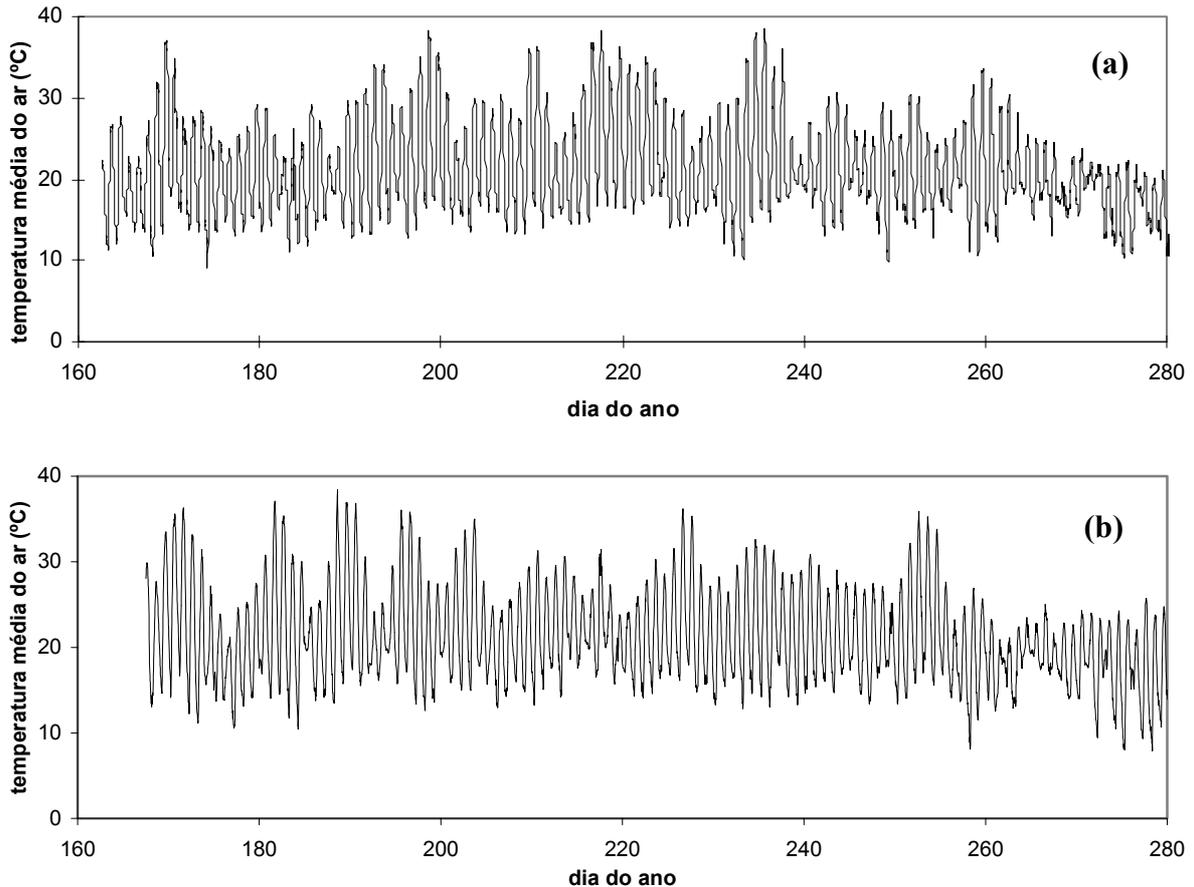


Figura III.11 – Temperatura média do ar (médias de 30 minutos), (a) 1998 e (b) 1999.

De uma forma geral, durante os períodos considerados na Figura III.12, a velocidade do vento registou valores mais baixos em 1999 do que em 1998. No primeiro ano (Figura III.12 (a)) a velocidade máxima ascendeu a  $4.48 \text{ m s}^{-1}$  (dia do ano 213). Em 1999 (Figura III.12 (b)) ascendeu a  $3.14 \text{ m s}^{-1}$  (dia 254).

A variação do défice de pressão de vapor do ar (*VPD*) encontra-se representada na Figura III.13. Durante os períodos de trabalho experimental *VPD* atingiu um máximo em 1998 igual a 5.4 kPa (dia do ano 217). Em 1999, o máximo observado foi 5.6 kPa (dia 188).

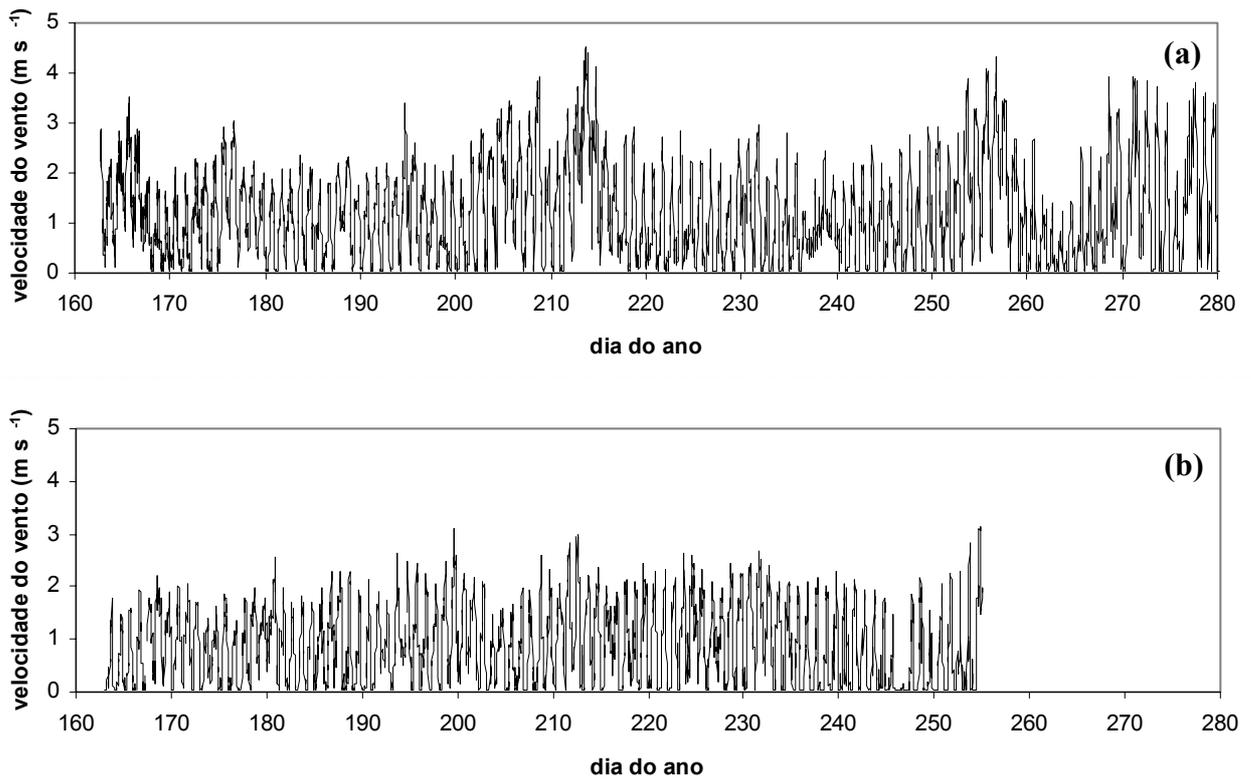


Figura III.12 – Velocidade média do vento (médias de 30 minutos); (a) 1998 e (b) 1999.

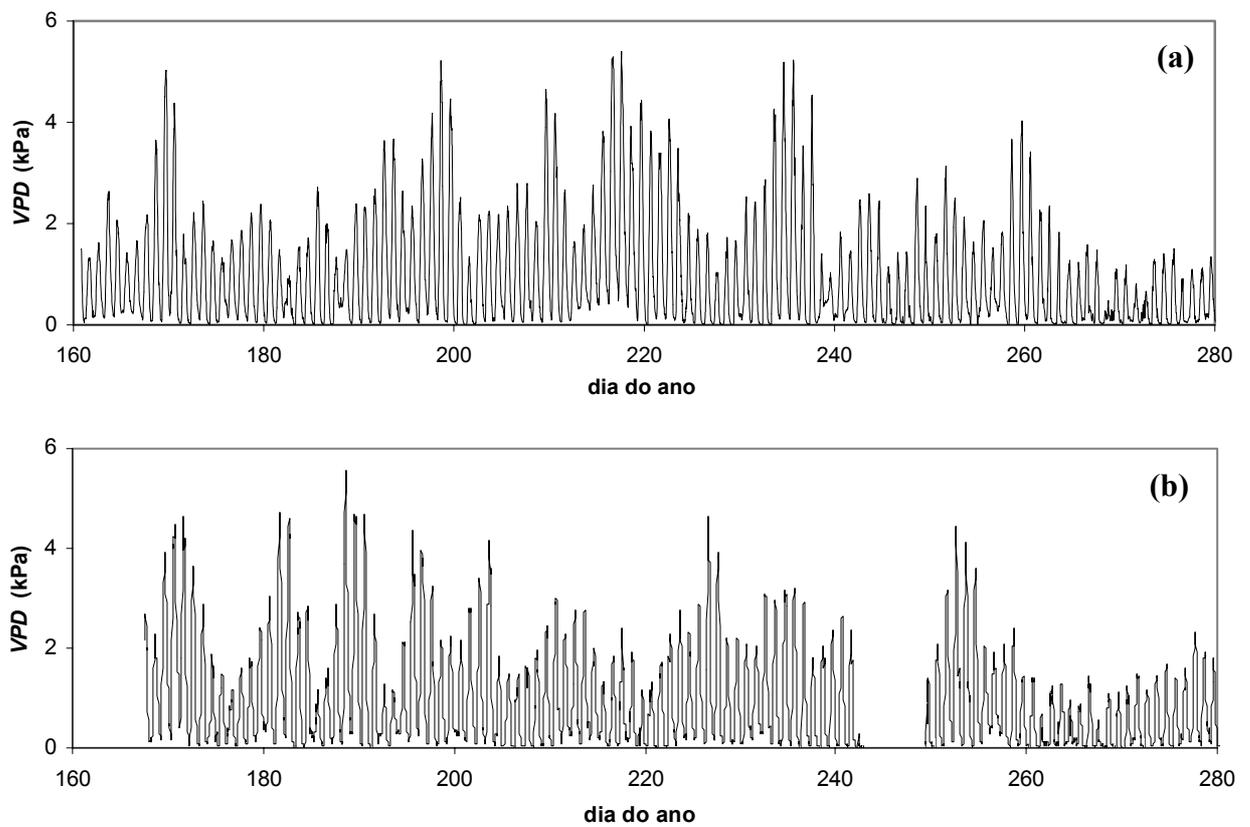


Figura III.13 – Evolução ao longo do tempo, durante o período experimental, do défice de pressão de vapor do ar (VPD) medido no pomar, (a) 1998, (b) 1999; médias de 30 minutos.

A Figura III.14 apresenta a evolução do balanço da radiação do pomar, calculado para valores entre as 8 e as 20 horas (o máximo observado em 1998 foi de  $18.74 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , no dia do ano 165 e em 1999,  $18.75 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  no dia 199).

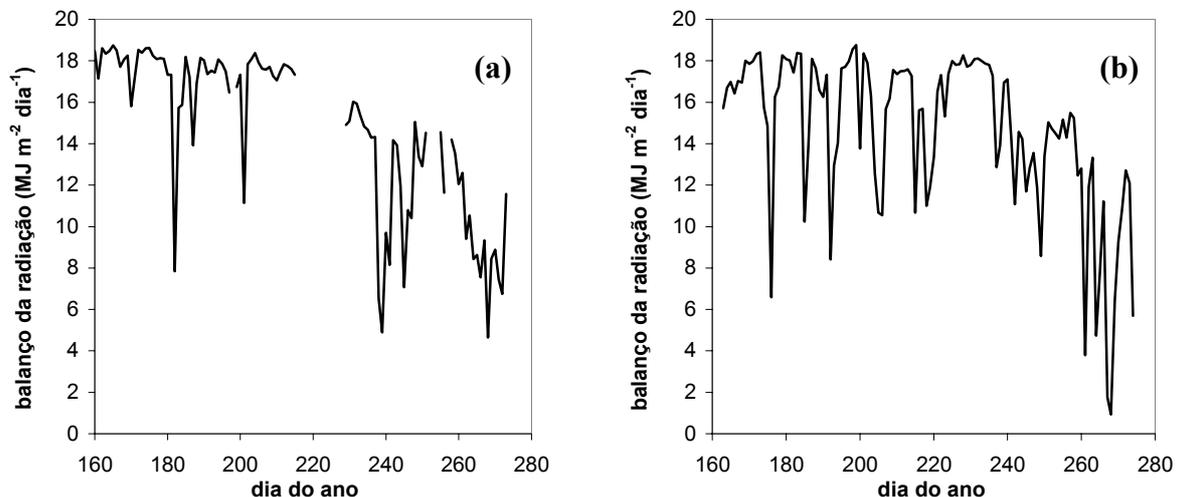


Figura III.14 – Balanço diário da radiação para períodos diurnos (entre as 8 e as 20 h); medições realizadas como descrito em III.4.1; (a) 1998, (b) 1999.

A Figura III.15 apresenta os registos da precipitação média diária durante os períodos em que decorreram os ensaios experimentais, numa estação próxima do local do pomar, na zona de Vendas Novas.

Foi realizada uma comparação à escala semi-horária entre as medições de temperatura do ar, humidade relativa e velocidade do vento, realizadas no local dos ensaios e as obtidas em três estações climatológicas próximas (Setúbal, Coruche e Barreiro/Lavradio), durante o mês de Julho de 1998 (Figura III.16). Nestas estações, a velocidade do vento foi medida a 10 m de altura sobre a vegetação natural da região, tendo-se utilizado a equação do perfil logarítmico do vento para estimar a velocidade a 2 m de altura. Existe uma concordância aceitável para a generalidade das situações, sobretudo com a estação de Setúbal, verificando-se no entanto algumas discrepâncias na comparação com as medições da estação do Lavradio, nomeadamente em relação à humidade relativa e à velocidade do vento. Esta estação situa-se nas proximidades de uma massa de água de grandes dimensões (rio Tejo, tal como a estação de Montijo/Base Aérea, anteriormente analisada) localizada sobretudo a norte, noroeste e oeste da estação, direcções de onde sopram os ventos dominantes na região. Assim, será essa a razão para a humidade relativa e a velocidade do vento apresentarem por vezes registos mais elevados do que na Atalaia. Utilizaram-se então os dados obtidos ao nível da parcela, para o cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) uma vez que existe um registo contínuo a nível local, durante um período de tempo mais alargado.

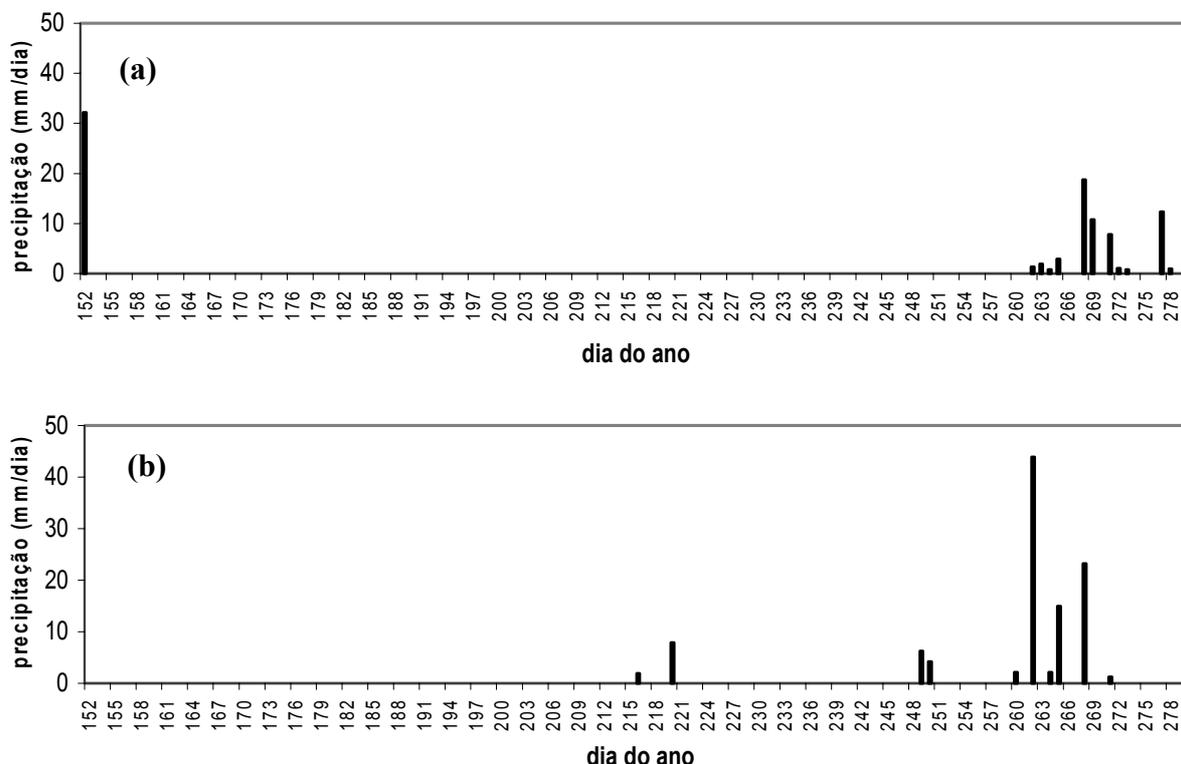


Figura III.15 – Precipitação diária numa estação meteorológica próxima (Vendas Novas - Rede Meteorológica INAG) durante os períodos dos ensaios experimentais (fonte: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos – <http://snirh.inag.pt>); (a) 1998, (b) 1999.

### III.1.3. Caracterização do solo

O pomar estava implantado num solo arenoso, classificado como um Arenossolo háplico, de acordo com a classificação da FAO (FAO, 1998).

Na linha, era anualmente feito um câmore na tentativa de, por um lado, promover a drenagem do solo nessa zona e, por outro, combater a infestação. O câmore tinha aproximadamente 20 cm de altura e 40 cm de largura e uma estrutura desagregada, resultante da mobilização regular.

A Figura III.17 apresenta um esquema do perfil do solo aberto na zona de plantação, com cerca de 1.5 m de largura, perpendicular à linha de árvores e centrado sobre esta. No perfil era possível observar, por baixo do câmore, um bolbo com a largura aproximada de 0.6 m e a profundidade máxima de 0.4 m. Este era constituído por materiais arenosos, de cor cinzenta muito escura, contendo um número elevado de raízes, muito finas, finas e médias. Os limites do bolbo apresentavam-se muito nítidos, contrastando com a zona circundante, em que se encontraram poucas ou raras raízes e algumas manchas de material arenoso de cor cinzenta amarelada. Esta zona apresentava compacidade mínima.

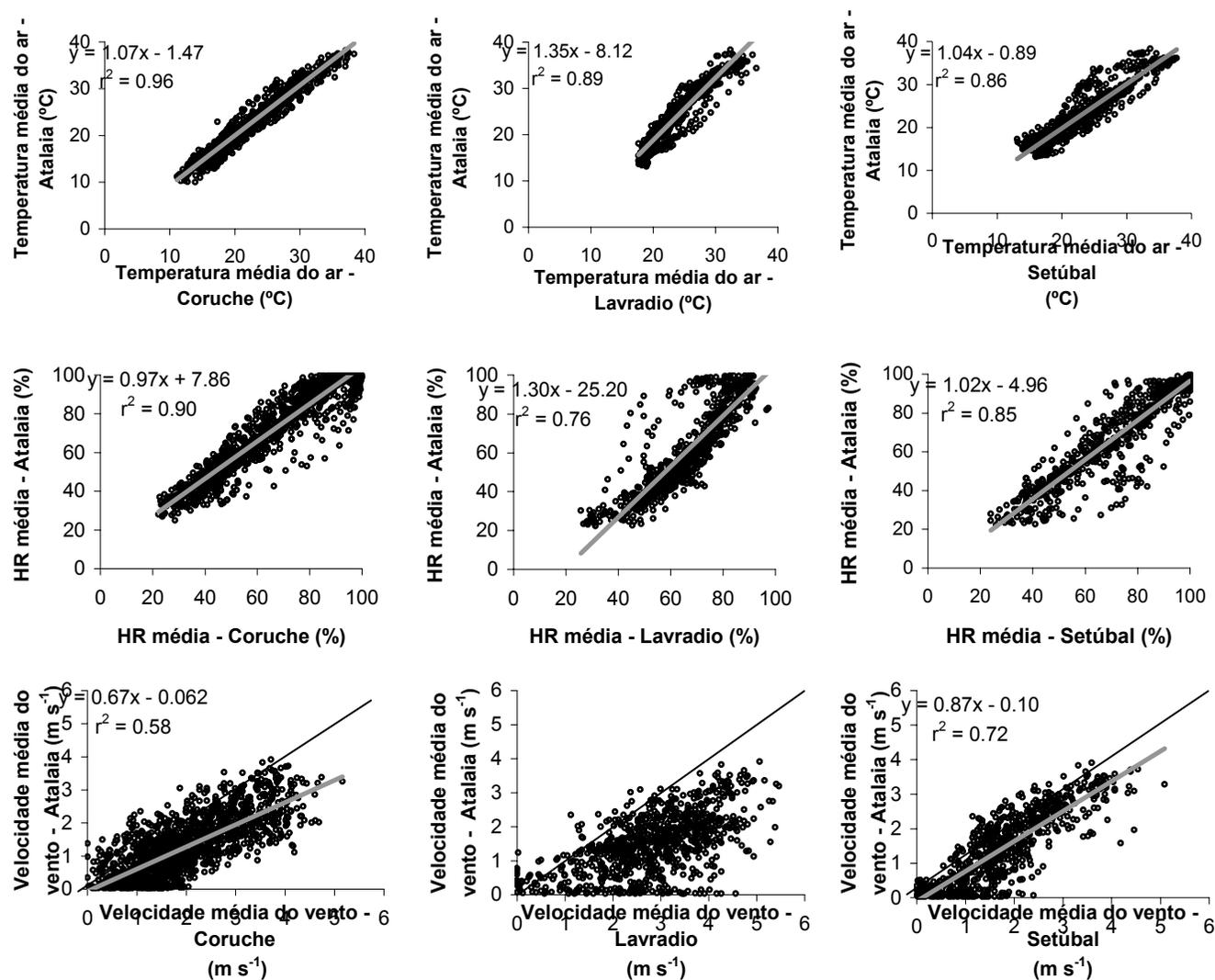


Figura III.16 – Comparação de medições das principais variáveis meteorológicas na Atalaia e em três estações meteorológicas próximas (dados semi-horários, Julho de 1998).

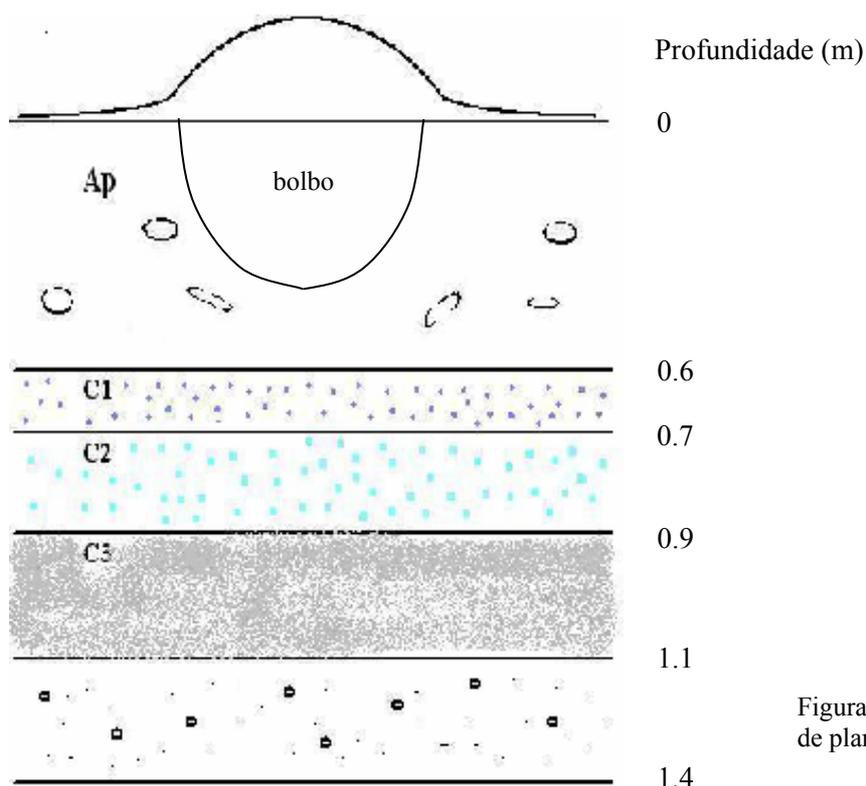


Figura III.17 – Perfil do solo na linha de plantação.

Considerando como nível zero a cota da entrelinha, é possível observar um horizonte Ap até uma profundidade de 0.5 a 0.6 m, um horizonte C1 entre 0.55 – 0.6 e 0.7 m, um horizonte C2 com cerca de 20 cm, a que se segue um horizonte C3 até 1.1 m, aproximadamente. Por baixo deste último horizonte, encontra-se uma camada de textura arenosa grosseira (ver Tabela III.2), pouco consolidada, entre 1.1 m e 1.4 m, aproximadamente. O horizonte Ap possuía cor pardo acinzentado (10YR 3/2)<sup>7</sup>, apresentando no seu interior duas zonas distintas: uma formada pelo bolbo atrás descrito e outra com poucas raízes, finas e médias, de distribuição muito irregular, localizadas sobretudo nos primeiros 20 cm superficiais. Apresentava ainda manchas de cor pardo pálido (10YR 6/3), de dimensão pequena e média, distribuídas muito irregularmente, resultantes da mistura entre materiais provenientes da camada adjacente e do horizonte A pré-existente, formado pelo processo de preparação do solo para a plantação. De salientar que a compactidade do horizonte Ap aumentava com o afastamento da linha. O horizonte C1 de textura arenosa franca apresentava cor cinzento pardacento (10YR 5/2), apresentando raras raízes e compactidade mínima. A transição para C2 apresentava-se irregular e evidente. O horizonte C2 era constituído por uma camada de areia, com acumulação de óxidos de ferro e húmus, formando uma surraipa branda e descontínua de compactidade média a grande, com algumas raízes finas e médias que atravessavam a camada com muita facilidade, e que aparentavam instalar-se preferencialmente neste local. Apresentava cor pardo pálido (10YR 6/3). A transição para a

<sup>7</sup> De acordo com o Sistema de Cores de Munsell (*Munsell Soil Color Chart*).

camada seguinte era irregular e evidente. O horizonte C3 apresentava-se como uma camada de areão, de cor amarelo pardacento (10YR 6/6) ou pardo amarelado escuro (10YR 4/4), com algum saibro e compacidade pequena, apresentando raras raízes. A camada de areia mais grosseira por baixo deste último horizonte apresentava cor amarelo pálido (2,5Y 7/4).

O câmore era de textura arenosa, sem elementos grosseiros e com compacidade mínima (Tabela III.2). Apresentava na zona central algumas raízes finas e médias das árvores e um número elevado de raízes muito finas de plantas herbáceas.

Tabela III.2 – Análise granulométrica e textura do solo; o bolbo e a parte lateral formam o horizonte Ap.

Camada →	Cômore	Bolbo	Parte lateral do bolbo	Horizonte C1	Horizonte C2	Horizonte C3	Horizonte C3	1.1 – 1.4 m
Areia grossa (%)	64.3	66.4	65.8	53.4	61.9	63.1	55.2	81.2
Areia fina (%)	32.4	29.7	30.5	25.5	32.6	33.4	35.1	12.0
Limo (%)	2.2	2.7	2.5	9.2	3.8	2.4	6.4	1.4
Argila (%)	1.1	1.2	1.2	1.9	1.7	1.1	3.3	5.4
Textura	Arenosa	Arenosa	Arenosa	Aren. franca	Arenosa	Arenosa	Aren. franca	Arenosa

O solo apresentava pH próximo de 6, um teor de matéria orgânica, na zona do câmore, de cerca de 0.9% e, na zona do bolbo, de 1.3%, e teores inferiores nas camadas seguintes (Tabela III.3).

Tabela III.3 – Caracterização do solo quanto ao pH, teor de carbono (C) e teor de matéria orgânica (M. O.), para os diferentes horizontes.

Horizonte	pH	C (g kg <sup>-1</sup> )	M. O. (g kg <sup>-1</sup> )
Cômore	6.4	5.4	9.2
Bolbo	6.1	7.5	13.0
Lateral do bolbo	6.2	4.4	7.6
C1	5.8	3.6	6.2
C2	6.0	1.1	1.9
C3	5.5	1.0	1.7
C3	5.8	3.4	5.9
1.1-1.4 m	5.5	0.9	1.6

Foram efectuadas determinações da densidade aparente (relativa) em dois perfis abertos na linha, verificando-se que, para a primeira camada de solo considerada a partir da superfície (0-30 cm, correspondendo à zona do câmore), é possível considerar um valor médio de cerca de 1.3 (Figura III.18). Na camada seguinte, a densidade aparente aumenta para valores próximos de 1.5. Nesta camada foram realizadas determinações do teor em água pelo método gravimétrico (expresso como percentagem do peso de água em relação ao peso do

solo seco a 105°C) no dia 1 de Julho de 1998, durante a tarde, tendo-se encontrado um teor médio de cerca de 7% (utilizado em cálculos posteriores em III.4.2.2).

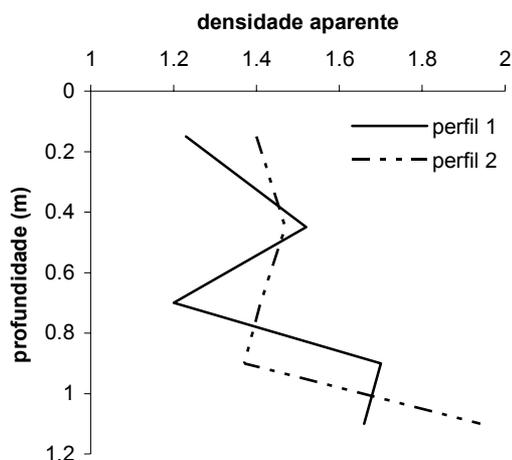


Figura III.18 – Densidade aparente (relativa) do solo determinada em dois perfis distintos, localizados sobre a linha de plantação.

Foram realizadas medições do teor de humidade para caracterizar a variação do perfil hídrico do solo, utilizando-se para o efeito sondas de neutrões (Troxler 4300 – *Troxler Electronics Laboratories, Inc.*, N. C., USA e Solo 40 – *Nardeux Humisol*, Loches, França). Estas medições realizaram-se até 1.9 m de profundidade, realizando-se a primeira a 20 cm da superfície do solo e as restantes com idêntico espaçamento (20 cm). Os perfis de capacidade de campo na zona da linha de plantação e na zona da entrelinha, obtidos por este processo, apresentam-se na Figura III.19. O armazenamento à capacidade de campo, até à profundidade de 1.9 m era de cerca de 302 mm.

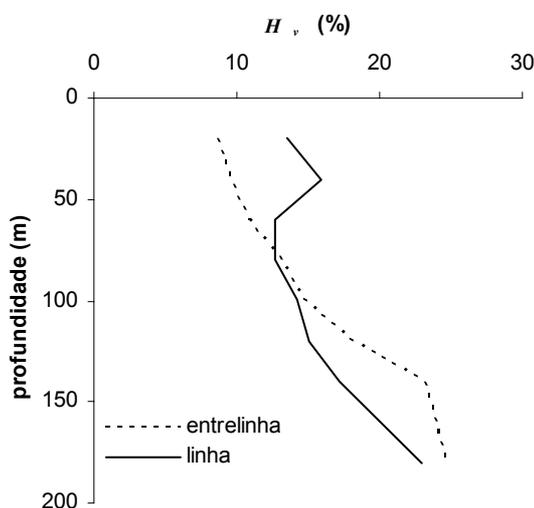


Figura III.19 – Perfil da capacidade de campo;  $H_v$  – volume de água existente por unidade de volume de solo, expresso em percentagem; 17 de Junho de 1998.

Realizou-se a determinação dos perfis hídricos de armazenamento máximo e mínimo e a determinação dos perfis hídricos durante a indução de défice hídrico, em 1998 (vd. Anexo II). Esta informação foi utilizada para o cálculo da água disponível no solo durante o 2º ciclo de *stress* hídrico realizado nesse ano (IV.6.5.3).

Os dados apresentados nesta secção foram obtidos por uma equipa do Departamento de Ciências do Ambiente do ISA – Secção de Ciência do Solo, sob orientação do Prof. Carlos

Arruda Pacheco e não se encontram publicados, resultando de comunicações pessoais no âmbito de experiências comuns do projecto FAIR – CT 95-0030 – UE (*Innovative biological indicators to improve the efficiency of water and nitrogen use and fruit quality in tree crops*) e do Convénio ICCTI/Embaixada de França (onde se insere quase todo o trabalho experimental desenvolvido nesta tese).

### III.2. Organização das experiências e descrição geral do dispositivo experimental

As técnicas utilizadas no âmbito deste estudo para a medição da transpiração apresentam muitas incertezas, sendo útil a comparação com métodos independentes. Nesta perspectiva, é necessária a separação de componentes da *ET* (transpiração e evaporação do solo), de forma a permitir a verificação. Foi medida a evaporação do solo recorrendo à utilização de microlisímetros. No que diz respeito à transpiração (medição do fluxo de seiva), foram obtidos resultados experimentais com o método de *Granier* e também com o método do balanço de calor, neste caso por uma equipa do INRA (*Institut Nationale de la Recherche Agronomique* – Bordéus, França). Para a determinação do perfil radial de distribuição do fluxo de seiva utilizou-se o método dos impulsos de calor e o método *HFD*, este último utilizado por uma equipa da Universidade de Brno (República Checa). As equipas do INRA e da Universidade de Brno participaram em experiências comuns, desenvolvidas no mesmo local, respectivamente em 1998 e 1999. A soma da transpiração com a evaporação do solo foi comparada com a *ET* obtida pelo método das flutuações instantâneas e, por sua vez, a *ET* foi verificada mediante a realização do balanço de energia da superfície.

Seguiram-se duas vertentes no que diz respeito ao dispositivo experimental e à localização dos equipamentos: uma primeira relativa à medição da evapotranspiração pelo método das flutuações instantâneas e uma segunda relativa à medição da transpiração com métodos de medição de fluxo de seiva. A medição da evapotranspiração efectuou-se a partir de uma torre de observações, localizada de acordo com a Figura III.20, e a medição da transpiração em árvores de linhas localizadas a norte ou oeste da torre, no caso de não terem sido submetidas a *stress* hídrico, e a este no caso contrário. Procurou-se assim que as zonas onde foi induzido *stress* hídrico nas plantas não influenciassem as medições micrometeorológicas.

Realizaram-se medições de condutância estomática e de potencial hídrico foliar, que incidiram sobre as árvores em que foram efectuadas medições de fluxo de seiva pelo método de *Granier*, quer da parcela regada quer da submetida a *stress* hídrico.

Nos dois anos de trabalho experimental, procedeu-se à realização de ciclos de *stress* severos em períodos de tempo curtos (referidos em III.1.1), tendo em vista monitorizar o comportamento das plantas em situação de carência hídrica, relativamente a plantas regadas, de acordo com a programação da rega habitualmente praticada no pomar.

As Figuras III.20 e III.21 apresentam uma descrição geral das medições e das regas efectuadas.

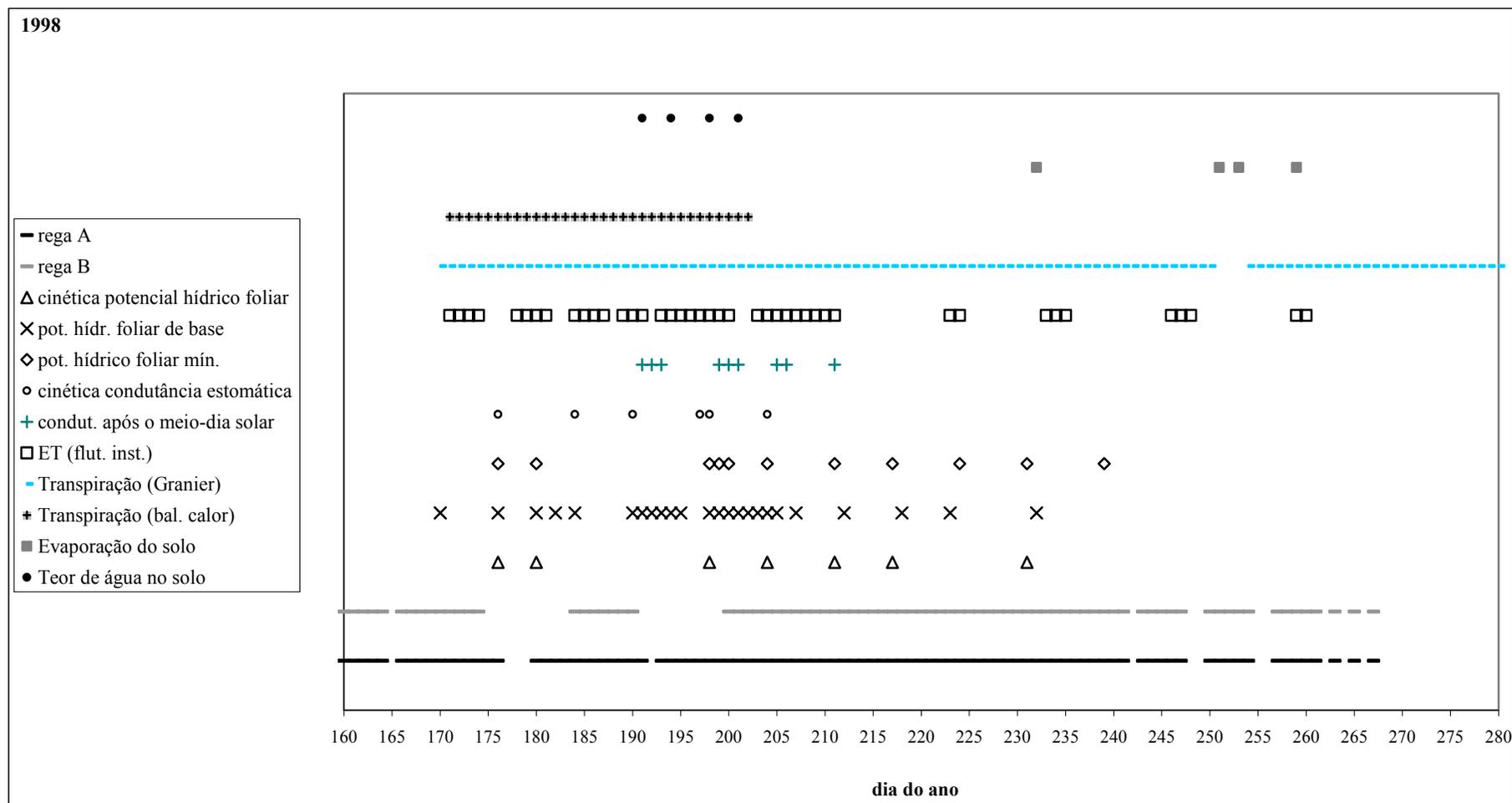


Figura III.20 – Quadro geral de medições e regas (na parcela em condições de rega normal - Rega A e na parcela submetida a défice hídrico - Rega B); 1998.

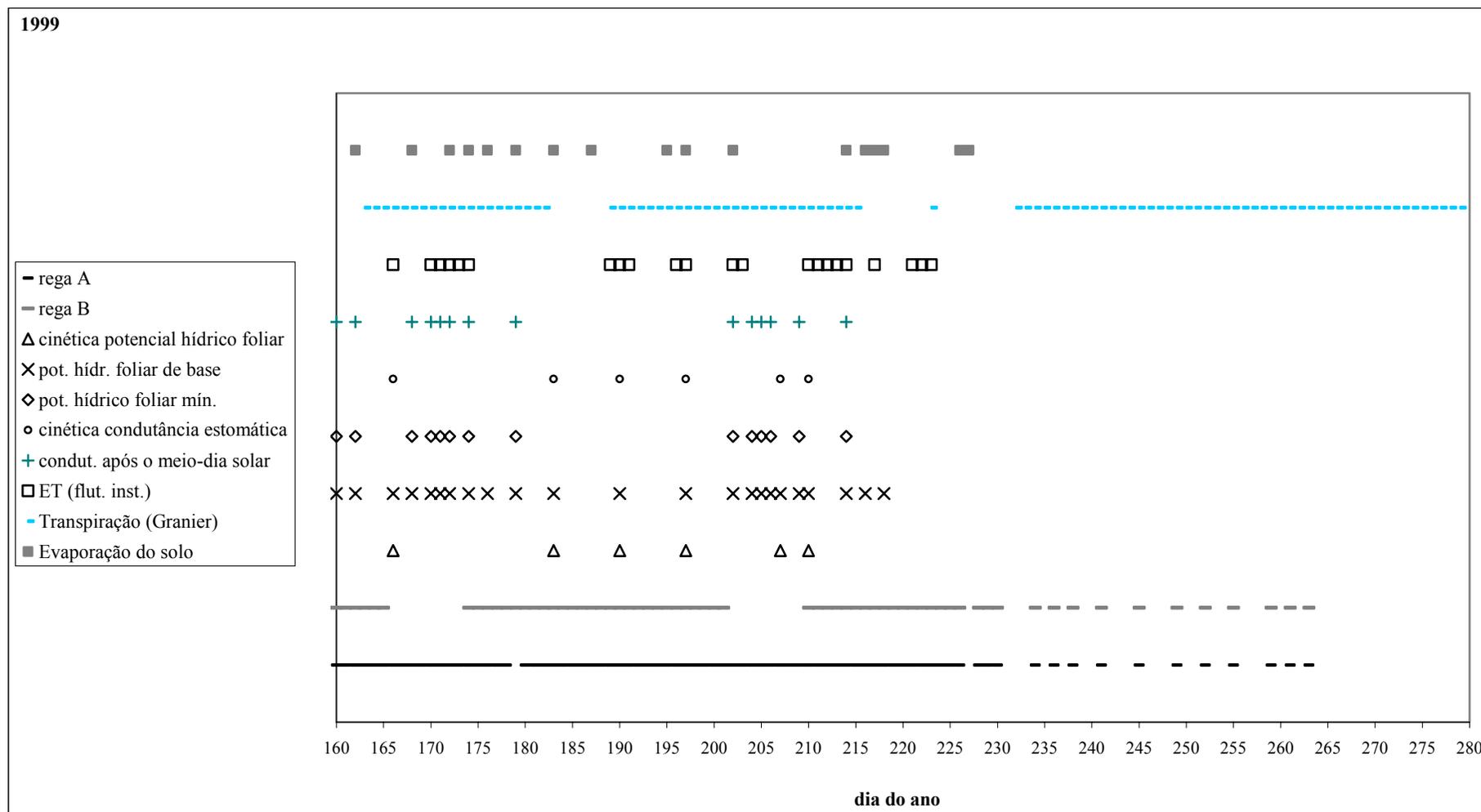


Figura III.21 – Quadro geral de medições e regas (na parcela em condições de rega normal - Rega A e na parcela submetida a déficit hídrico - Rega B); 1999.

Para todas as referências temporais de escala inferior à diária é utilizada a hora local de Verão (TU + 01h00) para facilidade de visualização. O atraso entre o meio-dia registado na hora local e o meio-dia solar era de cerca de 1 hora e 35 minutos, no período de medições.

### III.3. Método das flutuações instantâneas

A medição directa da evapotranspiração efectuou-se recorrendo ao método das flutuações instantâneas.

Os sensores foram colocados numa torre metálica de observações a 4,5 m de altura, orientados na direcção dos ventos dominantes. Assim, seria à partida necessário garantir um *fetch*, na direcção dos ventos dominantes, igual ou superior a cerca de 450 m (ver II.4.1.2). Na Figura III.22, além do local escolhido para a colocação da torre, pode observar-se o *fetch* existente para cada uma das direcções do vento, bem como as dimensões da parcela em estudo. Observa-se que, para as direcções do vento dominante aquele requisito é amplamente satisfeito.

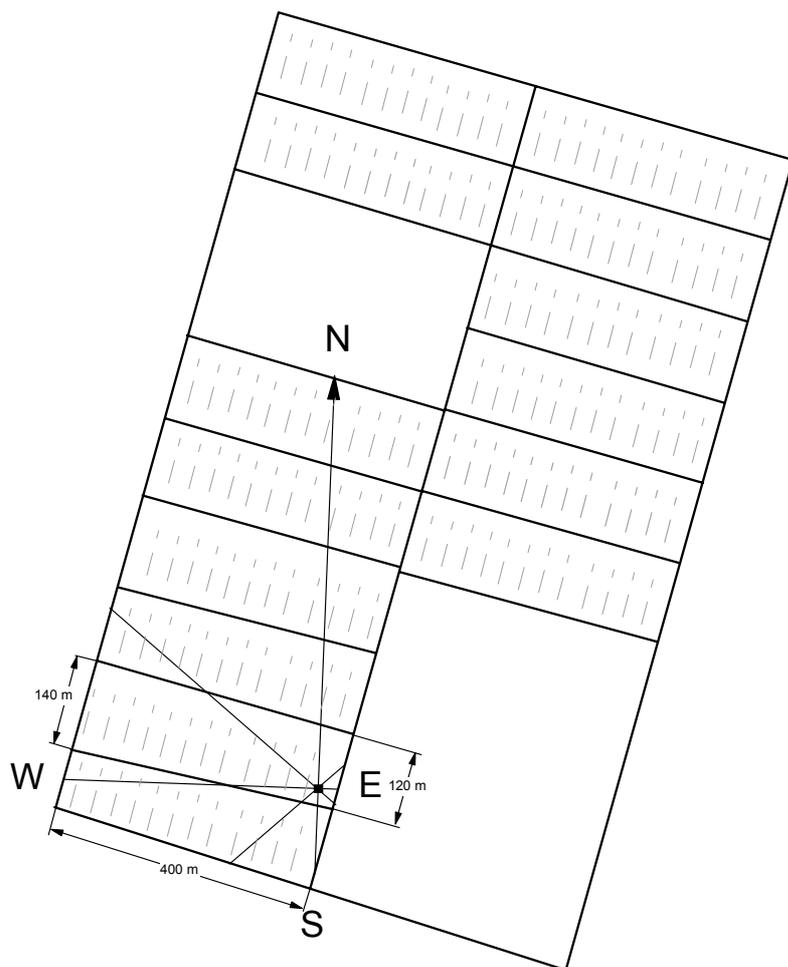


Figura III.22 – Esquema do pomar e localização da torre utilizada para as medições micrometeorológicas (■); as áreas tracejadas estavam ocupadas por pessegueiros ou ameixeiras, as outras por culturas baixas ou em pousio.

### III.3.1. Sensores utilizados

Para a medição das flutuações da velocidade vertical do vento, da temperatura e humidade do ar, foram utilizados um anemómetro sónico mono-dimensional, um microtermopar de resposta rápida de 12.7  $\mu\text{m}$  de espessura e um higrómetro de cripton, respectivamente (modelos CA27, 127 e KH20, *Campbell Scientific, Inc.* Logan, UT, EUA). Os dados recolhidos foram armazenados num sistema de aquisição de dados 21X (*Campbell Scientific, Inc.* Logan, UT, EUA).

O anemómetro sónico utilizado mede a componente vertical da velocidade do vento baseando-se o seu princípio de funcionamento na medição do tempo de propagação de uma onda acústica, emitida por dois microfones, que funcionam alternadamente como emissores ou receptores. Estes encontram-se separados por uma distância fixa igual, neste caso, a 10 cm. A emissão de sons processa-se segundo duas direcções paralelas à componente vertical da velocidade do vento, em sentidos contrários. Determinando a diferença entre os tempos necessários para os dois percursos, é possível avaliar o efeito do vento sobre os mesmos. A partir desta informação, e conhecendo a distância entre os microfones, pode então determinar-se a componente vertical da velocidade do vento.

O higrómetro de cripton é um higrómetro de absorção de radiação. Este tipo de sensores insere-se num grupo de instrumentos tidos como os mais precisos e de melhor capacidade de resposta, para a medição da humidade do ar (Guyot, 1998). Baseiam-se na propriedade do vapor de água de apresentar algumas bandas de absorção intensa de radiação, especialmente na zona do ultravioleta e do infravermelho próximo e médio. Neste higrómetro, a fonte de radiação utilizada consiste num tubo de descarga de cripton, que emite uma radiação ultra-violeta a 116.47 e 123.58 nm. O principal feixe de radiação emitida (123,58 nm) é consideravelmente atenuado pelo vapor de água. O feixe secundário (116.47 nm) não é afectado pelo vapor de água. Além do tubo emissor de radiação o higrómetro possui um tubo detector, estando ambos justapostos. Nas extremidades existem janelas de fluoreto de magnésio, que se destinam a atenuar a radiação emitida pela banda secundária.

Em Kaimal e Finnigan (1994), Campbell (1995 e 1998) e Brunet (1997) podem ser encontradas informações mais detalhadas sobre estes sensores.

### III.3.2. Descrição das medições efectuadas

A medição do fluxo de calor latente, pelo método das flutuações instantâneas, teve lugar em 42 dias, de Junho a Setembro de 1998. Em 1999, teve lugar durante 22 dias e em época semelhante. A medição do fluxo de calor sensível ocorreu aproximadamente durante os mesmos períodos, exceptuando-se alguns dias (referidos em III.3.4) devido a quebra do microtermopar.

O anemómetro sónico e o higrómetro de cripton foram colocados suficientemente próximos, de forma a minimizar erros provenientes da amostragem de diferentes turbilhões ou "pacotes" de ar. Utilizou-se assim um afastamento de cerca de 10 cm entre os dois sensores. Este afastamento enquadra-se dentro dos valores recomendados em Kaimal (1975), Verma (1990) e Campbell (1998).

Utilizaram-se frequências de medição de 5 e 10 Hz. A empresa manufactora dos sensores indica a frequência de medição de 5 Hz, como sendo a adequada à maior parte das aplicações (Campbell, 1993; Campbell, 1998). Esta frequência foi utilizada para as medições realizadas entre o dia do ano 193 e 248, em 1998. Verificou-se que o fluxo é negligenciável a partir de 5 Hz (ver IV.1.3) podendo existir 2 a 5% de energia não captada pelos sensores, o que não é uma perda significativa (Irvine, informação pessoal). Os dados obtidos com esta frequência foram assim também considerados. A frequência de 10 Hz insere-se, no entanto, na gama de valores indicada para aplicações práticas (Brunet *et al.*, 1995a) e satisfaz de forma mais aceitável as condições de frequência de amostragem e de tempo de integração do sinal, de acordo com o procedimento referido em Brunet *et al.* (1995a). Desta forma foi utilizada esta frequência nos restantes dias de medição em 1998 e ainda em 1999.

### III.3.3. Procedimentos de selecção e validação dos dados

Os procedimentos de selecção e validação de dados que foram adoptados procuraram a obtenção de um conjunto de dados suficientemente fiável, para a utilização no estudo da programação da rega e na modelação da evapotranspiração do pomar.

Numa primeira abordagem, efectuou-se a exclusão dos dados em períodos de elevada humidade relativa do ar, dado que a condensação nas janelas do higrómetro de cripton, devido à forte absorção de radiação ultravioleta, deu origem a erros de medição.

Posteriormente foi determinado o *fetch* associado a cada uma das oito principais direcções do vento, para as condições de medição da parcela, e efectuada uma análise de 'pegada', de acordo com a metodologia indicada em Schuepp *et al.*, 1990 (ver II.4.1.2). Determinaram-se assim as direcções em que o *fetch* não era adequado para a obtenção de resultados viáveis e os dados foram excluídos para dias de vento dominante oriundo dessas direcções.

Foi também verificado o balanço de energia da superfície, durante os dias de medições, para confirmar a qualidade dos dados anteriormente seleccionados, mediante a análise de 'pegada'.

Realizou-se ainda uma análise espectral dos dados, tendo em vista confirmar a adequação da frequência de medição utilizada.

### III.3.3.1. Análise de pegada

A análise de ‘pegada’ efectuada para as condições de medição do pomar (ver II.4.1.2) teve em vista determinar a contribuição relativa dos fluxos provenientes de pontos a diferente distância, para o fluxo medido. Para a determinação dos parâmetros da rugosidade da superfície ( $d$  – altura de deslocamento do plano de referência e  $z_o$  – rugosidade aerodinâmica da superfície) consideraram-se as relações simples baseadas na altura do coberto ( $h$ ), habitualmente encontradas na literatura (Jarvis *et al.*, 1976; Brutsaert, 1982; Monteith e Unsworth, 1990). A razão  $d/h = 0.7$  é indicada em muitas situações, nomeadamente para cobertos naturais ou agrícolas. No entanto, em cobertos florestais têm sido encontrados valores mais baixos para  $d/h$  associados a um baixo  $LAI$  (Jarvis *et al.*, 1976; Valente, 1999). É admissível esperar que  $d$  se aproxime de  $h$  à medida que o  $LAI$  aumenta. Assim, terá algum sentido considerar o contrário (que  $d$  se afasta de  $h$ ) quando se trata de um copado esparso. No pomar em estudo, dado tratar-se de um copado esparso e tendo em conta a altura do coberto, julgou-se então adequado considerar uma razão  $d/h$  um pouco mais baixa e igual a 0.65 (Irvine, informação pessoal). Esta ordem de grandeza para  $d/h$  tem sido encontrada em cobertos florestais (Jarvis *et al.*, 1976) e também em pomares de citrinos (Kalma e Fuchs, 1976). A razão  $d/h$  parece ser, no entanto, menos sensível à natureza da superfície do que a razão  $z_o/h$  (Munro e Oke, 1975). Shaw e Pereira (1982) estudaram a evolução de  $z_o/h$  com a densidade e a distribuição vertical da vegetação, tendo verificado que, inicialmente,  $z_o$  aumenta com o aumento da densidade, atinge um pico e decresce em seguida. Para cobertos florestais, encontram-se frequentemente para esta razão valores próximos de 0.075 (Jarvis *et al.*, 1976), nomeadamente para cobertos de densidade próxima do pomar em estudo (Allen *et al.*, 1968). Assim, julgou-se adequada a utilização deste valor, tendo em conta o grau de precisão necessário e a sensibilidade do cálculo da função *footprint* ao mesmo (Irvine, informação pessoal). Finalmente usaram-se as equações II.9, II.10 e II.11, apresentadas em II.4.1.2, para estimar a densidade de fluxo relativa, o ponto de origem dos fluxos a que a medição mostra maior sensibilidade e o fluxo acumulado normalizado, respectivamente.

### III.3.3.2. Erro de fecho da equação do balanço de energia

Quando se utiliza o método das flutuações instantâneas, uma forma de avaliar a qualidade dos dados obtidos é, como referido, determinar o erro de fecho da equação do balanço de energia, para a superfície em questão; realizou-se então o estudo de todos os componentes do balanço de energia da superfície para o sistema em estudo (ver III.4).  $H$  e  $\lambda E$  foram medidos pelo método das flutuações instantâneas, como anteriormente indicado no início da secção III.3. A medição da radiação líquida e de  $G$  foi efectuada como indicado em III.4 ou  $G$  estimado a partir de  $R_n$ , para períodos em que não se efectuaram medições. Designa-se por erro de fecho a diferença encontrada entre os dois termos da equação quando o balanço de energia não é nulo.

### III.3.3.3. Análise espectral

Foi realizada uma análise espectral com o apoio do Laboratório de Bioclimatologia do *Institut National de la Recherche Agronomique* (Bordéus) recorrendo a um programa (em linguagem FORTRAN) cedido por investigadores do mesmo laboratório, que permitiu a recolha de fluxos instantâneos, a sua seriação de acordo com a frequência relativa e o cálculo do espectro de turbulência e do cospectro associado (vd. II.4.1.2). Incidiu sobre séries temporais de cerca de 30 minutos, consideradas representativas de condições favoráveis à realização de medições pelo método em questão (direcção do vento favorável). Realizaram-se em 1998 e 1999, embora neste último ano, dado ter decorrido no final do período experimental quando foram detectados problemas de funcionamento dos sensores, não tenha sido possível obter resultados utilizáveis. No entanto, a análise efectuada em 1998 pode considerar-se válida para os dois anos de trabalho experimental (Irvine, comunicação pessoal), dado as medições terem decorrido exactamente no mesmo local e sob as mesmas condições de utilização dos sensores (mesma altura de medição, altura semelhante das árvores, mesmo solo e mesmo coberto).

### III.3.4. Selecção de dados

Dos 42 dias iniciais de medições realizados em 1998 e aplicando os critérios de selecção referidos (*fetch* adequado, utilização da análise de pegada e balanço de energia da superfície) foram seleccionados 22 dias (dias do ano 172-174, 178, 179, 184, 187, 189-191, 193-197, 203, 205, 206, 208, 211, 247 e 248 – Tabela III.4).

Os dias 178, 179, 193, 194, 211 e 248 são subsequentes a dias em que ocorreu uma falha do sistema de rega. Por esta razão, as medições do fluxo de calor latente correspondentes não foram consideradas, quando se efectuaram comparações com as estimativas de evapotranspiração obtidas pelo método FAO 56 (ver V.4).

Orientações idênticas foram seguidas para a selecção dos dados de 1999, resultando num conjunto de 14 dias (dias do ano 190, 191, 196, 197, 202, 203, 210-214 e 221-223). O sistema de rega funcionou adequadamente durante o período de medições. Consequentemente, durante os períodos seleccionados, toda a informação foi recolhida em condições normais de rega, para o pomar em estudo.

Em diversos momentos, condições meteorológicas de céu nublado não permitiram utilizar o equipamento continuamente, dada a incerteza sobre a ocorrência de precipitação, uma vez que se tratava de sensores que não funcionam ou que podem ficar danificados quando molhados.

Para o cálculo da evapotranspiração diária não foram considerados os valores negativos observados para a densidade do fluxo de calor latente (durante a noite), nem valores positivos correspondentes a picos, que ocorreram durante períodos de elevada humidade relativa do ar (superior a cerca de 80%). Optou-se por excluir estes valores por se supor

estarem relacionados com falhas de funcionamento do higrómetro de cripton, que podem ocorrer durante períodos em que o sensor se encontra molhado ou exposto a condições de humidade elevada.

Tabela III.4 – Sequências de medição da evapotranspiração com o método das flutuações instantâneas; as células sombreadas a preto representam os dados utilizados depois de se realizar o processo de selecção e validação; as células a cinzento, os restantes dados.

<b>Junho</b> ⇨																			
<b>1998</b>	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178
	179	180	181																
<b>Julho</b> ⇨																			
	182	182	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212							
<b>Agosto</b> ⇨																			
	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231
	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243							
<b>Setembro</b> ⇨																			
	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262
	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273								
<b>1999</b>	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178
	179	180	181																
<b>Julho</b> ⇨																			
	182	182	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212							
<b>Agosto</b> ⇨																			
	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231
	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243							
<b>Setembro</b> ⇨																			
	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262
	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273								

Optou-se pela inclusão de alguns dias de dados incompletos (174, 184, 187, em 1998 e 191, 196, 197, 202, 210, 214, 221 e 222, em 1999) dado que essa ausência de informação se verificou, geralmente, em períodos em que o fluxo tende a ser muito reduzido ou nulo (durante a madrugada e primeiras horas da manhã). Nos dias 194, 195 e 203, em 1998 e nos dias 221 a 223 de 1999, não foi possível medir o fluxo de calor sensível, tendo-se no entanto procedido a medições do fluxo de calor latente.

### III.3.5. Correções

Podem ser efectuadas diversas correções nos dados obtidos pelo método das flutuações instantâneas, encontrando-se descrições pormenorizadas em Tanner *et al.* (1993), Laubach *et al.* (1994) e Brunet (1995a).

Neste estudo, optou-se por realizar a correção preconizada por Webb *et al.* (1980) para a variação da densidade do ar e a correção para a absorção de radiação pelo oxigénio, segundo Tanner *et al.* (1993). Quando se mede o fluxo de vapor de água, a primeira correção é geralmente inferior a 10% (Moncrieff, 1989; Tanner *et al.*, 1993). Pode assumir valores mais elevados se o fluxo de calor sensível for mais importante que o fluxo de calor latente, como referido em Berbigier *et al.* (1996), tendo estes autores encontrado um valor de correção de cerca de 20%. Considerou-se pertinente avaliar esta situação para as condições deste estudo, embora apenas para alguns dias o fluxo de calor sensível seja visivelmente mais elevado que o de calor latente (ver IV.2). Para a correção para a absorção de radiação pelo oxigénio, Berbigier *et al.* (1996) referem correções de cerca de 10%. Optou-se também por verificar esta situação para as condições deste trabalho.

#### III.3.5.1. Correção para a variação da densidade do ar

A transferência simultânea de calor sensível e de calor latente origina flutuações na densidade do ar, que podem ser erradamente atribuídas a flutuações no calor latente, no caso da utilização de sensores que medem a humidade absoluta (que, na realidade, é como uma densidade parcial de vapor de água na atmosfera), como o higrómetro de cripton. É necessário introduzir correções que compensem este efeito. A correção geralmente utilizada faz-se recorrendo às expressões desenvolvidas por Webb *et al.* (1980) sendo por vezes referida como correção WPL (as iniciais dos nomes dos seus autores) designação que será adoptada neste trabalho. Esta correção toma a seguinte forma (Berbigier *et al.*, 1996):

$$\lambda E_d = \lambda(1 + \mu\sigma) \left[ E + \frac{\bar{\rho}_v}{\bar{\rho}} \frac{H}{c_p \bar{T}} \right] \quad (\text{III.1})$$

em que  $\lambda E_d$  é o fluxo de calor latente corrigido [ $\text{W m}^{-2}$ ],  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água [ $\text{J kg}^{-1}$ ],  $\mu$  é a razão entre as massas moleculares do ar seco e do vapor de água (1.608),  $\sigma = \bar{\rho}_v / \bar{\rho}_a$  é a razão entre as densidades médias do vapor de água e do ar seco ( $\sigma = 6.217 \cdot 10^{-6} e$ ),  $e$  é a pressão de vapor do ar [Pa],  $E$  é a evaporação medida, expressa em massa [ $\text{kg m}^{-2}$ ],  $\bar{\rho}$  é a densidade média do ar húmido [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  $c_p$  é a capacidade térmica mássica do ar húmido a pressão constante [ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ],  $\bar{T}$  é a temperatura média do ar [K] e  $H$  é o fluxo de calor sensível [ $\text{W m}^{-2}$ ].

### III.3.5.2. Correção para a absorção de radiação ultravioleta pelo oxigénio

A radiação ultravioleta emitida pelo higrómetro de cripton, além de ser absorvida pelo vapor de água, é parcialmente absorvida pelo oxigénio a 123.58 nm. É necessário efectuar uma correção para este efeito, como referido em Tanner *et al.*, 1993. Desprezando o efeito das flutuações da pressão atmosférica, a correção, designada por  $f_k$ , pode calcular-se pela seguinte expressão (Berbigier *et al.*, 1996):

$$f_k = \frac{k_0}{k_v} \frac{C_0 m_0 p}{RT^2} \frac{H}{\bar{\rho} c_p} \quad (\text{III.2})$$

sendo  $k_0 = 0.0045$ , o coeficiente de absorção do oxigénio (Tanner *et al.*, 1993),  $k_v = 0.147$ , o coeficiente de absorção do vapor de água,  $m_0 = 32 \times 10^{-3}$  kg, a massa molecular do oxigénio,  $C_0 = 0.21$ , a concentração de oxigénio na atmosfera,  $p$  a pressão atmosférica [Pa],  $R = 8.315$  J  $\text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}$ , a constante universal dos gases e as restantes variáveis tendo sido definidas atrás (eq. III.1). Em capítulos posteriores esta correção será referida como correção  $\text{O}_2$ .

Para o cálculo do fluxo de calor latente, com correção WPL e  $\text{O}_2$ , resulta a seguinte equação:

$$\lambda E_{d,0} = \lambda(1 + \mu\sigma) \left[ E + \frac{\bar{\rho}_v}{\bar{\rho}} \frac{H}{c_p \bar{T}} + f_k \right] \quad (\text{III.3})$$

em que  $\lambda E_{d,0}$  é o fluxo de calor latente corrigido para o efeito da variação da densidade e para o efeito da absorção pelo oxigénio.

## III.4. Balanço de energia da superfície

No âmbito deste trabalho, o estudo do balanço de energia da superfície tem duas finalidades. A primeira consiste na quantificação do erro de fecho da equação do balanço de energia, como forma de avaliar a qualidade dos dados obtidos pelo método das flutuações instantâneas (vd. III.3.3.2). A segunda será caracterizar o coberto quanto às trocas energéticas que nele se verificam. As medições necessárias à realização do balanço de energia ( $\lambda E$ ,  $H$ ) foram obtidas como indicado em III.3. A densidade de fluxo correspondente ao balanço da radiação foi obtida como descrito em III.4.1 e o fluxo de calor sensível para o solo ( $G$ ) foi medido como descrito em III.4.2.

### III.4.1. Balanço da radiação

Foram utilizadas medições do balanço da radiação, obtidas pela equipa do INRA (anteriormente referida) com um pirradiómetro *Schenck 8111 (PH Schenck GmbH, Viena, Áustria)*, colocado numa torre de observações a 6 m de altura, durante o período entre o dia do ano 151 e 203, em 1998. Recorreu-se também a um pirradiómetro (modelo S-1, *Swissteco Instruments, Oberriet, Suíça*) colocado no topo da torre de observações assinalada na Figura III.20, a cerca de 6 m do solo. O período de medições abrangeu os dias do ano 193 a 208, em 1998 e 163 a 224 em 1999. Em 1999, foi ainda utilizado um piranómetro *Kipp & Zonen (Delft, Holanda)*, modelo CM6B, entre o dia do ano 196 e o dia 280 (6 m), que se utilizou para reconstituir os dados do balanço da radiação a partir do dia 224 ( $R_n = 0.74 R_s - 36.02$ ;  $r^2 = 0.96$ ;  $R_n$  – balanço da radiação,  $R_s$  – radiação solar global). Dados posteriores ao dia 208 (1998) foram reconstituídos recorrendo a medições da radiação solar cedidas pelo Departamento de Energias Renováveis do INETI (Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial) obtidas com um piranómetro CM11 (*Kipp & Zonen, Delft, Holanda*), em Lisboa (zona do Lumiar) ( $R_n = 0.56 R_s + 46.40$ ;  $r^2 = 0.92$ ).

### III.4.2. Fluxo de calor sensível para o solo

O fluxo de calor sensível para o solo pode ser medido recorrendo a placas de condutividade térmica conhecida, colocadas no solo a uma determinada profundidade, numa posição perpendicular à direcção do fluxo. A colocação pode ser feita a profundidades superiores a 10 mm, para que não ocorram perturbações das condições de medição (Oke, 1990). É então necessário utilizar uma correcção que consiste na quantificação do armazenamento de calor que ocorre na camada de solo entre a superfície e a placa. O fluxo de calor sensível à superfície do solo ( $G_s$ ) é assim calculado por:

$$G_s = G_z + S \quad (\text{III. 4})$$

em que  $G_z$  é o fluxo de calor medido à profundidade  $z$  [m] e  $S$  é a quantidade de calor armazenada na camada de solo que se situa entre a superfície e a profundidade considerada, sendo os fluxos expressos em  $\text{W m}^{-2}$ .  $S$  é dado pela seguinte expressão:

$$S = c_v \frac{\Delta T}{\Delta t} \delta z \quad (\text{III. 5})$$

em que  $c_v$  é a capacidade térmica volúmica do solo [ $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$ ],  $\Delta T/\Delta t$  é a taxa média de variação da temperatura, no intervalo de tempo considerado, da camada de solo 0 a  $z$  [ $\text{K s}^{-1}$ ] e  $\delta z$  é a espessura dessa camada [m].  $c_v$  pode ser determinada pela soma das capacidades térmicas de cada um dos constituintes do solo (Jury *et al.*, 1991) ou seja dos minerais, da matéria orgânica, da água e do ar. Tendo em conta que a capacidade térmica do ar é muito

pequena quando comparada com a dos restantes constituintes do solo e que a fracção volúmica do solo ocupada pela matéria orgânica é reduzida e se pode desprezar, é possível determinar  $c_v$  pela seguinte expressão (Hanks e Ashcroft, 1980; Mayocchi e Bristow, 1995):

$$c_v = \rho_b (c_{pav} + H_m c_{pw}) \quad (\text{III. 6})$$

em que  $\rho_b$  é a massa volúmica do solo,  $c_{pav}$  é a capacidade térmica mássica média dos constituintes sólidos,  $H_m$  é o teor em água do solo (ponderal) e  $c_{pw}$  a capacidade térmica mássica da água.  $\Delta T/\Delta t$  pode ser aproximada a partir das variações de temperatura medidas entre as placas de fluxo de calor e a superfície. No presente estudo, utilizou-se a temperatura no ponto médio entre a superfície do solo e a profundidade  $z$ .

#### III.4.2.1. Dispositivo experimental

O fluxo de calor para o solo em 1998, foi medido mediante a utilização de dois dispositivos experimentais diferentes. Num deles foram utilizadas duas placas de medição de fluxo de calor (HFT-3, *Radiation and Energy Balance Systems*, EUA) colocadas a uma profundidade de 0.08 m (de acordo com o manual Campbell Scientific, 1998) uma colocada sobre a linha e outra a cerca de um metro para este da primeira. A acumulação de calor no solo foi estimada recorrendo à medição da temperatura na camada com dois termopares, colocados a 0.02 e a 0.06 m de profundidade junto de uma das placas e outros dois às mesmas profundidades, junto da outra placa. Os quatro termopares foram ligados em paralelo. O segundo dispositivo experimental foi posto em prática por uma equipa do INRA (*Institut National de la Recherche Agronomique, Laboratoire de Bioclimatologie*, Bordéus), no âmbito de uma experiência comum realizada nesse ano no local. Nele foram utilizadas oito placas, do mesmo tipo, localizadas a 0.05 m de profundidade e espaçadas regularmente entre duas linhas de plantação. Na linha de plantas situada mais a este, foi colocada uma placa exactamente sobre a linha. Para medir a temperatura entre a superfície do solo e o nível a que foram colocadas as placas, utilizaram-se termopares finos (cobre-constantan) colocados acima de cada placa. Para este sistema, foi feita uma ponderação no cálculo em função da representatividade de áreas molhada (8%) e não molhada (92%) pelos gotejadores, numa tentativa de obter uma melhor representação espacial.

Em 1999, utilizou-se um dispositivo também com duas placas (HFT-1, *Radiation and Energy Balance Systems*, EUA) localizadas a 0.08 m de profundidade, em que uma placa se encontrava colocada a este da linha, a 1.7 m e outra a 0.6 m para a mesma direcção. Utilizou-se um termopar colocado a cerca de 0.04 m de profundidade, por cima das placas, para estimar a acumulação de calor.

### III.4.2.2. Estimativa da capacidade térmica volúmica do solo

A capacidade térmica volúmica do solo ( $c_v$ ) foi estimada individualmente para o solo circundante das placas de fluxo de calor, de acordo com a forma de cálculo descrita no início desta secção. Considerou-se que a capacidade térmica média dos constituintes minerais ( $c_{pav}$ ) seria  $811 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , valor indicado por Fabry (1942) para uma areia quartzosa, tendo em conta o solo em questão ser constituído por cerca de 96% de areia deste tipo. O valor utilizado para a capacidade térmica mássica da água foi  $4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . O cálculo de  $c_v$  foi efectuado tendo em conta a densidade aparente e o teor de água do solo determinados localmente (vd. III.1.3 e Tabela III.5). Exceptua-se a densidade aparente relativa para a zona da entrelinha, estimada em 1.6 (Pacheco, comunicação pessoal).

No caso do dispositivo experimental com oito placas, para a placa colocada sobre o câmoreo ( $G_8$ ),  $c_v$  foi estimado para duas condições diferentes, consoante a hora do dia. Durante a manhã (entre as 3 e as 11 h) considerou-se que o solo apresentava um teor em água de cerca de 11% (valor próximo da capacidade de campo). Entre as 11.30 e as 2.30 h, foi considerado que o teor de água médio do solo era 7%, de acordo com medições gravimétricas realizadas nesse período. A densidade aparente relativa determinada na zona do câmoreo para os primeiros 30 cm de profundidade foi 1.3.

Para os sistemas de duas placas, a situada na zona do câmoreo ( $G_1$ ) encontrava-se numa zona com uma densidade aparente relativa de 1.5 e um teor de água de 7% enquanto, para a placa mais afastada do câmoreo ( $G_2$ ), a densidade aparente considerada foi 1.6 e o teor em água de 5%.

Tabela III.5 – Densidade aparente ( $D_{ap}$ ), teor de água ( $H_m$  – expresso em massa) e estimativas da capacidade térmica volúmica do solo ( $c_v$ ) associados aos pontos de colocação das placas de medição de fluxo de calor.

		$D_{ap}$	$H_m$ (%)	$c_v$ ( $\text{MJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ )	Observações
Sistema de 8 Placas	Placa $G_8$	1.3	11	1.65	Entre as 3.00 e as 11.00 h, inclusive
	Placa $G_8$	1.3	7	1.43	Entre as 11.30 e as 2.30 h, inclusive
	Placas $G_1$ a $G_7$	1.6	5	1.63	
Sistema de 2 Placas	Placa $G_1$	1.5	7	1.65	
	Placa $G_2$	1.6	5	1.63	

Desta forma, foram estimadas as capacidades térmicas volúmicas associadas às condições de cada placa (patentes na Tabela III.5), possibilitando o uso da equação III.6 para o cálculo de  $G$  à superfície.

### III.5. Método de *Granier*

A partir das medições obtidas com o método de *Granier*, a transpiração foi calculada usando a relação (vd. II.4.2.3):

$$u = 1/\alpha' k^{\beta} \quad (\text{III.7})$$

na forma  $u = 118.99 \times 10^{-6} k^{1.231}$  (Granier, 1985).

#### III.5.1. Dispositivo experimental

A medição do fluxo de seiva pelo método de *Granier* decorreu de forma contínua durante os períodos em que se realizaram os ensaios experimentais. As medições foram interrompidas apenas durante períodos curtos de tempo, para registo dos gradientes térmicos naturais, utilizáveis em posteriores correcções, ou por razões acidentais.

As árvores utilizadas para a medição do fluxo de seiva foram escolhidas tendo em conta um bom estado geral da planta, a sua representatividade e características do tronco adequadas (rejeitadas árvores com troncos de diâmetro visivelmente inferior à média da parcela ou com nós ou feridas, passíveis de influenciar as medições).

Em 1998, foram instaladas 12 sondas com o comprimento de 1 cm em igual número de árvores, seis numa linha regada como habitualmente e outras seis numa linha submetida a ciclos de *stress* hídrico. Em 1999, utilizaram-se no total dez sondas, com o comprimento de 2 cm, cinco em árvores regadas e cinco em árvores submetidas a *stress* hídrico.

O par de sondas de cada sensor foi inserido radialmente no tronco a 10 e 12 cm de distância entre si, na vertical, para as sondas com 1 e 2 cm de comprimento, respectivamente. Na Tabela III.6 refere-se a orientação segundo a qual foram instaladas as sondas e a altura acima do solo referida à sonda aquecida.

As sondas foram introduzidas, como habitualmente, num tubo de alumínio previamente instalado na árvore e onde se colocou uma pasta condutora (*silicone heat sink compound*, *Servisol*, Somerset, Reino Unido) com o objectivo de assegurar a transmissão de calor e o contacto entre o alumínio e as sondas. Toda a zona foi isolada por um revestimento de poliuretano. Por sua vez, aquele primeiro revestimento foi envolvido por uma película reflectora, vedada junto ao tronco com silicone. Foi aplicada uma segunda cobertura reflectora exterior deixando algum espaço entre esta e a primeira, de forma a permitir a circulação do ar, dada a distância reduzida entre o solo e o ponto de medição, tal como aconselhado em Ferreira e Zitscher (1996). Pretendeu-se desta forma minimizar a amplitude das variações de temperatura no tronco alheias à circulação de seiva e ao aquecimento aplicado na sonda superior. Os dados foram medidos a cada 10 segundos e as médias de 30 minutos recolhidas por um sistema de aquisição de dados CR10 (*Campbell Scientific, Inc.*,

Logan, UT. EUA). Para a determinação de totais diários foram feitas interpolações de valores semi-horários quando ocasionalmente se verificaram falhas pontuais no sistema de medição.

Tabela III.6 – Diâmetro do tronco ( $\varnothing$ ), altura acima do solo ao nível da sonda aquecida ( $h_a$ ) e orientação das sondas.

1998				1999			
Árvore	Orientação	$\varnothing$ (cm)	$h_a$ (cm)	Árvore	Orientação	$\varnothing$ (cm)	$h_a$ (cm)
1	NE	6.0	17.0	1	ONO	6.7	21.7
2	NE	5.4	23.5	2	SSE	6.8	18.8
3	SE	5.7	22.5	3	SO	6.6	20.5
4	SE	6.0	18.5	4	NNO	7.5	21.0
5	N	5.6	24.0	5	SE	6.7	20.0
6	NE	5.6	23.0	6	SSE	7.2	16.0
7	NE	5.7	17.5	7	OSO	7.0	19.2
8	NO	5.3	18.5	8	SSE	6.8	15.6
9	O	5.3	19.0	9	S	7.0	15.5
10	N	6.8	18.0	10	SE	6.3	17.0
11	NE	5.8	16.0				
12	NO	6.0	21.0				

### III.5.2. Estimativa de $\Delta T_{max}$

Por vezes, podem verificar-se condições climáticas favoráveis à ocorrência de transpiração nocturna (Granier, 1987b). Nessas noites, a diferença de temperatura máxima entre a sonda aquecida e a não aquecida não coincide com o valor que ocorreria na situação de fluxo nulo ( $\Delta T_{max}$ ). Este valor pontual mais reduzido daria origem a uma subestimativa do fluxo. Por esta razão geralmente consideram-se os valores máximos absolutos encontrados em períodos de cerca de dez dias (Granier, 1987b). Neste caso, em vez de se ter considerado este valor, optou-se por ajustar uma linha que passa pelos valores máximos diários, de forma a ter em conta a tendência de variação ao longo do tempo.

### III.5.3. Correção dos gradientes naturais de temperatura no tronco

Durante alguns períodos seleccionados e como referido atrás, foi desligada a alimentação eléctrica do sistema de aquecimento das sondas de Granier, tendo como objectivo a pesquisa de gradientes naturais de temperatura, entre os dois pontos de medição de temperatura do sensor, passíveis de interferência nas medições. Constatou-se que estes gradientes eram dificilmente generalizáveis para todas as árvores em estudo, optando-se por estudar individualmente cada um deles. Desta forma, todas as sondas foram desligadas, tendo-se obtido padrões de variação individuais. Estes foram utilizados para correção das curvas de

$\Delta T$ . Apenas não se efectuaram correcções na fase final de recolha de dados (a partir do dia do ano 261 inclusive) por se observar que os padrões de variação já não se adequavam.

#### III.5.4. Determinação do perfil radial de distribuição do fluxo de seiva

Para a determinação do perfil radial de distribuição do fluxo de seiva recorreu-se ao método dos impulsos de calor tendo-se utilizado, para o efeito, sensores fornecidos pela empresa *Sonoidea*, S.A. (Valência, Espanha). Estes sensores baseiam-se nos princípios abordados em II.4.2.1 (utilizando uma técnica de compensação). As sondas utilizadas tinham cerca de 2 cm, possuindo 4 sensores de temperatura distribuídos regularmente ao longo da mesma. Estas medições foram realizadas em 1999, em três árvores distintas, entre o dia do ano 160 (9 de Junho) e o dia do ano 240 (28 de Agosto), tendo sido seleccionados os resultados referentes a duas dessas árvores, dado os da terceira apresentarem alguma incerteza.

O perfil radial foi ainda obtido por outro método independente, o método de deformação do campo de temperaturas. Este último foi utilizado para a realização de medições por uma equipa da Universidade de Brno, no âmbito de uma pequena experiência comum, em 1999. As medições decorreram no dia 186 (5 de Julho).

Utilizando em conjunto os dados obtidos, foi elaborada uma simulação do perfil radial, por regressão não linear, utilizando uma função de *Hoerl* (Daniel e Wood, 1971), com a forma  $y = ax^b e^{cx}$ , em que  $a$ ,  $b$  e  $c$  são parâmetros estimados.

#### III.6. Medição da evaporação do solo

A evaporação do solo foi medida através da utilização de nove microlisímetros cilíndricos, com 0.15 m de diâmetro interno e 0.12 m de altura, construídos e utilizados como descrito em Daamen *et al.* (1993). Cinco lisímetros foram colocados sobre a linha de árvores, entre duas plantas, e os outros quatro na entrelinha, aproximadamente na projecção vertical do limite da copa (Figura III.23). As medições foram realizadas a cada meia hora em dias seleccionados, aproximadamente entre as 9 e as 20 horas. Em 1998, a evaporação do solo foi medida nos dias do ano 232, 251, 253 e 259 e, em 1999, nos dias 162, 168, 172, 174, 176, 179, 183, 187, 195, 197, 202, 214, 216-218, 226, 227. Em 1999, a evaporação foi ainda medida durante um ciclo de dessecação do solo (203-209).

A evaporação da parcela foi calculada recorrendo a uma média ponderada com a área representada por cada lisímetro (relativamente à distância ao gotejador e à posição dos troncos). Os resultados foram acumulados para obtenção dos totais diários. Em 1999, as

medições foram realizadas pelo Eng<sup>o</sup> Nuno Conceição, no âmbito do seu trabalho final de licenciatura, podendo ser consultadas informações mais detalhadas em Conceição (2001).

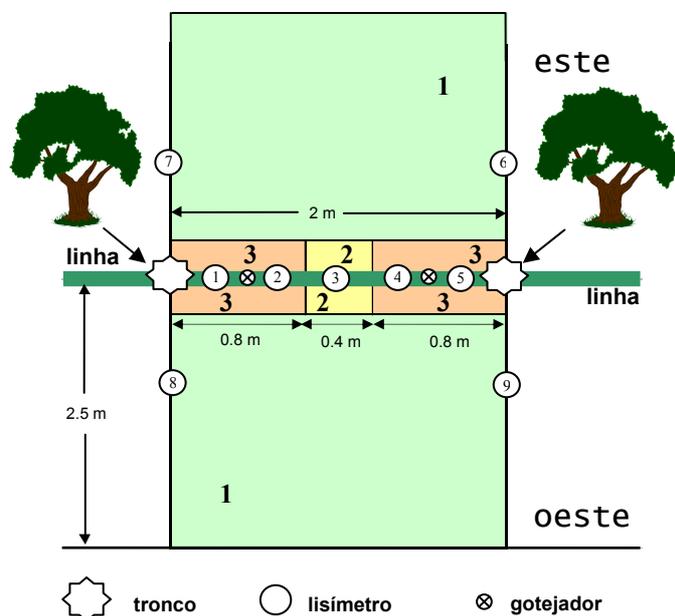


Figura III.23 – Esquema de localização dos microlisímetros, utilizados para medir a evaporação do solo. Os círculos numerados indicam a localização relativa de cada lisímetro. As restantes áreas numeradas representam as áreas de influência, consideradas para identificar as condições associadas aos lisímetros; a área 3 tem uma largura igual a 0.4 m.

Foram definidas áreas de influência, associadas à localização dos lisímetros, relativamente a uma árvore, de forma a permitir identificar a variação das condições ao nível da parcela, no que diz respeito ao humedecimento e sombreamento do solo. A área de influência tipo 1 é constituída por zonas de solo entre as linhas de árvores e que não recebem directamente água de rega ( $2 \times 4.6 \text{ m}^2$ ). A zona de influência 2 está associada à área localizada sobre a linha no ponto médio da distância entre duas árvores ( $0.4 \times 0.4 \text{ m}^2$ ). A zona de influência 3 diz respeito às áreas localizadas sobre a linha, adjacentes às árvores e que recebem directamente a água de rega ( $0.4 \times 1.6 \text{ m}^2$ ). Tal significa que, na área associada a cada árvore ( $10 \text{ m}^2$ ),  $9.2 \text{ m}^2$  têm uma evaporação correspondente à medida nos lisímetros 6, 7, 8 e 9,  $0.16 \text{ m}^2$  correspondem à medida no lisímetro 3 e  $0.64 \text{ m}^2$  correspondem à medida nos lisímetros 1, 2, 3 e 4.

### III.7. Medição da condutância estomática

Procedeu-se a medições da resistência estomática das folhas utilizando para o efeito um porómetro de difusão LI-COR 1600 (*Licor, Inc.*, Lincoln, E.U.A.). As características e o princípio de funcionamento deste sensor encontram-se descritos, por exemplo, em Percy *et al.* (1991) e David (2000). Foram realizadas medições nas árvores equipadas com os sensores de *Granier*, considerando que estas constituíam uma amostra representativa da parcela. Estas medições realizaram-se de acordo com a sequência apresentada na Tabela III.7.

Tabela III.7 - Sequências de medição da condutância estomática; as células sombreadas a preto representam dias em que se realizaram cinéticas diárias; as células a cinzento representam dias em que apenas se efectuou a medição ao princípio da tarde.

<b>1998</b>	<b>Junho</b> ⇨																		
	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178
	179	180	181																
	<b>Julho</b> ⇨																		
	182	182	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212							
<b>1999</b>	<b>Junho</b> ⇨																		
	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178
	179	180	181																
	<b>Julho</b> ⇨																		
	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200
	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212							
	<b>Agosto</b> ⇨																		
213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	

Dado que as folhas do pessegueiro são hipostomáticas (Garnier e Berger, 1987) mediu-se a condutância estomática da face abaxial. Mediram-se folhas bem iluminadas, posicionadas aproximadamente à altura do peito, variando no entanto a sua localização dentro de uma área acessível a um operador em pé. As folhas escolhidas situaram-se sempre em zonas médias do tronco, evitando folhas muito jovens, demasiado envelhecidas, ou com características fora do comum.

Foram realizadas medições ao longo do dia, em dias seleccionados dos períodos experimentais (cinética diária ou *daily course* na nomenclatura anglo-saxónica) e medições ao princípio da tarde. O momento de realização das medições ao princípio da tarde foi escolhido de acordo com o critério descrito em Ferreira *et al.* (1996). Estes autores observaram que, em pessegueiro, em condições próximas das encontradas na Atalaia, a maior diferença entre a *g<sub>s</sub>* de plantas submetidas a défice hídrico e a de plantas em conforto hídrico ocorria das 13.00 às 13.30 horas (hora solar que, em 1994, correspondia às 15.30 a 16.00 horas, hora local).

### III.8. Medição do potencial hídrico foliar

Foram realizadas medições de potencial hídrico foliar recorrendo a uma câmara de pressão do tipo *Scholander* (Scholander *et al.*, 1965). Este método, além da sua rapidez, é considerado suficientemente robusto para a utilização no campo (Hsiao, 1990).

As medições incidiram sobre o potencial hídrico foliar de base, o potencial hídrico foliar medido depois do meio-dia e também sobre a evolução ao longo do dia. O período de medições abrangeu os meses de Junho, Julho e Agosto, tanto em 1998 como em 1999. As medições de  $\Psi_b$  foram efectuadas com maior frequência nos períodos de imposição de *stress* hídrico (medições diárias ou de dois em dois dias) e cerca de uma vez por semana fora destes períodos. As medições ao longo do dia (cinéticas diárias) foram realizadas cerca de uma vez por semana e as medições de  $\Psi_f$  mínimo realizaram-se preferencialmente em dias em que se mediu a condutância estomática ao princípio da tarde (ver III.7). Utilizaram-se folhas à sombra, de dimensões médias, de uma zona média dos ramos, excluindo folhas com características fora do comum. Foram escolhidas folhas à sombra para aproximar o  $\Psi_f$  obtido do potencial no xilema dos ramos (Valancogne, 1995). Esta selecção foi também feita por razões de ordem prática, para evitar destacar demasiadas folhas expostas ao sol da zona seleccionada para amostragem, uma vez que eram também necessárias para as medições de  $g_s$  e dado que os ensaios se estenderam por um período longo, implicando o arranque de muitas folhas.

A amostragem foi efectuada em todas as árvores equipadas com sensores de *Granier*, sendo recolhidas 2 folhas por árvore em cada medição. Foram efectuados cortes ligeiros no limbo, ao longo da nervura, de modo a permitir a introdução na câmara de pressão. As medições foram realizadas no menor intervalo de tempo possível (máximo 2 minutos). Em todas as medições efectuadas ao longo do dia optou-se pela colocação das folhas em sacos de plástico fechados contendo um algodão humedecido, para evitar que a folha perdesse água durante o transporte para a câmara.

As medições do chamado  $\Psi_f$  mínimo decorreram cerca das 14 horas (hora solar, isto é, 15.35 h, hora local), normalmente imediatamente a seguir a medições de condutância estomática, tendo-se escolhido este momento para a realização das medições por se verificar ser durante a tarde que se verificavam maiores diferenças entre o  $\Psi_f$  de plantas em conforto hídrico e o de plantas submetidas a défice hídrico (vd. IV.6.1).

### **III.9. Parâmetros do coberto vegetal no período dos ensaios**

#### **III.9.1. Índice de área foliar e grau de cobertura**

O índice de área foliar foi estimado indirectamente dada a dificuldade inerente à medição directa, sobretudo se efectuado por via não destrutiva. Vários métodos indirectos podem ser utilizados, baseando-se normalmente na intercepção da radiação ou em medições do peso da matéria seca ou do número de folhas (vd., p. ex., Nobel *et al.*, 1993 e Norman e Campbell, 1991). A estimativa efectuada baseou-se neste último método e processou-se da forma a seguir descrita. Colheram-se aleatoriamente amostras de cerca de 50 folhas, em que se mediram o comprimento e/ou a largura, tendo-se ainda medido a área foliar com um

planímetro digital (*Tamaya Digitizing Area-Line Meter - Planix 5000*) aplicado às fotocópias das folhas. De referir que este procedimento se tornou viável, dada a morfologia das folhas ter permitido a sua planificação. Na posse destas informações procurou-se relacioná-las de forma a obter uma função que permitisse estimar a área de uma folha a partir do comprimento e/ou largura da mesma. A colheita de amostras teve lugar nos dias 2 de Setembro de 1998, 16 de Junho e 10 de Agosto de 1999.

Paralelamente, procurou-se contar em alguns ramos, escolhidos aleatoriamente, o número de folhas e medir o comprimento e largura destas. Através da primeira relação encontrada, determinou-se para cada um destes ramos a área foliar total e determinou-se uma relação entre esta e o número de folhas. A colheita de amostras teve lugar em 2 de Setembro de 1998 (3 ramos), em 16 de Junho de 1999 (9 ramos) e entre 4 e 10 de Agosto do mesmo ano (15 ramos).

Em cada uma das árvores onde se encontravam instaladas as sondas de medição de fluxo de seiva pelo método de *Granier*, contou-se o número de folhas. Este procedimento foi efectuado em 1998, entre 24 de Julho e 11 de Agosto (1ª contagem) e em 12 de Outubro (2ª contagem). Esta última contagem foi efectuada apenas nas árvores 2, 6, 8 e 11. Em 1999, teve lugar durante o mês de Julho (1ª contagem) e em 7 de Outubro (2ª contagem).

Utilizando as funções encontradas para descrever a área foliar em função do número de folhas, determinou-se a área foliar total para cada árvore.

Admitiu-se que as funções que relacionam a área foliar com as dimensões da folha e com o número de folhas se mantêm durante a fase em que já se iniciou a queda das folhas.

O grau de cobertura foi medido por uma técnica que tem em conta a existência relativa de áreas sombreadas. A técnica e os resultados das medições efectuadas encontram-se descritos detalhadamente em Conceição (2001). Cerca do meio-dia solar o grau de cobertura era, em média, igual a 29%.

### III.9.2. Área activa de transporte no xilema

Foi iniciado o arranque do pomar no Verão de 2001, tendo-se aproveitado o facto para efectuar medições destrutivas, que tiveram como objectivo a determinação da área activa de transporte no xilema. Foram escolhidas quatro árvores, 3 das quais tinham sido anteriormente utilizadas para a medição do fluxo de seiva pelo método de *Granier* (nº 3 e nº 4 de 1999 e nº 3 de 1998, vd. legenda da Figura III.5). As árvores foram escoradas e foi serrado o tronco a um nível próximo do solo, com a zona de corte imersa em água para evitar a ocorrência de cavitação. O tronco foi inserido numa solução aquosa de corante, de forma muito rápida, mantendo-se a árvore numa posição próxima da original. A ascensão da solução no tronco foi assim conseguida pela transpiração natural. Foram utilizados quatro corantes: *safranina*, *verde malaquite*, *verde-rápido* e *toluidina azul*. As árvores foram mantidas cerca de 24 horas

nesta situação, tendo-se efectuado um segundo corte, a um nível superior ao primeiro e posicionado perto da zona de bifurcação do tronco. Os troncos obtidos foram conservados em estearina até se ter procedido ao seu seccionamento transversal em troços de cerca de 3 cm. As amostras obtidas foram polidas e foi medida a área da superfície corada em relação à área total da secção transversal, em amostras próximas da base do tronco. Para o efeito, foi utilizado o *software* AnalySIS Pro 2.11.007 (*Soft Imaging System, GmbH*). Idealmente esta medição deveria ter sido efectuada ao nível da sonda aquecida, no entanto a área corada a este nível era substancialmente inferior, o que nos levou a considerar que parte do corante teria já sido adsorvido pelos tecidos ao longo do trajecto e que desta forma a área detectada seria inferior à área real. Dado que os troncos apresentavam uma forma homogénea, considerou-se que a área de xilema activo para o transporte se manteria sensivelmente idêntica ao longo do comprimento do tronco observado e que seria possível transpor a observação feita perto do ponto de inserção do corante para o nível de colocação da sonda aquecida.

Paralelamente, foi ainda efectuado um estudo sobre o comportamento dos quatro corantes utilizados, no que diz respeito à sua mobilização ao longo do tronco. A face superior de todas as amostras obtidas foi analisada por um sistema de análise de imagem disponibilizado no *software* referido no parágrafo anterior. Foi assim determinada a percentagem de área corada em relação à área total da secção transversal e a distribuição longitudinal do corante nas diferentes secções do tronco foi usada como informação adicional relativa ao perfil radial (de densidade de fluxo de seiva).

### III.10. Observações meteorológicas e cálculo da evapotranspiração de referência

Foram instalados no local sensores meteorológicos para medir a velocidade horizontal e a direcção do vento, a temperatura e a humidade do ar. A velocidade e a direcção do vento foram medidas com um anemómetro A100R e um catavento W200P (*Vector Instruments, Rhyl, Reino Unido*) respectivamente, colocados a uma altura de cerca de 3.5 m e 3.8 m acima do solo. Para a determinação da temperatura e do défice da pressão de vapor do ar foi utilizado um psicrómetro ventilado *standard* (adquirido cerca de 1984, à Universidade de Innsbruck, Áustria), colocado a uma altura de 3.5 m acima do solo. Estas medições decorreram aproximadamente entre o dia do ano 160 (9 de Junho) e 280 (7 de Outubro) nos dois anos de ensaios experimentais, salvo algumas falhas esporádicas dos sensores. Os dados de radiação obtidos foram sobretudo respeitantes ao balanço de radiação e, por esse motivo, encontram-se descritos em III.4.1.

Para o cálculo da  $ET_o$ , utilizou-se o método de *Penman – Monteith* com parâmetros da relva (resistência estomática igual a  $0.70 \text{ s m}^{-1}$  e altura da relva igual a 0.12 m) de acordo com Allen *et al.*, 1998, recorrendo às medições das variáveis meteorológicas obtidas no pomar como justificado em III.1.2. O cálculo foi efectuado para períodos de meia hora, a partir dos quais se calculou a  $ET_o$  diária, por acumulação dos dados.

### III.11. Estimativa de coeficientes culturais

Foi efectuada uma comparação entre coeficientes culturais obtidos a partir da medição de  $ET$  pelo método das flutuações instantâneas ( $K_{c\ ec}$ ) e os estimados a partir da metodologia desenvolvida por Allen *et al.*, 1998 (FAO Penman-Monteith) ( $K_c$ ). Para a estimativa foi escolhida a abordagem que permite a separação de componentes (ver II.5.1). As etapas principais consistiram na identificação das fases da cultura, na estimativa do coeficiente cultural basal ( $K_{cb}$ ), na estimativa do coeficiente de evaporação do solo ( $K_e$ ) e por último na estimativa de  $K_c$ . O objecto de estudo escolhido correspondia a condições não típicas, de acordo com a mesma metodologia. A disposição das plantas no pomar diferenciava-se da utilizada nos pomares de pessegueiro referidos em Allen *et al.*, 1998, nomeadamente no que diz respeito à cobertura do solo, ao compasso, ao tamanho e ao índice de área foliar das árvores (R. Allen, comunicação pessoal); os valores eram inferiores aos considerados para condições padrão, excepto no que diz respeito ao compasso, que era mais alargado. Foi, por isso, calculado um  $K_{cb}$  ajustado para condições de vegetação dita esparsa. Porém, em Portugal, os pomares de pessegueiro têm tipicamente baixas densidades sendo a média cerca de 800 árvores/ha (fonte: INE, 1998). A plantação na Atalaia, Montijo, tinha uma densidade ligeiramente superior (1000 árvores/ha). Estas baixas densidades originam um reduzido grau de cobertura do solo. Densidades semelhantes são comuns noutras regiões do sul da Europa (por exemplo em Itália, como descrito em Giovannini e Monastra, 1998). O  $K_{cb}$  foi ajustado considerando o pomar constituído por “vegetação esparsa”, de acordo com a terminologia usada em Allen *et al.* (1998) e será referido como  $K_{cb\ adj}$ . O ajustamento foi realizado a partir do grau de cobertura do solo da seguinte forma:

$$K_{cb\ adj} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min}) f_{c\ eff}^{1/(1+h)} \quad (III.8)$$

sendo que  $K_{c\ min}$  é o  $K_c$  mínimo para solo nu (varia aproximadamente entre 0.15 e 0.20, de acordo com Allen *et al.*, 1998),  $K_{cb\ full}$  é o  $K_{cb}$  estimado durante a fase de máximo desenvolvimento vegetativo, para vegetação que cobre completamente o solo ou com LAI > 3,  $f_{c\ eff}$  é a fracção efectiva de superfície do solo coberta ou sombreada pela vegetação e  $h$  é altura das plantas [m]. Os valores de  $K_{cb\ full}$  escolhidos são valores tabelados, os quais foram ajustados para o clima, resultando um valor de 0.84 para 1998 e 0.81 para 1999. Foi considerado um valor de  $f_{c\ eff}$  igual a 0.29, dado ser o grau de cobertura do solo medido no pomar. Foi escolhido o valor de 0.15 para  $K_{c\ min}$ .

As estimativas da evaporação do solo e de  $K_e$  foram feitas de acordo com as recomendações para a situação de rega diária. No pomar, a área molhada encontrava-se sombreada durante a maior parte do tempo, por a rega ser localizada (com gotejadores junto aos troncos) e o copado das árvores se desenvolver cerca de 0.4 m acima da superfície. No entanto, mesmo que estas circunstâncias originassem uma redução da evaporação, o efeito de advecção local era provavelmente importante, dadas as áreas de solo expostos entre linhas de grande dimensão (cerca de 71% por volta do meio-dia solar) e a evaporação ter ainda de ser

considerada em  $K_e$  (não o é em  $K_{cb}$ ). O limite superior de  $K_e$ , estabelecido por  $f_{ew} K_{c \max}$  (em que  $f_{ew}$  é a fracção da superfície do solo simultaneamente exposta e humedecida e  $K_{c \max}$  é o valor máximo de  $K_c$  depois de uma rega ou chuvada) não é directamente aplicável. Foi estimado um valor para  $f_{ew}$ , de acordo a aproximação sugerida em Allen *et al.* (1998) e que consiste em multiplicar a fracção da superfície do solo humedecida pela rega ( $f_w$ ) por  $[1-(2/3) f_c]$  para as situações de rega gota-a-gota. De acordo com estes cálculos, o valor de  $f_{ew}$  utilizado foi de 0.05 (uma vez que  $f_w=0.064$ ). Os resultados da estimativa dos coeficientes culturais são apresentados em V.4.

## IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### IV.1. Medição directa da evapotranspiração – apresentação e validação dos resultados

#### IV.1.1. Representatividade espacial das medições

Os resultados da análise de ‘pegada’, realizada tal como descrito nos capítulos II (II.4.1.2) e III (III.3.3.1), apresentam-se de forma resumida na Figura IV.1. O gráfico (a) representa a ‘pegada’ monodimensional (*one dimensional footprint*, na terminologia anglo-saxónica ou ainda função *footprint*). A sua observação permite prever que as contribuições mais representativas para o fluxo medido têm origem numa área que se estende desde o ponto de medição até cerca de 50 a 100 m de distância. A determinação da função  $FAN(x_L)$  (ver II.4.1.2) mostrou que mais de 80% do fluxo vertical medido a uma altura de 4.5 m, tem origem em pontos situados até cerca de 100 m de distância do local de medição (Figura IV.1 (b)). Até 200 m, essa percentagem sobe para 90% e a 600 m é cerca de 97%.

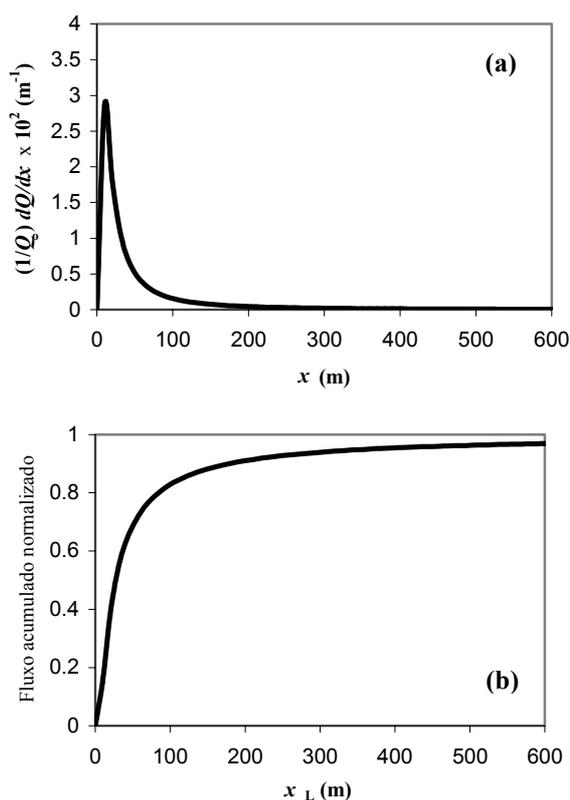


Figura IV.1 – (a) Densidade de fluxo relativa (‘pegada’ monodimensional); (b) Fluxo acumulado normalizado;  $x$  – distância horizontal entre o ponto de medição e um determinado ponto da região donde são originários os fluxos;  $x_L$  – distância entre o ponto de medição e o limite da região donde são originários os fluxos.

A determinação do máximo da função *footprint* permitiu ainda prever que as medições, efectuadas a 4.5 m de altura, eram sobretudo afectadas pelos fluxos provenientes de

uma área localizada a cerca de 9 m de distância do ponto de medição, na direcção do vento (máximo da função densidade de fluxo relativa).

O *fetch* era mais favorável para as direcções N, NO, O e SO (cerca de 545, 500, 300 e 150 m, respectivamente – Figura III.22). De entre estas direcções, a direcção SO e O apresentavam uma razão altura: *fetch* inferior a 1:100. No entanto, de acordo com a análise de pegada efectuada, uma distância de 150 m na direcção do vento (por exemplo, na direcção SO) significaria que seria de esperar que quase 90% dos fluxos, detectados pelo sistema de medição das flutuações instantâneas, viessem realmente desta área de influência. O mesmo tipo de análise para a direcção oeste indicou uma percentagem de 94 %.

Assim sendo, foram considerados neste estudo os dados recolhidos com o sistema de medição das flutuações instantâneas, em dias de ventos dominantes soprando das direcções oeste e sudoeste, tal como os das direcções norte e noroeste. Os dados recolhidos em dias de ventos dominantes oriundos de outras direcções foram eliminados, dado que a percentagem de fluxos detectados provenientes efectivamente das zonas de influência situadas nessas direcções, se estimou ser inferior a 70 %.

Como resultado desta análise, foram seleccionadas as medições efectuadas em dias de vento predominante oriundo das direcções N, NO, O e SO (zonas sombreadas da Tabela IV.1).

Tabela IV.1 – Selecção dos dados de acordo com a análise de pegada. As zonas sombreadas a cinzento indicam as direcções do vento predominantes em dias de dados seleccionados. FAN – fluxo acumulado normalizado.

Direcção do vento	<i>Fetch</i> (m)	FAN
N	545	0.97
NO	500	0.96
O	300	0.94
SO	150	0.88
S	35	0.58
SE	30	0.53
E	25	0.47
NE	47	0.67

Estas direcções correspondem às direcções do vento predominantes no local (exceptuando a direcção SO, ver Figura III.10) pelo que não seriam de esperar à partida muitos dias com vento predominante das direcções excluídas.

#### IV.1.2. Considerações globais sobre o erro de fecho da equação do balanço de energia

Numa perspectiva de análise da validade dos resultados, foi verificado o fecho da equação do balanço de energia da superfície (ver descrição detalhada em IV.2), comparando os fluxos de calor sensível ( $H$ ) e latente ( $\lambda E$ ), medidos pelo método das flutuações instantâneas, com a energia disponível ( $R_n - G$ ). Realizou-se a comparação dos balanços de

energia em que  $G$  foi medido simultaneamente pelos dispositivos experimentais de duas e oito placas e a análise é feita em IV.2.4.2. Esta análise permitiu determinar qual a influência dos dois tipos de medição no fecho da equação do balanço de energia. Quando da utilização de duas placas obteve-se um erro de fecho de cerca de 30% (vd. Figura IV.23 (a)), que diminuiu para cerca de 10% (vd. Figura IV.23 (b)) quando  $G$  foi medido com o sistema de oito placas.

Deste modo, com uma estimativa de  $G$  otimizada, foi possível obter um erro de fecho de uma magnitude de cerca de 10%. Este valor é geralmente aceite como um indicativo de medições consistentes dos fluxos pelo método das flutuações instantâneas (Thompson *et al.*, 1999; Twine *et al.*, 2000). Frequentemente, o erro associado à medição da energia disponível assume o mesmo valor (Kustas *et al.*, 1999; Twine *et al.*, 2000). Nestas condições, o erro de fecho é portanto passível de ser atribuído à incerteza nas medições de  $R_n$  e  $G$ , não se podendo concluir existir uma subestimativa nas medições dos fluxos de calor latente e sensível.

Por outro lado, sendo 10% a subestimativa encontrada para o total dos fluxos de calor atmosféricos, o grau de incerteza associado à medição de  $\lambda E$  será inferior, o que é considerado suficiente na maior parte das utilizações agrícolas (Kizer e Elliott, 1991).

Consequentemente, consideraram-se válidas, para o fim a que se destinam, as medições de fluxos efectuadas neste contexto.

### IV.1.3. Análise espectral

Observando a Figura IV.2, podemos constatar que os espectros de variância apresentam uma concordância aceitável com a recta de declive  $-2/3$ , na zona do subintervalo de inércia (ver II.4.1.2). Tal permite inferir que a presença de ruído causado pelos sensores não se faz sentir de forma apreciável.

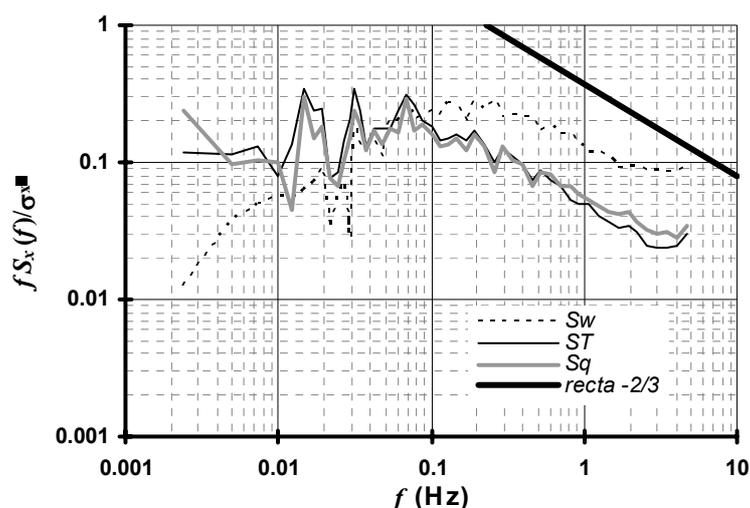


Figura IV.2 – Espectro de variância de  $w$  (componente vertical da velocidade do vento),  $T$  (temperatura do ar) e  $q$  (concentração de vapor de água);  $f$  é a frequência de medição (não normalizada, dado as medições terem sempre decorrido no mesmo local e à mesma altura) e  $fS_x(f)/\sigma_x^2$  a função espectral normalizada; série temporal recolhida no dia 26.06.98.

Observando a Figura IV.3, podemos constatar que o fluxo é desprezável a partir de 5 Hz, garantindo-se então a obtenção de boas estimativas dos fluxos, nas condições de medição utilizadas, dado serem captadas todas as contribuições de alta frequência. Na zona das baixas frequências, há também tendência para uma aproximação da covariância a zero, o que significa que o intervalo de integração é suficientemente longo para que sejam captados os fluxos transportados pelos movimentos atmosféricos de baixa frequência.

Desta forma, é possível concluir que a frequência de amostragem (5 ou 10 Hz, vd. III.3.2) foi suficientemente elevada para ter em conta todas as componentes de alta frequência e também que o tempo de integração (30 minutos) é suficientemente elevado para incluir as componentes de baixa frequência (de acordo com o exposto em II.4.1.2).

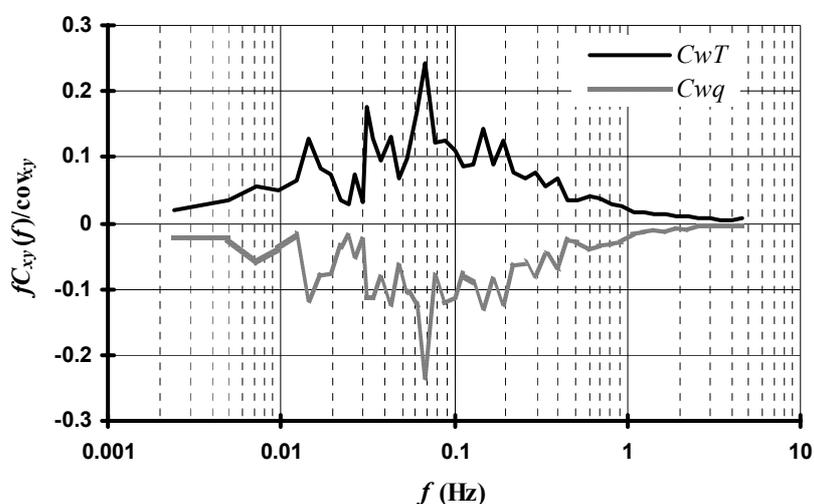


Figura IV.3 – Coespectro dos sinais associados da componente vertical da velocidade do vento e temperatura do ar ( $C_{wT}$ ) e da componente vertical da velocidade do vento e concentração de vapor de água ( $C_{wq}$ );  $f$  é a frequência de medição (não normalizada, dado as medições terem sempre decorrido no mesmo local e à mesma altura) e  $fC_{xy}(f)/cov_{xy}$  a função do coespectro normalizada; série temporal recolhida no dia 26.06.98.

#### IV.1.4. Correção WPL e correção $O_2$

A correção WPL (vd. III.3.5.1) originou, em média, um aumento de cerca de 2% do fluxo diário de calor latente, em relação ao fluxo medido, nos dois anos considerados (ver Figura IV.4). O valor desta correção é proporcional a  $H$ , podendo assumir valores mais elevados quando  $H$  é superior a  $\lambda E$  (Berbigier *et al.*, 1996) como atrás referido. Dado que a razão  $H/\lambda E$  é, em média, próxima de 1 (vd. IV.2.1) não seria de esperar uma correção WPL muito significativa. A correção para o efeito da absorção de radiação ultravioleta pelo oxigénio (ver III.3.5.2), originou um aumento de  $\lambda E$  de cerca de 5%, inferior ao encontrado por Berbigier *et al.* (1996), em floresta de pinheiro.

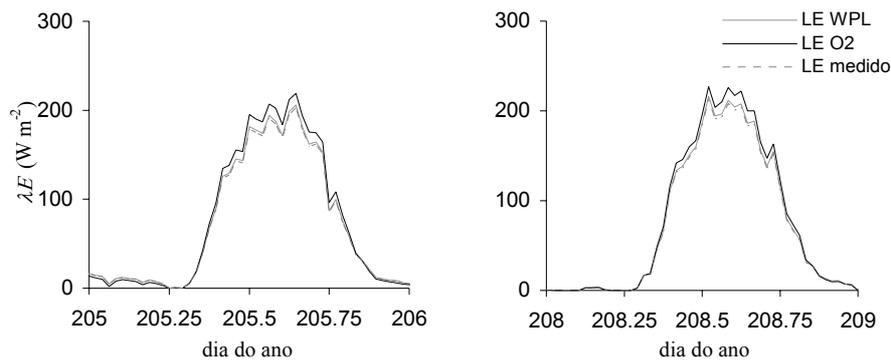


Figura IV.4 – Exemplos do efeito das correcções WPL e O<sub>2</sub> nos fluxos de calor latente ( $\lambda E$ ), para dias representativos, em 1998; ‘LE WPL’ representa a densidade do fluxo de calor latente depois de efectuada a correcção WPL, ‘LE O<sub>2</sub>’ representa a densidade do fluxo de calor latente depois de efectuada a correcção O<sub>2</sub> e ‘LE medido’ representa a densidade do fluxo de calor latente medida, sem qualquer correcção.

#### IV.1.5. Validade dos dados obtidos

Numa abordagem inicial, considerando uma razão de 1:100, entre a altura a que se realizaram as medições e a distância ao bordo da parcela, como valor orientativo, foi possível determinar duas direcções para as quais o *fetch* não era limitante: NO e N. Realizada a análise de pegada (IV.1.1), foi ainda possível concluir da exequibilidade de utilização de dados obtidos em dias de direcção do vento predominante SO ou O. Para o conjunto de dados reunidos recaiu a análise do balanço de energia, mostrando que o erro de fecho da equação se encontra dentro dos limites habitualmente encontrados para estudos no mesmo âmbito (IV.1.2). A análise espectral realizada confirmou a validade das condições de recolha dos dados, no que diz respeito à frequência de amostragem, ao intervalo de integração e à possibilidade de existência de ruídos de fundo (IV.1.3). Desta forma, pensamos ter um conjunto de medições da evapotranspiração válido e fiável para os objectivos que pautam este estudo.

#### IV.1.6. Evolução do fluxo de calor latente ao longo do dia

Os resultados obtidos para a densidade do fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ) são apresentados nas Figuras IV.5, IV.6 e IV.7.

No período considerado em 1998, o valor máximo diário ocorre, na maior parte dos dias, entre as 12h30 e as 15h30; o valor máximo absoluto foi de 295 W m<sup>-2</sup>, registado no dia 207 (26 de Julho) às 15 h (Figura IV.5). Dado não se ter verificado a rega nos dias 177, 192, 210 e 246 à noite, os fluxos medidos nos dias que se seguiram àqueles (178, 179, 193, 194, 211 e 248) são certamente influenciados por este factor.

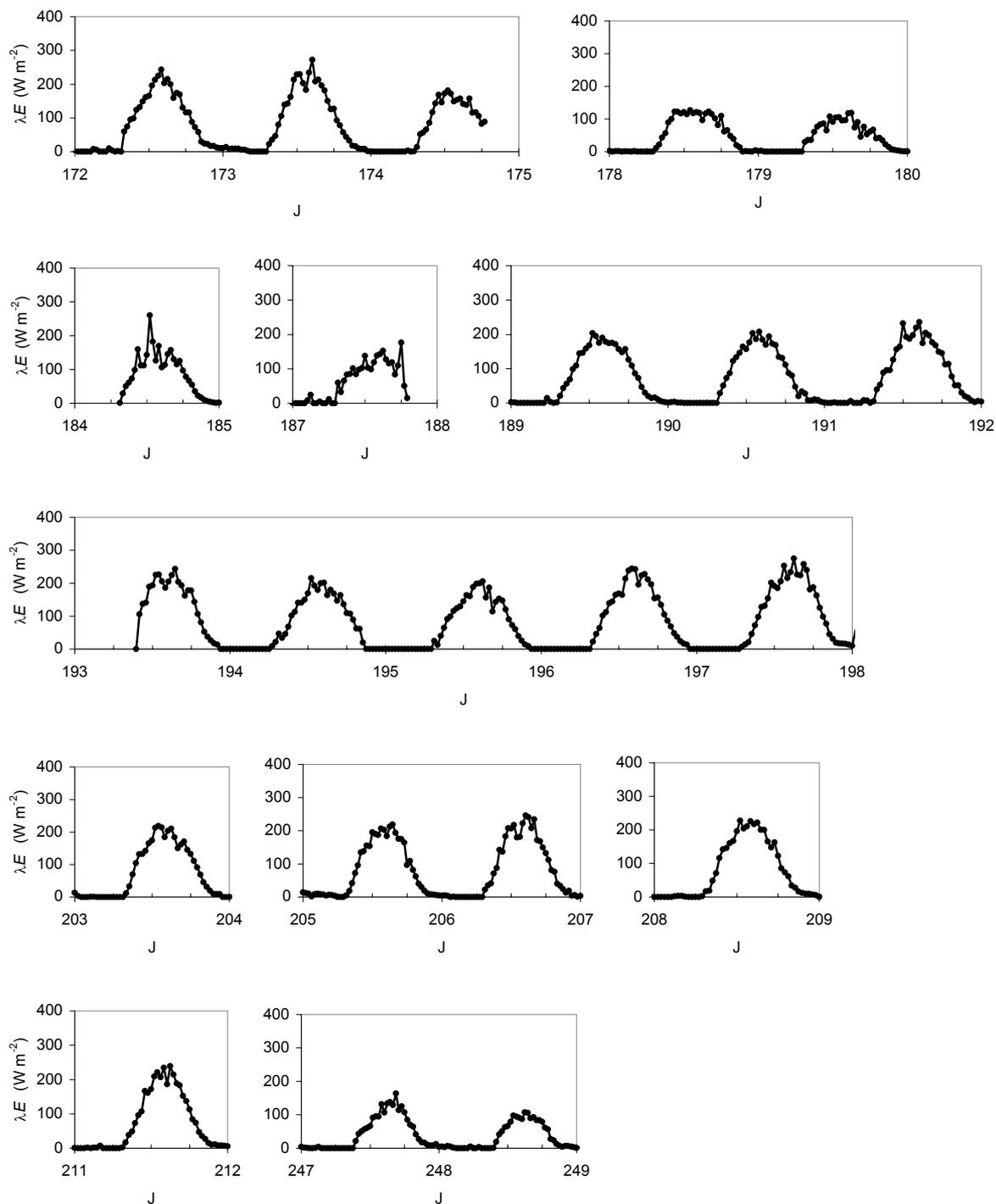


Figura IV.5 – Densidade de fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ) medida pelo método das flutuações instantâneas; J representa o dia do ano; 1998.

Durante o período estudado em 1999, a densidade do fluxo de calor latente apresentou valores máximos também entre as 12h30 e as 15h30, de forma geral. O máximo absoluto registou-se no dia 190 às 13h30 e foi de  $329 W m^{-2}$  (Figura IV.6).

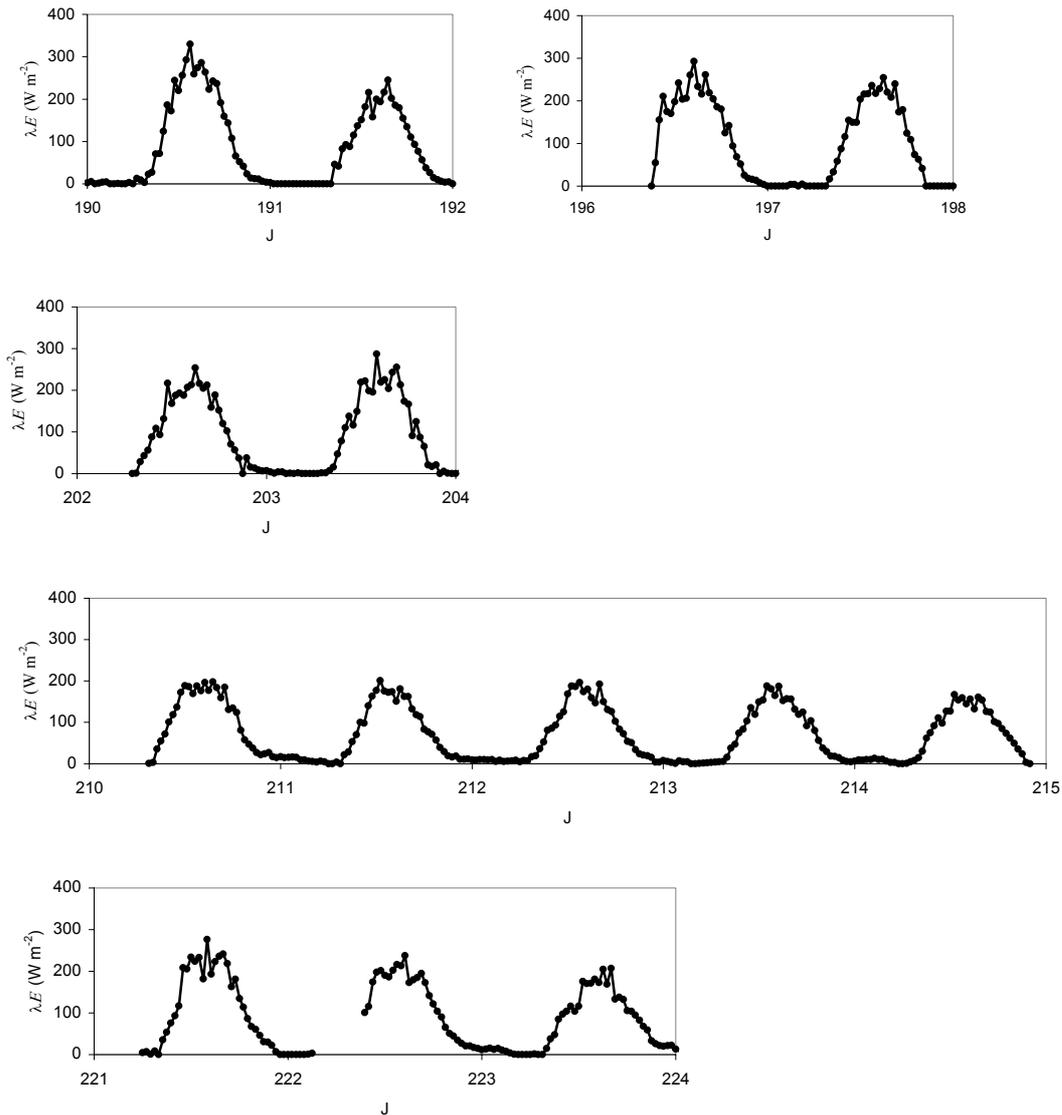


Figura IV.6 – Densidade de fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ) medida pelo método das flutuações instantâneas; J representa o dia do ano; 1999.

#### IV.1.7. Evapotranspiração diária

As medições semi-horárias do fluxo de calor latente, realizadas com o método das flutuações instantâneas, foram convertidas na evapotranspiração diária, apresentando-se na Figura IV.7 os resultados obtidos. A evapotranspiração medida ( $ET_{ec}$ ) variou entre 1.4 e 3.6 mm/dia em 1998 e entre 2.1 e 3.3 mm/dia em 1999. A  $ET_{ec}$  média foi cerca de 2.5 mm/dia em 1998 e 2.6 mm/dia em 1999, para os períodos de medições considerados. A relação de  $ET_{ec}$  com  $ET_o$  é apresentada em V.4.

De referir que, os resultados obtidos para a  $ET$  diária em pomar de pessegueiro, na região de Águas de Moura, Setúbal, por Ferreira *et al.* (1996), também com o método das

flutuações instantâneas e em condições semelhantes às deste estudo, indicaram valores inferiores (cerca de 2.1 mm/dia, em média, durante o mês de Julho) aos encontrados para o mesmo período na Atalaia - Montijo (2.6 mm/dia, em média, considerando ambos os períodos experimentais). A diferença encontrada poderá eventualmente decorrer da evolução das condições ambientais durante os períodos de medição, ou poderá relacionar-se com a frequência da rega: diária na Atalaia (Montijo) e realizada a cada 3 ou 4 dias em Águas de Moura, numa situação em que a *ET* real apresentava já um decréscimo de 20% em relação à *ET* máxima (Ferreira e Valancogne, 1997).

No pomar em estudo, a comparação dos resultados da medição de *ET* obtidos com o método da ‘análise da renovação na superfície’ (vd. II.4) e com o método das flutuações instantâneas, indicou uma boa concordância entre ambos (Spano *et al.*, 2000).

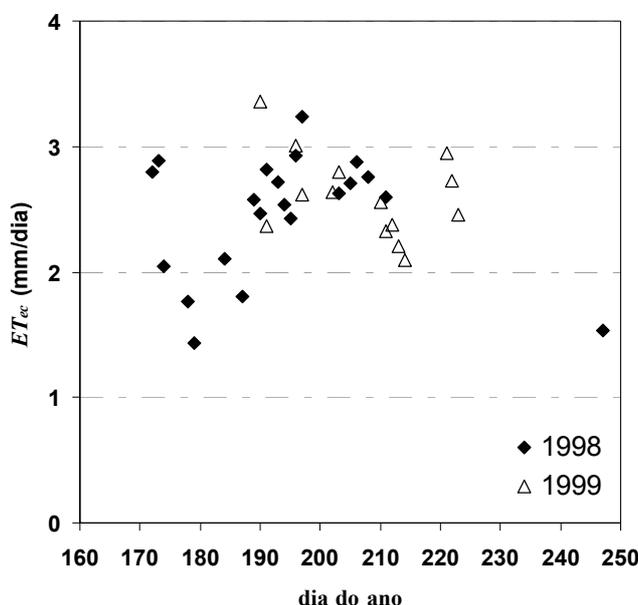


Figura IV.7 – Evapotranspiração diária medida pelo método das flutuações instantâneas (*ET<sub>ec</sub>*).

## IV.2. Balanço de energia da superfície

Nesta secção apresentam-se os outros termos do balanço de energia (além do fluxo de calor latente), a relação entre eles e o erro de fecho. *H* e  $\lambda E$  foram medidos em simultâneo pelo mesmo dispositivo. Logo, em primeiro lugar, apresentam-se os resultados de *H* e descreve-se a relação entre *H* e  $\lambda E$  (IV.2.1). Depois faz-se uma apresentação crítica dos resultados obtidos para *G* (IV.2.2) incluindo uma modelação simples que permitiu completar as séries obtidas. Em terceiro lugar, analisa-se a repartição de energia (IV.2.3) através de uma caracterização geral (IV.2.3.1) e da relação entre cada uma das componentes não radiativas e  $R_n$  (IV.2.3.2 e IV.2.3.3) e finalmente o erro de fecho (IV.2.4).

### IV.2.1. Calor latente *versus* calor sensível

Os padrões de variação ao longo do dia dos fluxos de calor sensível e latente, são apresentados nas Figuras IV.8 e IV.9. Frequentemente, os fluxos máximos de  $H$  e  $\lambda E$  situam-se entre 200 e 250  $\text{W m}^{-2}$  e ocorrem, de forma geral, durante ou após o meio-dia solar. Em 1998, durante o período de recolha de dados, a razão entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente,  $H/\lambda E$  (razão de *Bowen*), calculada para períodos diurnos, variou entre 0.7 e 3.1 (Tabela IV.2). Em onze dos vinte dias analisados, a diferença entre os dois fluxos não excedeu 10%, isto é  $H/\lambda E \approx 1$ . Nos dias do ano 178 e 179 (27 e 28 de Julho) registaram-se os valores mais elevados, 2.6 e 3.1, respectivamente. A razão para o aparecimento destes valores prende-se com a ausência de rega nos dias 177 e 178 à noite. Nos dias 172 a 174,  $H/\lambda E$  é também superior a 1, o que terá sido possivelmente consequência de um *stress* hídrico ligeiro, induzido pela prática de uma rega moderada (durante os dias que antecederam estas medições de fluxos a rega foi de cerca de 2.5 a 3 mm/dia) o que se confirma pelo aparecimento de valores de potencial hídrico foliar de base baixos, obtidos durante esta fase, relativamente a períodos em que as plantas se encontravam em conforto hídrico (ver Figura IV.72).

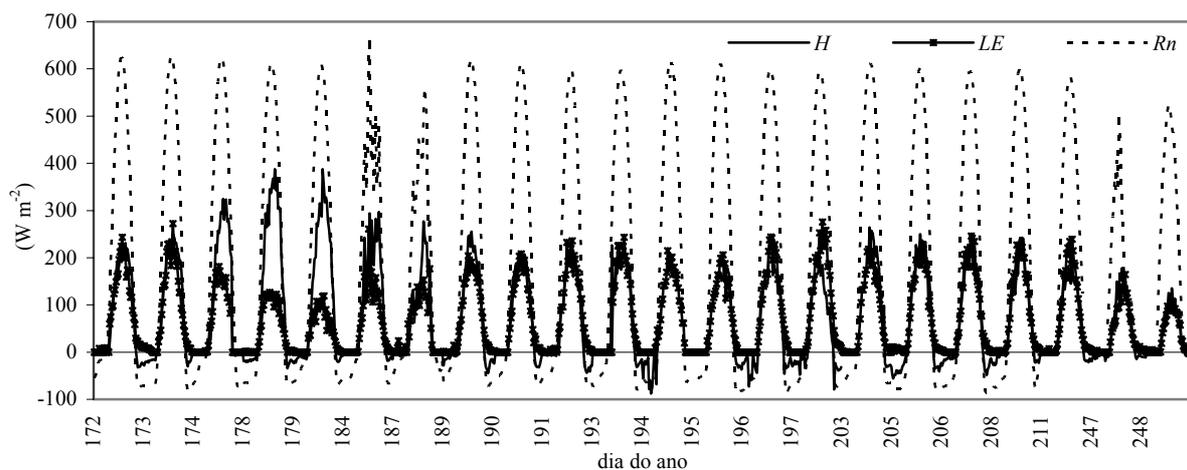


Figura IV.8 – Variação ao longo do dia dos fluxos de calor sensível e latente, para o conjunto de medições seleccionadas em 1998; os momentos em que as medições são interrompidas evidenciam-se na Tabela IV.2 com um tracejado vertical.

Tabela IV.2 – Evolução da razão  $H/\lambda E$  ao longo do período de medições em 1998.

dia do ano	172	173	174	178	179	184	187	189	190	191	193	194	195	196	197	203	205	206	208	211	247	248
período diurno considerado	8-20 h	8-20 h	8-18.30 h	8-20 h	8-20 h	8-20 h	8-19 h	8-20 h	8-20 h	8-20 h	10-20 h		16-20 h		8-20 h	13-20 h	8-20 h	8-20 h	8-20 h	8-20 h	9.30-20 h	10-20 h
$H/\lambda E$	1.1	1.2	1.7	2.6	3.1	1.7	1.4	1.1	1.1	0.8	0.9	-	1.0	-	0.7	1.2	1.1	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1

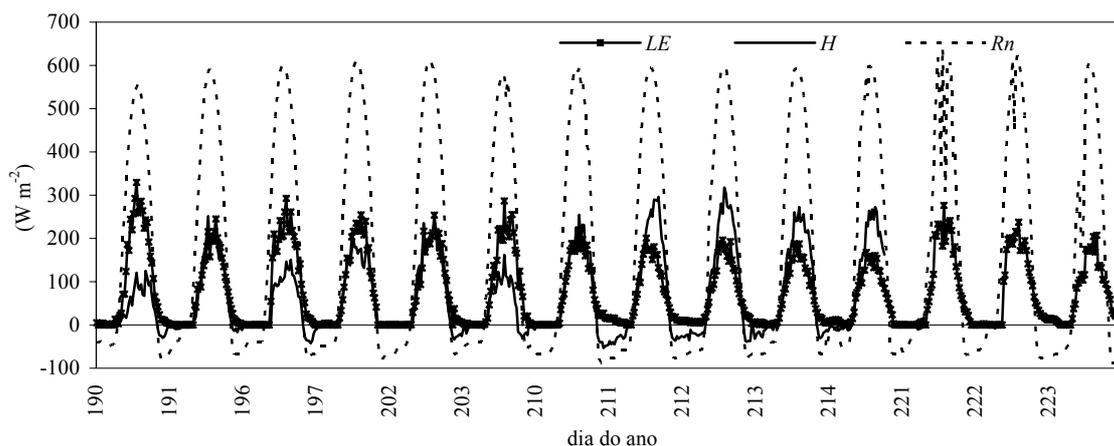


Figura IV.9 – Variação ao longo do dia dos fluxos de calor sensível e latente, para o conjunto de medições seleccionadas em 1999; os momentos em que as medições são interrompidas evidenciam-se na Tabela IV.3 com um tracejado vertical.

Tabela IV.3 – Evolução da razão  $H/\lambda E$  ao longo do período de medições em 1999.

dia do ano	190	191	196	197	202	203	210	211	212	213	214	221	222	223
período diurno considerado	8-20 h	8.30-20 h	9.30-20 h	8-20 h										
$H/\lambda E$	0.3	0.9	0.5	0.8	0.9	0.4	1.0	1.4	1.4	1.4	1.5	-	-	-

De forma geral, pode então dizer-se que, para o pomar em estudo, em dias em que as plantas estão em conforto hídrico e quando não ocorrem valores de  $VPD$  do ar excepcionalmente elevados, a razão  $H/\lambda E$  é próxima de 1. Se as plantas forem submetidas a défice hídrico (como durante uma falha do sistema de rega) a razão  $H/\lambda E$  tende a ser superior a 1. Pelo contrário, se as plantas estiverem em condições de conforto hídrico, e se se verificarem valores de  $VPD$  do ar elevados, a razão tende a ser inferior a 1 (Figura IV.10).

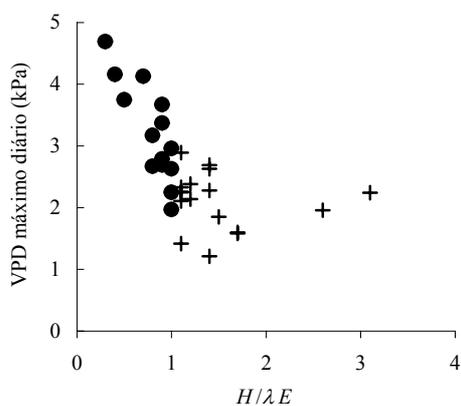


Figura IV.10 – Variação diária da razão  $H/\lambda E$  com o  $VPD$  máximo diário; (•) na ausência de restrições hídricas, (+) na presença de restrições hídricas.

Os estudos em que a avaliação da razão  $H/\lambda E$  é abordada, para o caso de pomares regados, não são frequentes. A informação encontrada, relativa a pessegueiro (Ferreira *et al.*, 1996), em condições próximas das deste estudo e com rega por aspersão a cada 3 ou 4 dias, reporta valores diários de  $H$  e  $\lambda E$  que conduzem a variações de  $H/\lambda E$  entre 0.7 e 1.1, durante um período de cerca de dez dias. Em pomar de limoeiro, Daamen *et al.* (1999) encontraram também uma razão  $H/\lambda E$  próxima da unidade, desde que não se verificasse um déficit hídrico acentuado. Estas observações são concordantes com as efectuadas no âmbito deste estudo, apesar de  $H/\lambda E$  assumir, na Atalaia – Montijo, valores mais reduzidos para alguns dias (por exemplo 0.3 no dia 190 em 1998, Tabela IV.3), em que se conjugaram condições de conforto hídrico e valores máximos diários de  $VPD$  do ar elevados (vd. Figura IV.10).

#### IV.2.2. Fluxo de calor sensível para o solo

A incerteza inerente às medições do fluxo de calor sensível para o solo ( $G$ ) pode ser grande, dado que a área habitualmente utilizada para medir  $G$  tem uma dimensão muito menor que a utilizada nas medições dos fluxos de calor sensível e latente (Twine *et al.*, 2000). Localmente, a medição de  $G$  pode também não representar correctamente o comportamento da superfície, por ser utilizado um número insuficiente de placas de fluxo de calor. Esta dificuldade é acrescida no caso de cobertos descontínuos, em que existem zonas que vão ficando alternadamente sombreadas ou expostas à radiação. Nos cobertos descontínuos, o processo de medição terá que ter em conta a acentuada variabilidade espacial da densidade de fluxo de calor para o solo, à superfície.

Neste estudo, pretendeu-se avaliar a importância do fluxo de calor sensível para o solo, relativamente aos outros componentes do balanço energético e, simultaneamente, aplicar as relações obtidas para períodos em que não se efectuaram medições.

As medições em que se utilizou um sistema de duas placas para a medição de  $G$  (Figura IV.11) não se mostraram representativas, não reproduzindo as condições reais de exposição do solo. Uma das placas em cada um dos dois sistemas (a mais próxima da linha) encontrava-se à sombra a maior parte do tempo, enquanto que a segunda se encontrava exposta à radiação solar durante uma parte da manhã. De manhã cedo e ao fim da tarde (quando a evapotranspiração é mais baixa), a superfície do solo encontrava-se sombreada na sua generalidade. Durante estes períodos, as medições eram mais representativas das condições da parcela, do que durante o resto do dia. Por outro lado, durante a tarde (mais concretamente entre o meio-dia e o meio da tarde) ocorrem as taxas mais elevadas de evapotranspiração. Nesta altura, em que uma grande parte da superfície do solo no lado poente se encontrava ao sol, as medições efectuadas não representam as condições reais no terreno, dado que as placas estavam colocadas no lado nascente, encontrando-se uma, ou ambas, sombreadas (Figura IV.11). Ocorre então uma subestimativa de  $G$  durante este

período. Uma análise destes dados, no contexto do estudo do balanço de energia da superfície, recorrendo à comparação com os obtidos pelo sistema de oito placas, é apresentada numa secção seguinte (IV.2.4.2), onde se discute a redução de incerteza conseguida com este sistema (vd. Figura IV.23).

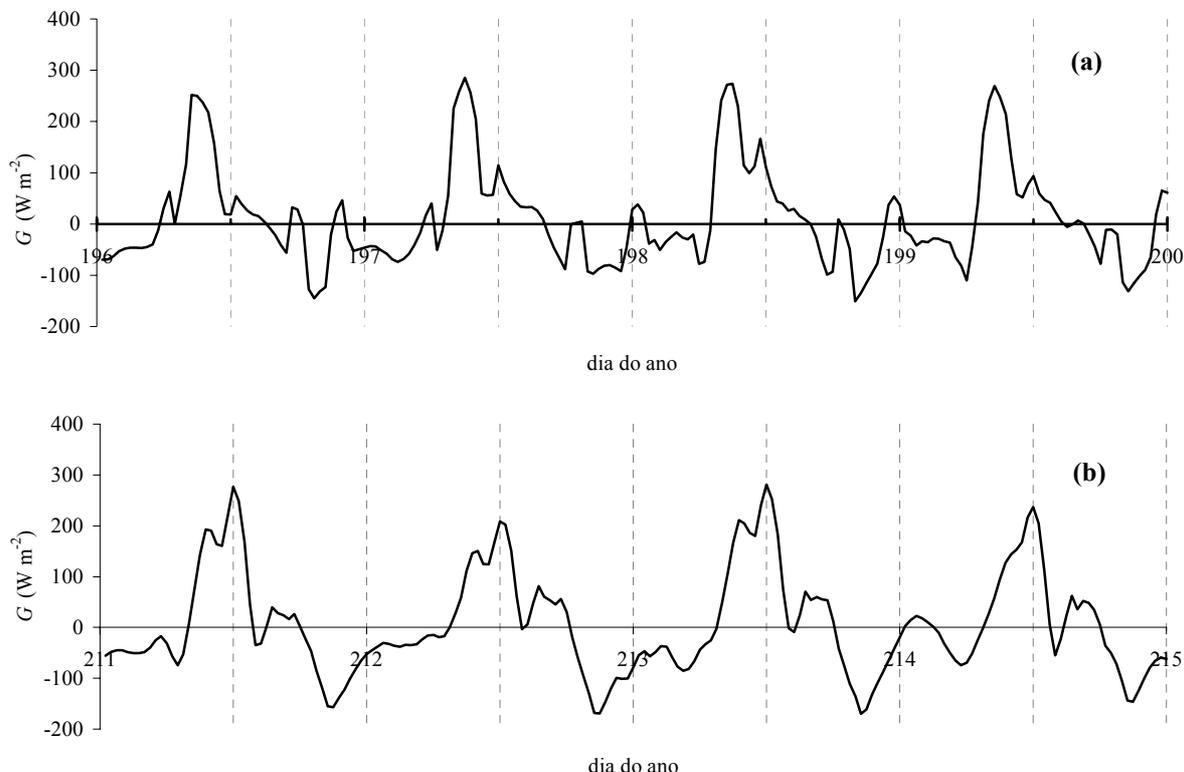


Figura IV.11 – Evolução do fluxo de calor sensível para o solo ( $G$ ) durante alguns dias consecutivos, medido com o sistema de duas placas; (a) 1998, (b) 1999.

Observando os dados obtidos com o sistema de oito placas (Figura IV.12), constatou-se, como esperado, uma melhor representatividade das condições da parcela, tendo-se optado pela utilização desta informação para a prossecução do trabalho e para a validação das medições obtidas com o método das flutuações instantâneas. É assim evidente a necessidade de recorrer a um maior número de observações para avaliar  $G$  quando o coberto é descontínuo, apresentando áreas de solo nu que alternam com linhas de plantas, em relação a um coberto uniforme e que cubra totalmente o solo ou a um solo nu. Esta necessidade torna-se mais pertinente para cobertos constituídos por plantas altas, em que a combinação da altura e da orientação das linhas de plantas condiciona a quantidade de radiação que atinge o solo criando uma grande variabilidade, espacial e ao longo do dia (Figura IV.13).

Na Figura IV.13 é possível observar de forma detalhada a evolução de  $G$ , ao longo de um dia representativo de condições de céu limpo, em cada um dos pontos de medição. As placas de medição de  $G$  estavam dispostas regularmente, entre duas linhas, estando uma das oito placas colocada exactamente sobre a linha, no lado este (como referido em III.4.2.1). A densidade de fluxo medida sobre a linha, bem como a medida nos pontos mais próximos da linha no lado este ( $G_1$  e  $G_2$  na Figura IV.13), apresentaram um máximo às 9.30 h

(correspondente aos pontos de abcissa 196.396 na Figura IV.13). O pico observado para  $G$  às 9.30 h (hora local), resulta então do efeito combinado da orientação das linhas e da posição do sol. Durante a tarde, quando a radiação solar incide directamente no lado oeste da linha de plantação, observa-se a formação de um pico no ponto de medição G7 (Figura IV.13), o mais próximo da linha nesse lado. Ao nível da parcela, este efeito não é, porém, visível, dado que o fluxo medido em G7 é compensado por fluxos negativos medidos no lado oeste da linha.

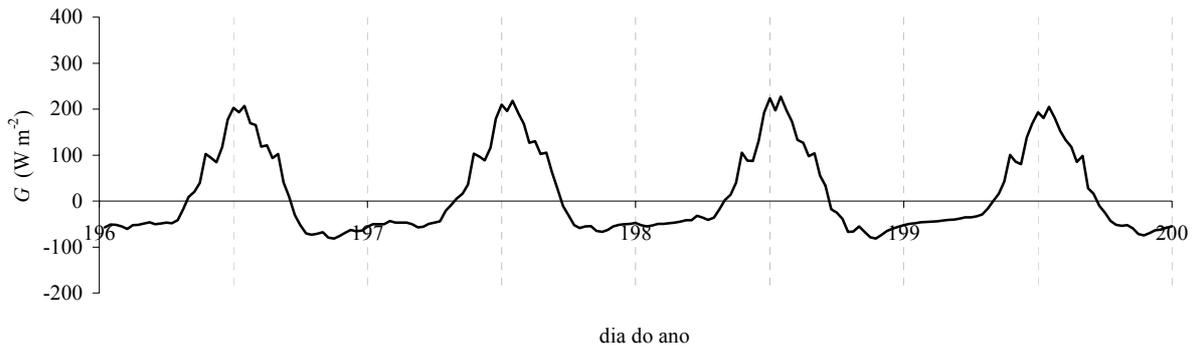


Figura IV.12 – Evolução do fluxo de calor sensível para o solo ( $G$ ) durante alguns dias consecutivos (1998), medido com o sistema de oito placas.

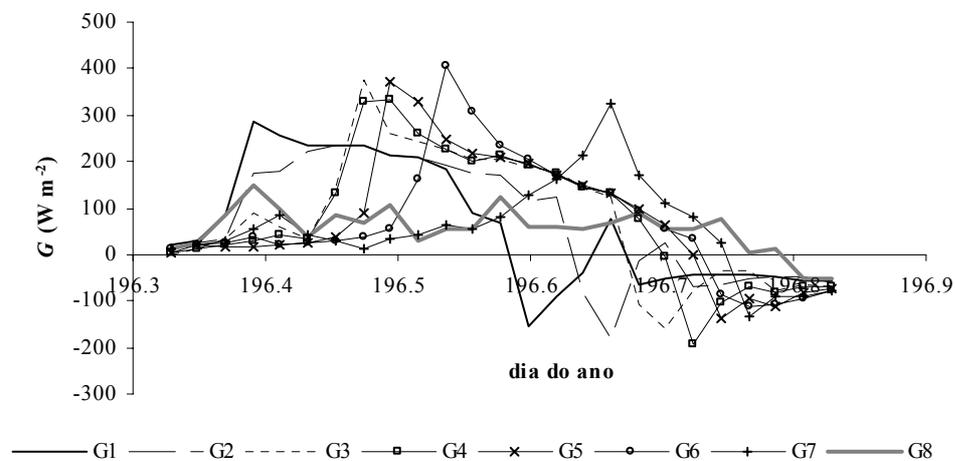


Figura IV.13 – Evolução da densidade de fluxo de calor sensível para o solo ( $G$ ), ao longo de um dia representativo de condições de céu limpo (15/07/1998), em vários pontos de medição distribuídos regularmente entre duas linhas de plantação e segundo uma recta perpendicular a estas; os índices 1 a 8 representam a identificação das placas de medição estando a placa 8 colocada sobre a linha mais a este.

A Figura IV.14 apresenta a variação ao longo do dia de  $R_n$  e  $G$ , em alguns dias representativos de condições de céu limpo. O traçado diurno de  $G$  apresenta-se fora de fase em relação a  $R_n$  e, conseqüentemente, durante a manhã a subida de  $G$  precede a de  $R_n$ , enquanto que, durante a tarde,  $G$  diminui mais rapidamente que  $R_n$ .

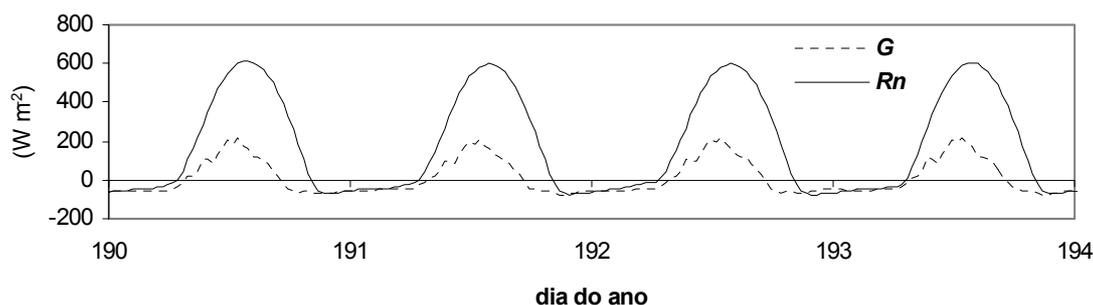


Figura IV.14 – Diferença de fase entre  $G$  e  $R_n$  em dias de céu limpo (exemplo para os dias do ano 190-193);  $G$  medido pelo sistema de 8 placas, 1998.

O intervalo de tempo entre o momento em que ocorre o máximo diário de  $G$  e aquele em que ocorre o máximo de  $R_n$  é de cerca de uma hora. Considerando este desfasamento temporal entre as horas a que se verificam  $R_n$  e  $G$  máximos e relacionando as duas variáveis, é possível obter uma correlação positiva sob a forma de uma função do tipo  $G_t = f(R_{n_{t+1}})$  (Figura IV.15), significando que, enquanto  $G$  se reporta a cada instante  $t$ ,  $R_n$  correspondente diz respeito ao instante  $t + 1$ , sendo a unidade a hora (desfasamento temporal considerado). A relação foi estabelecida utilizando medições semi-horárias de  $G$ , obtidas com o sistema de 8 placas, em dias de céu limpo (dias do ano 185, 186, 189-200) e apresenta a seguinte forma:

$$G_t = 0.0005R_{n_{t+1}}^2 + 0.0874R_{n_{t+1}} - 52.59 \quad (IV.1)$$

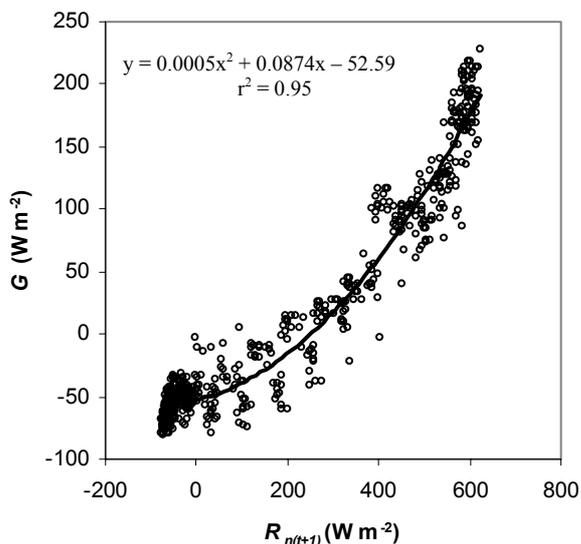


Figura IV.15 – Relação entre  $G$  obtido com o sistema de 8 placas e  $R_n(t+1)$ , fazendo ‘coincidir’ os máximos das duas curvas, 1998; dias de céu limpo (valores semi-horários).

Comparando  $G$  medido (à escala semi-horária) com o sistema de 8 placas, e  $G$  estimado a partir de  $R_n$  com a equação IV.1, verifica-se que, dada a elevada correlação entre ambos, as duas curvas quase se sobrepõem, sendo a diferença entre ambas de cerca de 2%

(Figura IV.16). Esta comparação não tem por objectivo a validação da equação IV.1 (uma vez que o conjunto de dados medidos é o mesmo que foi utilizado para a construção da relação); apenas pretende tornar possível a visualização das diferenças entre  $G$  medido e  $G$  estimado, ao longo do dia. Esta relação foi usada para estimar  $G$  para períodos em que não se encontravam disponíveis dados obtidos com o sistema de 8 placas (vd. IV.2.4.2).

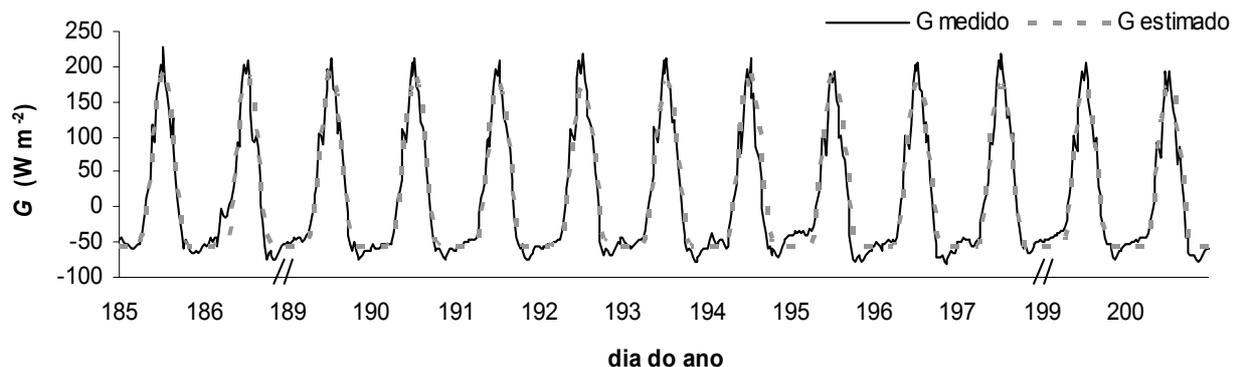


Figura IV.16 – Comparação entre  $G$  medido pelo sistema de 8 placas e  $G$  estimado com a equação IV.1.

### IV.2.3. Repartição da energia da radiação nas diferentes componentes do balanço de energia

#### IV.2.3.1. Caracterização geral da repartição de energia

A Figura IV.17 apresenta um exemplo da contribuição relativa de cada componente para a equação do balanço de energia, para alguns dias dos períodos experimentais considerados, em que se verificaram condições de céu limpo ou de nebulosidade reduzida e temporária. Como analisado em IV.2.2, existe um desfaseamento temporal entre a evolução diária de  $G$  e a de  $R_n$ , tendendo  $G$  a ser mais elevado durante o início da manhã do que no final da tarde. Os máximos diários de  $G$  aproximam-se de  $200 \text{ W m}^{-2}$ , enquanto que para  $R_n$  são de cerca de  $600 \text{ W m}^{-2}$  (vd. Figura IV.17).  $H$  e  $\lambda E$  atingem valores máximos diários de cerca de 200 a  $300 \text{ W m}^{-2}$  (vd. Figura IV.17).

Considerando os valores máximos diários dos vários componentes da equação do balanço de energia (Figura IV.17), é possível observar que  $G$  tem uma magnitude que se aproxima frequentemente da de  $H$  ou  $\lambda E$ . A meio do dia, é possível observar que cerca de um terço da energia proveniente do balanço da radiação corresponde a  $G$  e os restantes dois terços a  $H$  e  $\lambda E$  em conjunto. Em condições de conforto hídrico (vd. IV.2.1) e de novo a meio do dia, dois terços de  $R_n$  tendem a repartir-se de forma semelhante entre  $H$  e  $\lambda E$  (cerca de um terço para  $H$  e um terço para  $\lambda E$ ). Nestas condições, a quantidade de energia canalizada para  $G$  é então comparável às quantidades repartidas em  $H$  e  $\lambda E$ , assumindo  $G$  semelhante

relevância no balanço de energia, o que indica que lhe deverá ser dada atenção nas condições deste estudo.

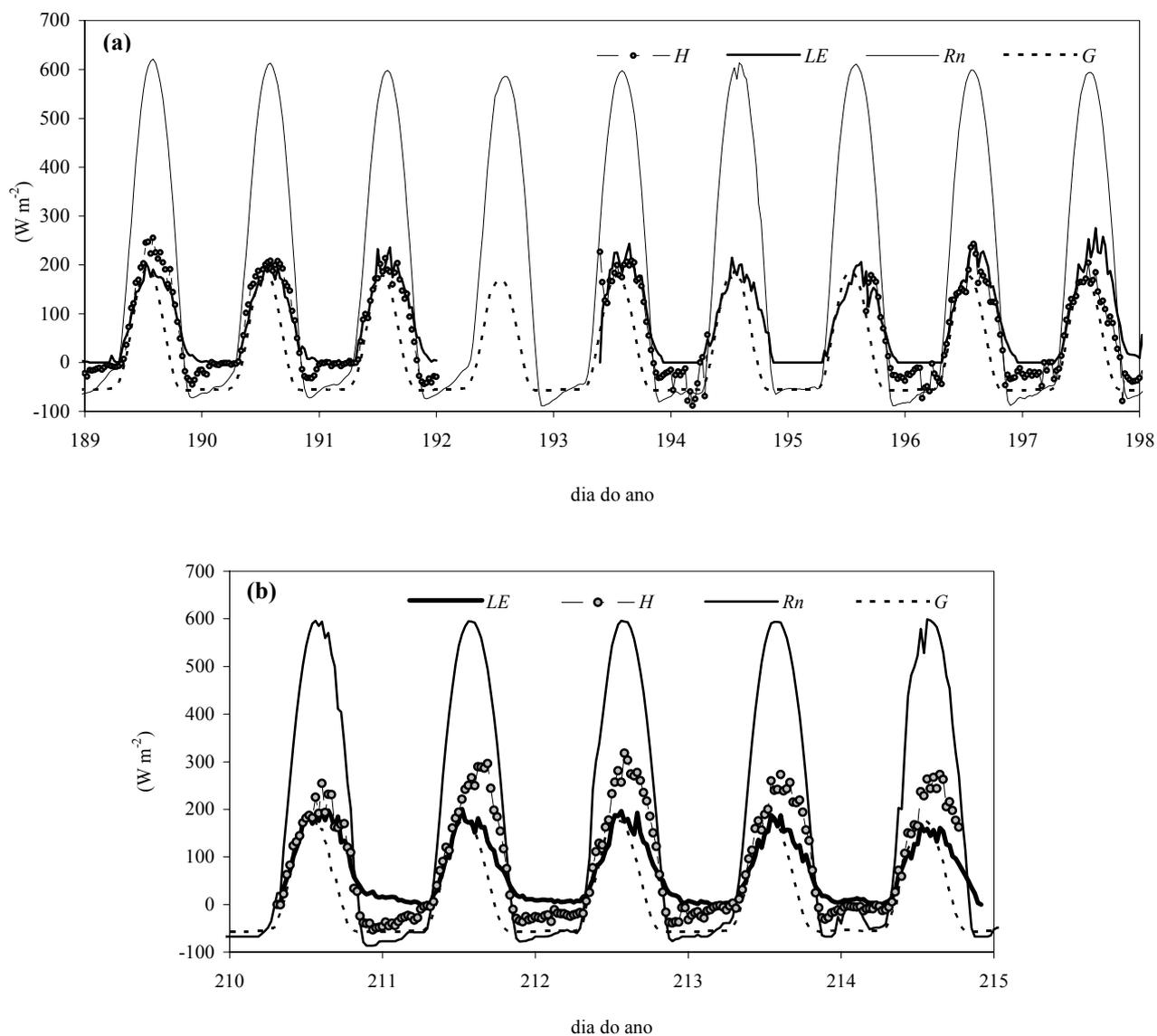


Figura IV.17 – Exemplo de séries temporais (médias de 30 minutos) dos componentes da equação do balanço de energia considerados;  $G$  estimado a partir do balanço da radiação; (a) 1998; (b) 1999.

#### IV.2.3.2. Análise de $G/R_n$

Analisa-se inicialmente como varia  $G/R_n$  ao longo do dia, apresentando-se na Figura IV.18 quatro situações distintas, de acordo com as condições de nebulosidade, tendo em vista apreciar a influência do calor armazenado no solo num determinado dia, nas medições realizadas em dias subsequentes. Se  $G$  for representado como uma fracção de  $R_n$  para períodos diurnos (8.00 – 17.00 h), verifica-se que:

- a) Em dias de céu limpo, em média,  $G/R_n = 0.23$  (Figura IV.18 (a)). Analisando a evolução diurna de  $G/R_n$ , é possível observar o aparecimento de dois picos, o primeiro às 9.30 h e o segundo às 12.00 h ( $G/R_n = 0.37$ , no primeiro caso e 0.38 no segundo). Às 13.30 h, a medição mais próxima do meio-dia solar (que se verifica por volta das 13.35 h),  $G/R_n$  apresenta um valor médio de 0.29.

- b) Para dias de céu limpo imediatamente a seguir a dias de céu nublado (Figura IV.18 (d)), os valores para a média, às 9.30 h, 12.00 h e meio-dia solar são muito semelhantes aos encontrados na primeira situação ( $G/R_n$  assume os valores 0.22, 0.36, 0.35 e 0.28, respectivamente), verificando-se uma variação similar ao longo do dia (a média é igual a 0.22).

- c) Em dias de céu nublado (Figura IV.18 (b)), verifica-se uma dispersão de valores, sendo no entanto a média diária é igual ou próxima dos valores encontrados nas duas situações anteriores: 0.22. Nestes dias, dada a maior dispersão de valores, não é possível identificar uma tendência clara de variação. De salientar, o aparecimento de valores pontuais de  $G/R_n$  mais elevados, o que poderá estar relacionado com uma maior quantidade de radiação difusa, que penetra melhor nas zonas cobertas.

- d) Finalmente, em dias de céu nublado subsequentes a dias de céu limpo (Figura IV.18 (c)) existe também alguma dispersão, como na situação anterior. A média da razão  $G/R_n$  situa-se, neste caso, em 0.17.

O cálculo de  $G$  para períodos de 24 horas (Figura IV.19), permite observar que, em dias de céu nublado subsequentes a dias de céu limpo,  $G$  total diário tende a ser mais reduzido do que em dias de céu nublado subsequentes a dias de céu nublado. O valor mais reduzido observado para  $G$ , nos dias de céu nublado subsequentes a dias de céu limpo poderá explicar-se pela ocorrência de um fluxo negativo de  $G$  mais importante nestes dias, resultado da quantidade de calor acumulada no solo no dia anterior ser superior ao que se verificaria se o dia estivesse nublado.

Em quase todas as situações se pode observar o aparecimento de um pico, por volta das 9.30 h. De acordo com Conceição (2001), no que diz respeito à evolução da área de solo iluminada ao longo do dia, não se verifica àquela hora nenhuma diminuição brusca no ensombramento, à escala da parcela. No entanto, para a zona da linha, e àquela hora, a percentagem da área que recebe radiação directa, atinge 100%, o que não volta a verificar-se durante o resto do dia (2º máximo, de 70%, à tarde). Este pico estará, desta forma, relacionado com a conjugação da arquitectura das árvores e a orientação das linhas (13º NNE), relativamente ao movimento do sol, como se pôde verificar com um modelo geométrico.

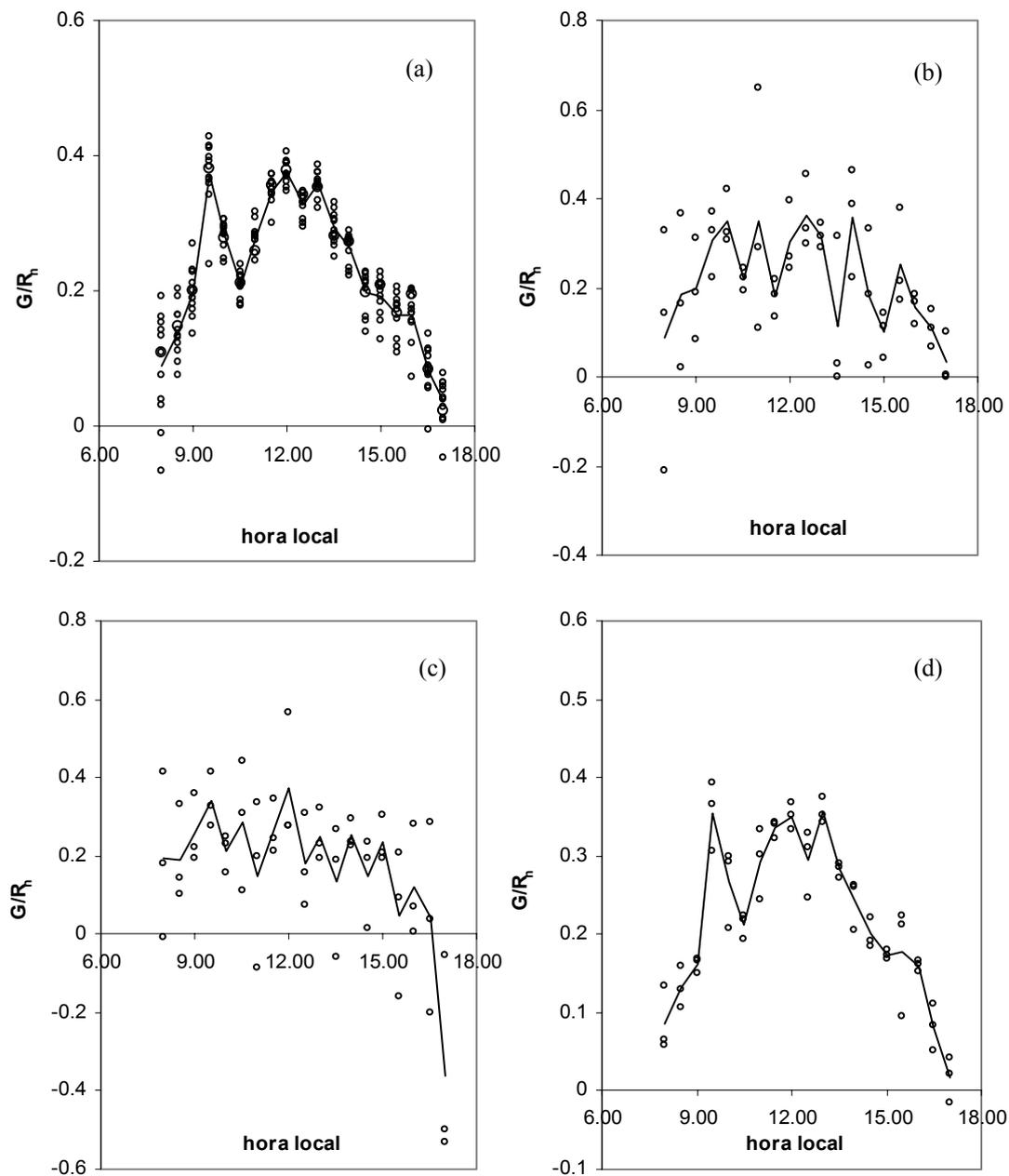


Figura IV.18 – Razão  $G/R_n$  em dias de (a) céu limpo (dias do ano 186, 190-200), (b) céu nublado (182-184, 188), (c) céu nublado subsequentes a dias de céu limpo (187 e 201) e (d) céu limpo subsequentes a dias de céu nublado (185, 189 e 202); a linha representa a média para cada intervalo de 30 minutos; valores diurnos (8.00-17.00 h),  $G$  medido pelo sistema de 8 placas, 1998.

Em conclusão, da análise anterior é possível constatar que existe uma variação importante de  $G/R_n$  ao longo do dia, apesar de a média diurna não apresentar grandes diferenças para as diversas situações estudadas. Não parece assim ser muito adequada a utilização de um valor médio para caracterizar esta razão e para estimar  $G$  ao longo do dia.

A nível dos valores totais diários observou-se a influência das condições de radiação dos dias anteriores, induzindo valores quer positivos, quer negativos em  $G$  (Figura IV.19). Da

análise da Figura IV.20, é possível verificar que, durante o Verão e para o período considerado, ocorre uma acumulação diária de calor no solo (em média de cerca de 5% da  $R_n$ ), exceptuando-se os dias com condições de céu nublado que se seguiram a dias de céu limpo. Salienta-se que o valor médio diurno de  $G/R_n$  obtido neste estudo, próximo de 0.2 (e recorda-se, a meio do dia, 0.3), vem confirmar a importância relativa de  $G$  no balanço de energia, tal como em outros cobertos esparsos (Brunel, 1989; Kustas *et al.*, 1993; vd. II.3).

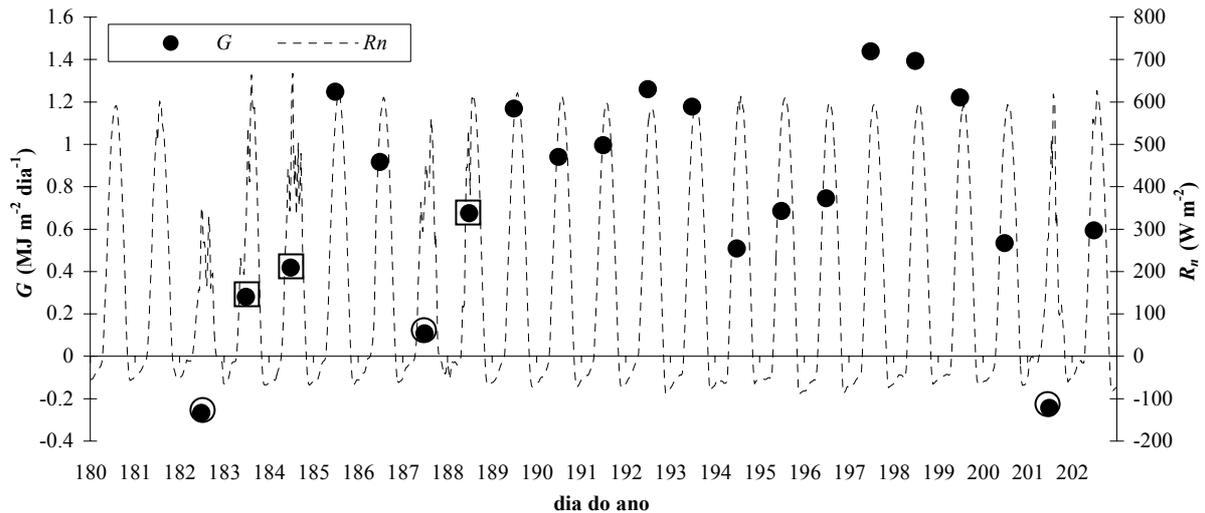


Figura IV.19 – Balanço da radiação e fluxo de calor para o solo diário: em dias de céu nublado, subsequentes a dias de céu limpo (182<sup>8</sup>, 187 e 201, ○) e subsequentes a dias de céu nublado (183, 184 e 188, □) e em dias de céu limpo, subsequentes a dias de céu limpo (186, 190-200) e subsequentes a dias de céu nublado (185, 189 e 200); (o objectivo de apresentar  $R_n$  é apenas relacionar com a ocorrência de dias de céu limpo e dias de céu nublado).

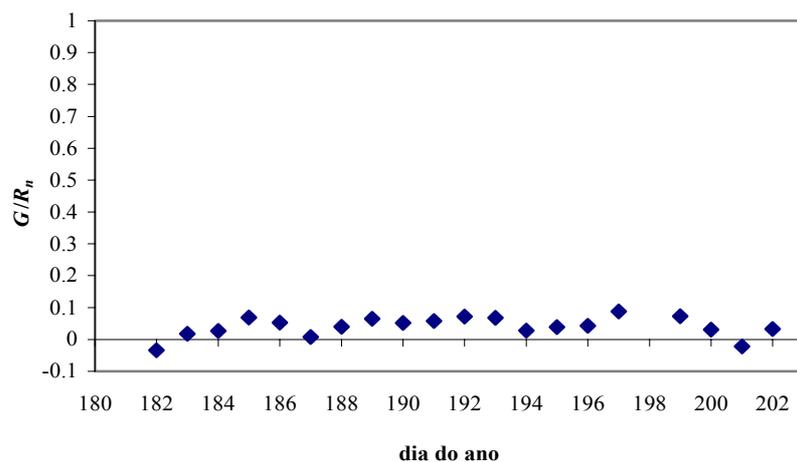


Figura IV.20 – Evolução da razão  $G/R_n$  calculada para 24 horas no período indicado.

<sup>8</sup> Considerou-se o dia 182 incluído neste grupo dado a nebulosidade ocorrida no dia anterior ter sido muito reduzida.

### IV.2.3.3. Análise de $H/R_n$ e $\lambda E/R_n$

Na Figura IV.21 é possível observar a variação diurna das razões  $H/R_n$  e  $\lambda E/R_n$ , durante os períodos de medição com o método das flutuações instantâneas.  $H/R_n$  variou entre 0.14 e 0.59 e, em média, situou-se próximo de 0.35, considerando o conjunto de todos os dias de medição. A média, considerada em idêntico período, da razão  $\lambda E/R_n$  foi semelhante (0.36), variando entre 0.19 e 0.51. Durante o mês de Julho, em ambos os anos de trabalho experimental,  $H/R_n$  foi próxima de 0.3 e  $\lambda E/R_n$  foi cerca de 0.4, em média. Estes valores ( $H/R_n \cong 0.3$  e  $\lambda E/R_n \cong 0.4$ ) são iguais aos encontrados para pessegueiro, na região de Águas de Moura, Setúbal, também durante o mês de Julho (Ferreira *et al.*, 1997a). A repartição de  $R_n$  nas outras componentes do balanço energético aqui consideradas ( $H$ ,  $\lambda E$  e  $G$ ) processou-se então, nestas duas situações experimentais em pomar de pessegueiro, de modo semelhante.

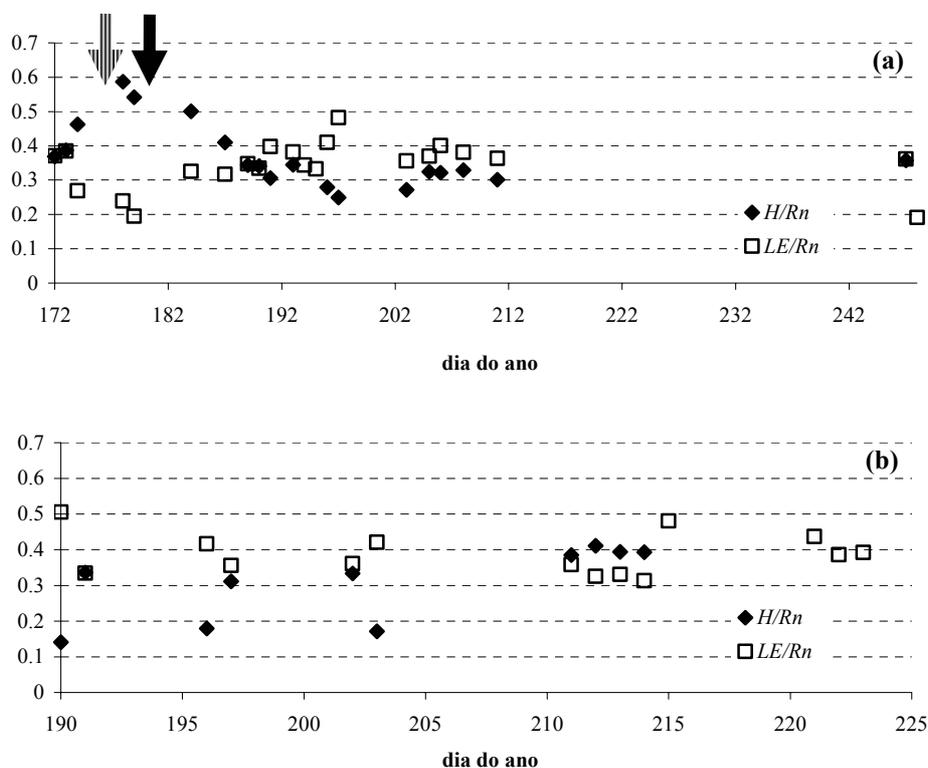


Figura IV.21 – Evolução das razões  $H/R_n$  e  $\lambda E/R_n$  diurnas ao longo dos períodos de medição com o método das flutuações instantâneas; (a) 1998, as setas indicam a falha do sistema de rega nos dias 177 (seta tracejada) a 179 e o respectivo recomeço (seta a cheio); (b) 1999.

Para pomar de limoeiro, Daamen *et al.* (1999) descrevem resultados para o balanço de energia conducentes a uma razão  $\lambda E/R_n$  média também igual a 0.4. Como referido em II.3, a razão  $\lambda E/R_n$  tem sido utilizada por diversos autores (p. ex., Ferreira-Gama, 1987; Itier *et al.*, 1992; De Lorenzi e Rana, 2000) como um indicador do estado hídrico da cultura. Para o presente estudo (Figura IV.21 (a)), é visível o efeito das restrições hídricas e da consequente diminuição de  $\lambda E/R_n$ , no período entre o dia do ano 177 a 179 (1998), em que a rega foi

interrompida, indicando que uma menor fracção da energia disponível foi canalizada para a evapotranspiração.

#### IV.2.4. Análise da variação do erro de fecho da equação do balanço de energia

Na maior parte das situações descritas na literatura, a soma dos fluxos de calor sensível e latente medidos pelo método das flutuações instantâneas é inferior à diferença entre a radiação líquida e o fluxo de calor sensível para o solo (Twine *et al.*, 1997). Esta foi também a situação encontrada. O fecho da equação do balanço de energia foi verificado para dados à escala semi-horária e diária, comparando os fluxos de calor sensível e latente, medidos pelo método das flutuações instantâneas, com a energia disponível na superfície ( $R_n - G$ ). A energia disponível excedeu sempre os fluxos de calor medidos ( $H + \lambda E$ ). Proceder-se-á à análise do erro de fecho em relação com variáveis pertinentes: a direcção do vento (IV.2.4.1), por se pretender avaliar a influência de condições de *fetch* limitantes e  $G$  (IV.2.4.2) pela incerteza associada à sua medição, como referido em IV.1.2.

##### IV.2.4.1. Em relação com a direcção do vento

É interessante observar a variação do fecho da equação do balanço de energia, consoante a direcção do vento dominante, considerando as oito direcções principais da rosa-dos-ventos (ver Figura IV.22 (a) e (b)). O número de observações ( $n$ ) registadas para cada uma das direcções do vento, no período considerado para o cálculo, encontra-se inscrito na Figura IV.22 (a) e (b).

Em 1998 (Figura IV.22 (a)), foram utilizados dados semi-horários dos dias do ano 184-187, 189-191, 193, 196, 197 e 199, sempre que  $R_n > 60 \text{ W m}^{-2}$  (períodos diurnos, rejeitando os dados obtidos perto do nascer e do pôr-do-sol, quando se regista uma certa dispersão em  $\lambda E$  e  $H$  (Thompson *et al.*, 1999; Lamaud *et al.*, 2001)). Neste conjunto de dias não se observaram períodos em que o vento dominante soprasse de NE ou E. Para este período, as direcções de *fetch* mais favorável coincidem com as direcções em que se verifica um melhor fecho da equação do balanço de energia (N, SO, O e NO). Este varia aproximadamente entre 0.88 e 0.96, descendo ligeiramente para as direcções S e SE (0.83 e 0.87). A frequência associada a cada uma das direcções do vento variou entre 0, para as direcções NE e E, e 0.38 para a direcção NO. As direcções a que estão associadas menores frequências são as direcções NE, E, SE e S, que correspondem às direcções de menor *fetch* (ver IV.1.1 e Figura III.22). Em 1999 (considerando também  $R_n > 60 \text{ W m}^{-2}$ , vd. Figura IV.22 (b)), o erro de fecho associado às direcções mais favoráveis variou entre 1 e 28%, verificando-se existirem, em geral, erros maiores (que poderão, como já assinalado, ser atribuídos a uma

menor precisão na estimativa de  $G$ ). De uma maneira geral, destaque-se que o menor erro de fecho, em média, corresponde às direcções de maior *fetch* (N e NO).

A análise da variação do erro de fecho da equação do balanço de energia em função do *fetch* associado a cada direcção do vento foi também analisada por Thompson *et al.* (1999), num dispositivo experimental em que utilizaram metodologias idênticas às do presente estudo. Em média, estes autores encontraram um fecho de 91% para dias em que o *fetch* se mostrou favorável e de 78% para dias de *fetch* limitado, tendo também constatado que é possível relacionar a dimensão do erro de fecho do balanço de energia com a direcção do vento e *fetch* associado.

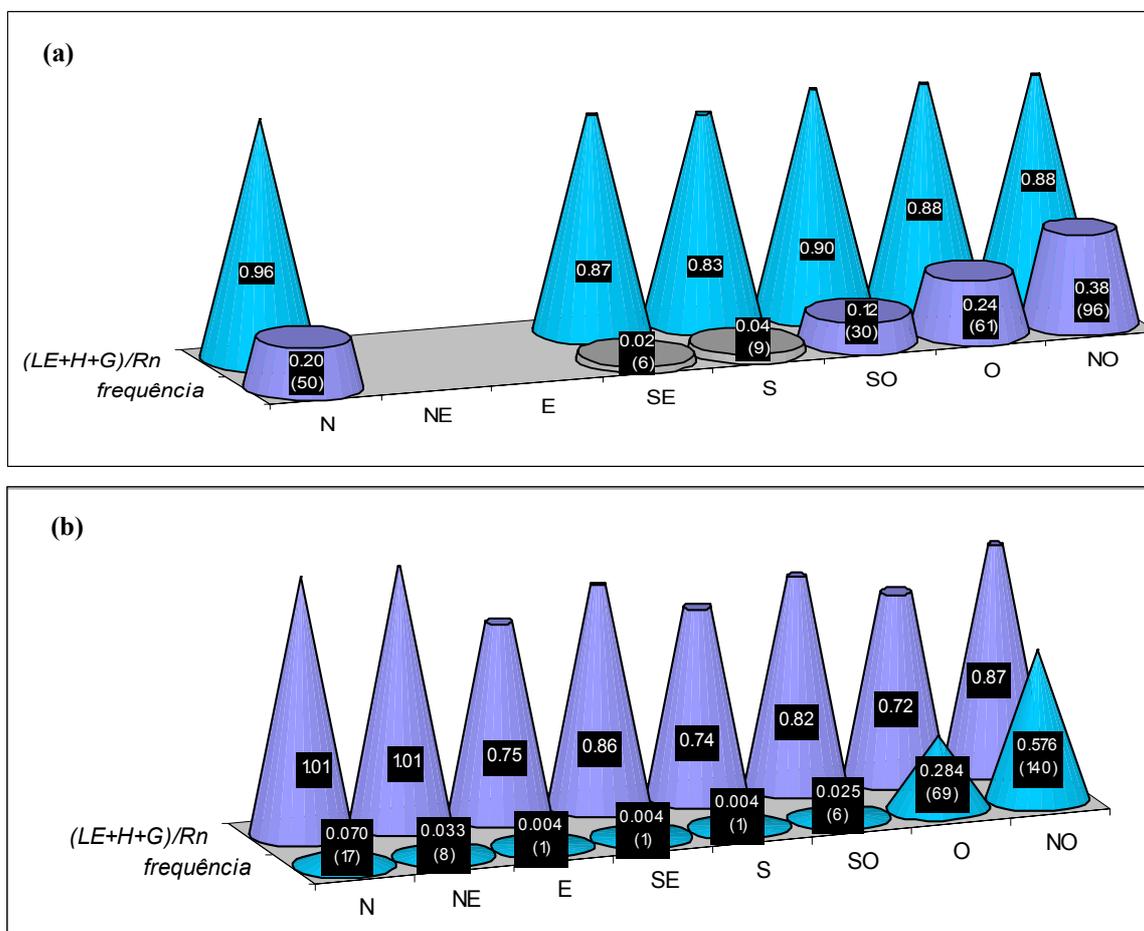


Figura IV.22 – Fecho da equação do balanço de energia segundo a direcção do vento dominante (trancos de cone posteriores), erro zero significa  $(LE+H+G)/R_n = 1$ ; (a) 1998 (dias do ano 184-187, 189-191, 193, 196, 197 e 199); (b) 1999 (dias do ano 190, 191, 196, 197, 202, 203, e 210-214); os valores entre parêntesis referem o número de observações em cada direcção (n); a percentagem correspondente está graficamente representada nos trancos de cone anteriores;  $R_n > 60 \text{ W m}^{-2}$ .

#### IV.2.4.2. Em relação com $G$

Em 1998, quando se utilizou o sistema de duas placas de fluxo de calor, o conjunto dos fluxos de calor sensível e latente representavam cerca de 70% da energia disponível

(Figura IV.23 (a)), enquanto que, com o sistema de oito placas, para o mesmo período (dias do ano 196 e 197, utilizando uma escala semi-horária), este valor ascendia a 90% (Figura IV.23 (b)). Esta diferença nos resultados sugere (como referido em IV.1.2) que um menor erro de fecho poderá estar associado a melhores estimativas de  $G$ . O erro de fecho encontrado em 1999, com um dispositivo de duas placas, foi de cerca de 18% (Figura IV.24), quando calculado para um período de dez dias, à escala semi-horária (dias do ano 191, 196, 197, 202, 203, 210-214). Este resultado poderia provavelmente ter sido melhorado com uma estimativa de  $G$  mais precisa, recorrendo a um maior número de placas de fluxo de calor, o que não foi possível nesse ano. A Tabela IV.4 apresenta de forma resumida o erro de fecho aproximado, determinado para os diferentes dispositivos experimentais.

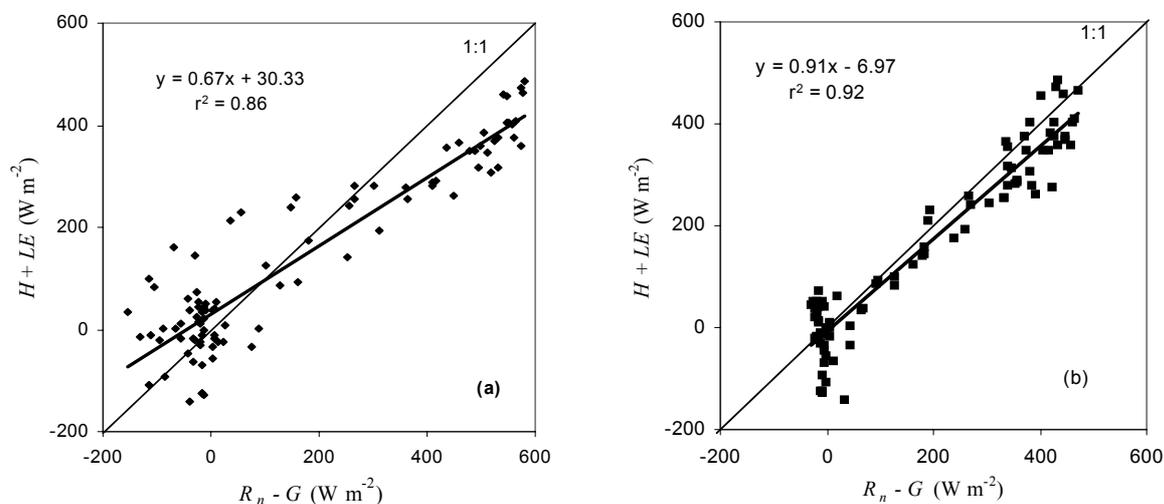


Figura IV.23 – Balanço de energia da superfície, calculado com medições semi-horárias; (a) dias do ano 196 e 197, para o dispositivo de 2 placas em 1998; (b) dias do ano 196 e 197, para o dispositivo de 8 placas, 1998.

A orientação das linhas de árvores, próxima da direcção norte-sul ( $13^\circ$  NNE), originou o sombreamento de grande parte do lado oeste da linha durante a manhã, enquanto o lado este se encontrava exposto, ocorrendo a situação inversa durante o período da tarde. As linhas apresentavam-se também bastante espaçadas, tendo o coberto um baixo  $LAI$  e um baixo grau de cobertura. Dadas estas características de estrutura e orientação, era possível encontrar durante o dia diversos padrões de sombreamento e exposição, que efectivamente não foi possível representar de modo adequado com a utilização de apenas duas placas de fluxo de calor, como referido em IV.2.2. Observando os dados recolhidos com o sistema de duas placas (Figura IV.23 (a) e IV.24), pode ver-se que a sobrestimativa de  $(R_n - G)$  terá sido devida a uma subestimativa na medição de  $G$ , pelo facto de as placas se encontrarem à sombra durante a tarde, recebendo menos energia (Figura IV.11), o que pareceu não ser compensado à escala diária, pela maior energia recebida durante a manhã (relativamente à média espacial na parcela). Alargando o período de análise, para o dispositivo de 8 placas, (Figura IV.25), verifica-se que o erro de fecho se mantém sensivelmente igual ao encontrado para um período mais curto (Figura IV.23 (b)).

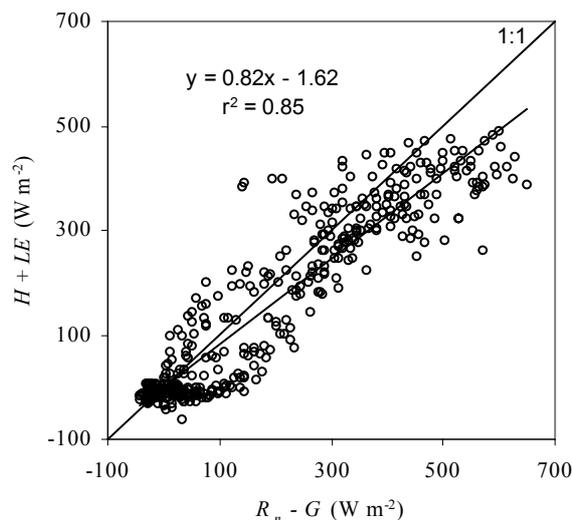


Figura IV.24 – Balanço de energia da superfície, calculado com medições semi-horárias; dias do ano 191, 196, 197, 202, 203, 210 – 214, para o dispositivo de 2 placas, 1999.

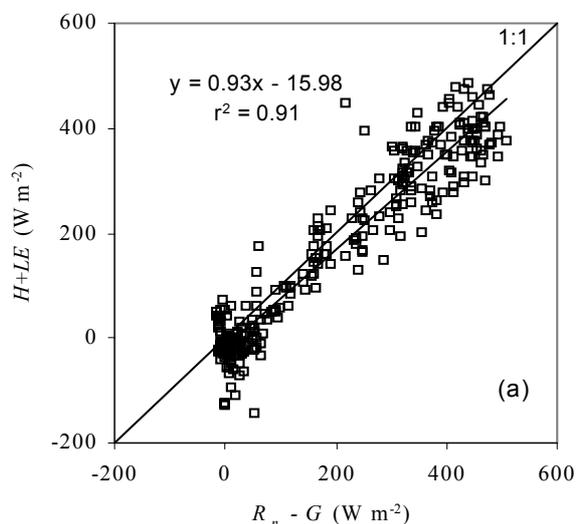


Figura IV.25 – Balanço de energia da superfície, calculado com medições semi-horárias; dias do ano 184, 187, 189,190, 191, 196 e 197, para o dispositivo de 8 placas, em 1998.

Tabela IV.4 – Erro de fecho aproximado da equação do balanço de energia da superfície, calculado com medições semi-horárias; NP: número de placas de fluxo de calor do dispositivo experimental.

Ano	NP	Dias de medições considerados para o balanço de energia	Erro de fecho
1998	2	196, 197	30%
1998	8	196, 197	10%
1999	2	191, 196, 197, 202, 203, 210, 211, 212, 213, 214	20%
1998	8	184, 187, 189, 190, 191, 196, 197	10%

Dadas as dificuldades associadas à determinação de  $G$ , em cobertos descontínuos, anteriormente referidas, os pontos de medição de  $G$  no terreno devem ser distribuídos de forma a fornecer uma medição representativa. As dificuldades inerentes à obtenção de

medições representativas de  $G$  são abordadas, para pomar de macieira, por Braun *et al.* (2000), que encontraram uma sobrestimativa acentuada de  $G$  para valores elevados. Snyder *et al.* (2000) compararam dispositivos experimentais com diferente número de placas de medição de  $G$ , em vinha, tendo concluído que a utilização de um maior número de sensores permitiu a obtenção de resultados mais precisos, tal como no presente estudo.

A realização de uma extrapolação de  $G$  a partir dos dados obtidos com os sistemas de duas placas, apoiada na medição mais exacta e detalhada fornecida com o sistema de oito placas, mostrou-se difícil e pouco precisa. Tal dificuldade prende-se sobretudo com a variabilidade de condições ambientais que se verificam de dia para dia, impedindo uma generalização suficientemente rigorosa. Desta forma, durante os períodos de utilização dos sistemas constituídos apenas por duas placas, optou-se pela estimativa de  $G$  a partir de  $R_n$ , através da relação estabelecida entre medições de  $G$  com o sistema de oito placas e  $R_n$  (equação IV.1).

Na Figura IV.26, pode observar-se o fecho da equação do balanço de energia, utilizando a estimativa de  $G$  obtida através de  $R_n$ , para dias de céu limpo, em 1998 (dias do ano 172-174, 178, 179, 205, 206, 208 e 211, períodos antes e após medições de  $G$ ). O erro de fecho é de cerca de 1%, o que permite utilizar as medições de calor sensível e latente, realizadas nos mesmos dias, com elevada confiança. Para o dia do ano 247 não é possível utilizar esta estimativa, dadas as diferentes condições ambientais (o céu esteve nublado). No dia 248 também não foi utilizada, por se tratar de um dia do período final do Verão, já um pouco fora do âmbito de obtenção da equação IV.1. Nos dias em que se efectuaram medições de  $G$  com o sistema de 8 placas (184, 187, 189, 190, 191, 196 e 197), o erro de fecho aproximou-se de 10%, como referido anteriormente (Figuras IV.25 e Tabela IV.4).

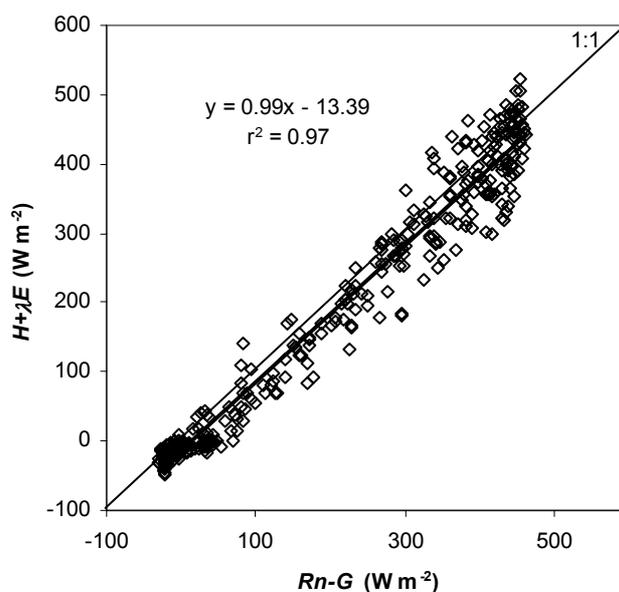


Figura IV.26 – Fecho da equação do balanço de energia, utilizando  $G$  estimado a partir de  $R_n$ , para dias de céu limpo (dias do ano 172-174, 178, 179, 205, 206, 208 e 211 – 1998).

Foi possível, desta forma, encontrar um erro de fecho da equação do balanço de energia aproximadamente entre 1 e 10%, para o ano de 1998. Considera-se que nos dias em

que não foi possível efectuar o mesmo tipo de análise, por não se terem feito medições de calor sensível (dias do ano 194, 195, 203), o erro de fecho se situaria neste intervalo, uma vez que todas as condições experimentais se mantêm.

Em 1999, utilizando também a equação IV.1, foi possível estimar um erro de fecho de cerca de 8% (ver Figura IV.27), para a maioria dos dias de medição com o método das flutuações instantâneas (dias do ano 190, 191, 196, 197, 202, 203, 210-214). Exceptuam-se os dias do ano 221 a 223, em que não se realizaram medições do fluxo de calor sensível, não sendo possível efectuar o balanço de energia. No entanto, dado que as condições de realização das medições se mantêm, considera-se que, provavelmente, o erro de fecho seria da mesma ordem de grandeza, sendo também considerados válidos, para o objectivo em questão, os dados obtidos nestes dias.

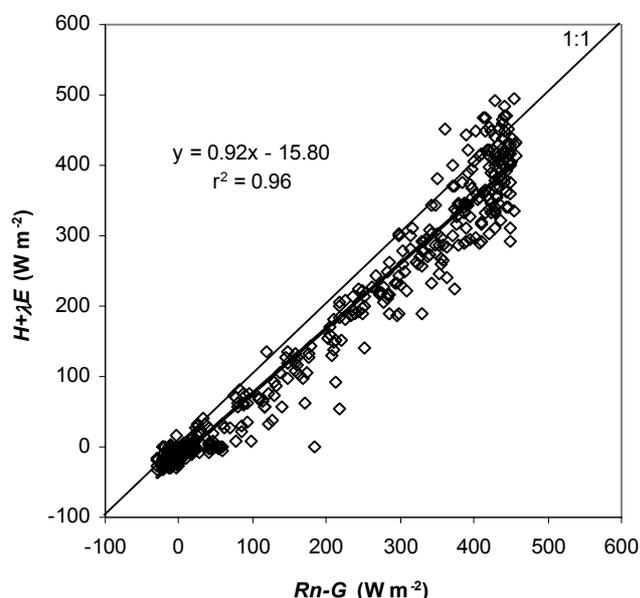


Figura IV.27 – Fecho da equação do balanço de energia, utilizando  $G$  estimado a partir de  $R_n$ , para dias de céu limpo em que se realizaram medições de fluxo de calor latente (dias do ano 190, 191, 196, 197, 202, 203, 210-214); 1999.

### IV.3. Evaporação do solo

Na Figura IV.28 apresentam-se os resultados das medições da evaporação do solo. A  $E_s$  diária para a parcela, no intervalo considerado em 1998, foi de cerca de 0.5 mm, variando entre 0.47 e 0.66 mm. Em 1999, foram medidos valores entre 0.23 e 0.56 mm, não considerando o dia 216 (4 de Agosto) em que a  $E_s$  atingiu 1.14 mm. No dia anterior a este, ocorreu precipitação, dando origem a esta elevada  $E_s$ . Para o conjunto dos restantes dias, a  $E_s$  média diária foi de 0.33 mm.

A evaporação do solo diária medida representou em média 10% da  $ET$  (medida pelo método das flutuações instantâneas) para períodos em que não ocorreu precipitação, em 1999.

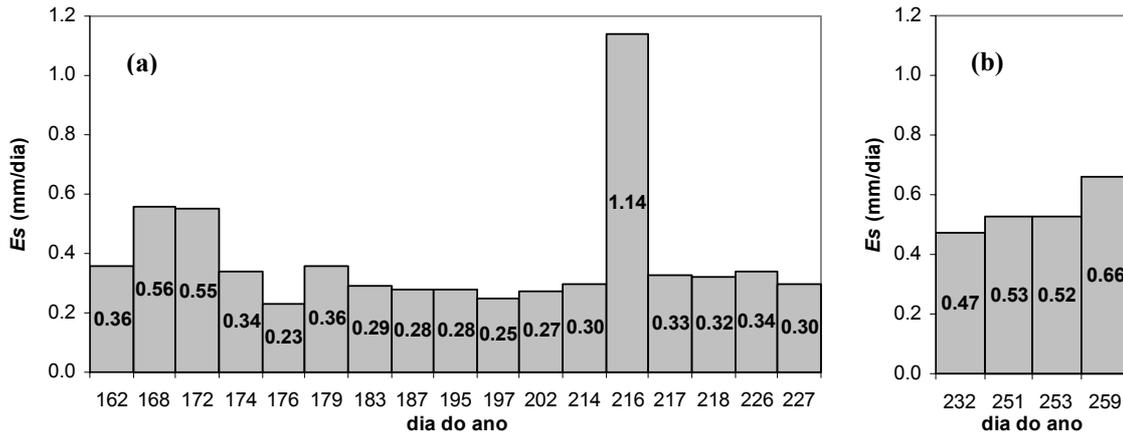


Figura IV.28 – Evaporação do solo média diária para a parcela em estudo; (a) 1999; (b) 1998.

A evaporação do solo ao longo do dia não seguiu a mesma tendência de variação da evapotranspiração de referência. A título de exemplo, são apresentados na Figura IV.29 os dados referentes ao dia do ano 251 de 1999 (9 de Setembro). As linhas de árvores apresentavam um afastamento de 5 m, originando áreas expostas à radiação de dimensão apreciável. Contudo, a meio do dia, a zona molhada encontrava-se sombreada, embora durante a tarde e manhã recebesse radiação directa, verificando-se uma compensação dos dois efeitos e dando origem a uma  $E_s$  pouco variável ao longo do dia.

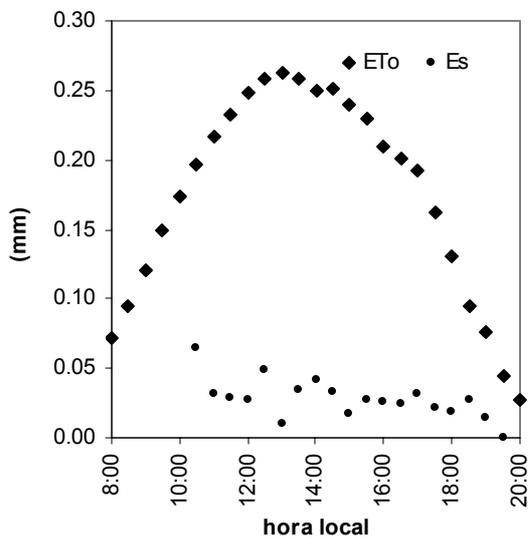


Figura IV.29 – Exemplo dos resultados da medição de  $E_s$  ao longo do dia, em intervalos de meia-hora, para o dia 251 (9 de Setembro), em 1998.

Foi estudada a adaptação às condições do pomar de alguns modelos da evaporação do solo, referidos em II.5.3. Para um deles, o modelo de Ritchie (1972), que considera duas fases relevantes no processo de dessecação do solo, a  $E_s$  acumulada é estimada durante a segunda fase por  $\sum E_s = \alpha t^{1/2}$ , sendo  $\alpha$  um parâmetro dependente das características hidráulicas do solo. No presente estudo, os valores encontrados para o parâmetro  $\alpha$  apresentaram uma maior variabilidade face ao que seria de esperar e foram em média inferiores aos encontrados por

Ritchie; verificou-se também alguma dificuldade em ajustar uma curva semelhante às descritas por aquele autor, para descrever o parâmetro  $\alpha$  (Conceição, 2001). O modelo desenvolvido por Boesten e Stroosnijder (1986) foi também analisado, tendo-se estudado a relação entre a evaporação real e a evaporação potencial (equações II.17 e II.18). No entanto, a relação entre  $\sum E_s$  e  $(\sum E_{s_{potencial}})^{1/2}$  não é linear, não sendo possível encontrar um coeficiente  $\beta_e$  com o mesmo significado.

Para estimar  $E_s$ , foi finalmente utilizado um modelo empírico desenvolvido por Ferreira *et al.* (1997b) para condições semelhantes às da Atalaia (Montijo), (equação II.19). Este modelo foi obtido para uma situação de rega por aspersão não diária e o coeficiente 0.12 representa a área relativa de solo molhado a seguir à rega. Nas nossas condições, a área molhada era mais reduzida, dada a utilização do sistema de rega gota-a-gota e, conseqüentemente, a equação foi adaptada tendo-se utilizado um coeficiente igual a 0.064, o que equivale a considerar  $E_s = 0.05 ET_o$ , dado que N é igual a 1 (rega diária). Os resultados encontrados são os apresentados na Figura IV.30. Para o período compreendido entre o dia do ano 174 (23 de Junho de 1999) e o dia do ano 202 (21 de Julho 1999), período que poderemos considerar representativo para as medições realizadas neste estudo, verifica-se uma subestimativa de aproximadamente 20%, o que representa cerca de 1% da  $ET_o$ . Para os primeiros dias de medições, assim como a partir do dia do ano 214, o modelo não se adequa, por haver ainda influência da precipitação de Primavera (vd. Figura IV.31) ou por ter ocorrido alguma precipitação, respectivamente. Este processo de estimativa baseia-se na  $ET_o$ ; ora, constata-se que, para o sistema em estudo, a  $E_s$  não segue a variação diária de  $ET_o$  (Conceição, 2001), não se verificando uma correlação aceitável entre  $E_s$  e  $ET_o$  (vd. Figura IV.32). De referir que, para  $ET_o$  superior a 4 mm/dia, a dispersão é muito elevada, o que suscita alguma incerteza na aplicação de uma relação deste tipo.

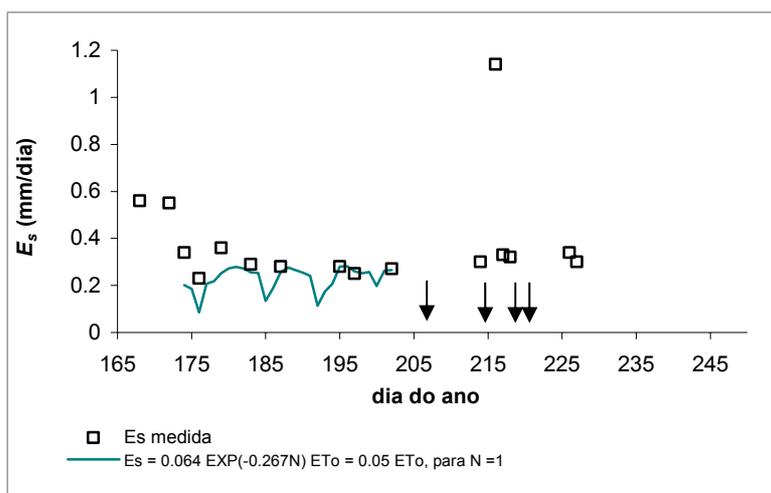


Figura IV.30 – Comparação entre a estimativa de  $E_s$  pelo modelo  $E_s = 0.064 e^{-0.267N} ET_o$  e  $E_s$  medida; as setas indicam a ocorrência de precipitação (1999).

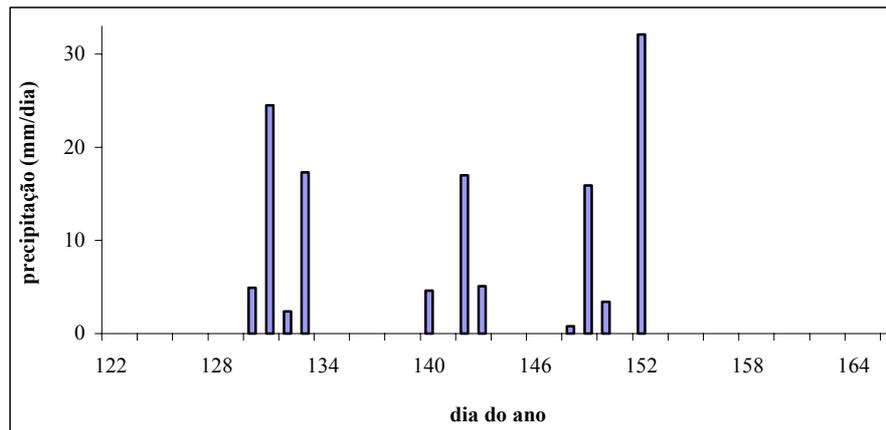


Figura IV.31 – Precipitação diária numa estação meteorológica próxima (Vendas Novas - Rede Meteorológica INAG) no período que antecede as experiências (01.05.98, dia do ano 121, a 15.06.98, dia do ano 166) (fonte: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos – <http://snirh.inag.pt>).

A relação entre  $E_s$  e  $ET_o$  é diferente quando se observam em conjunto todas as medições realizadas (vd. Figura IV.32 (a)), ou apenas um período considerado mais representativo (em pleno Verão e excluindo dias em que ocorreu precipitação, vd. Figura IV.32 (b)).  $E_s$  e  $ET_o$  não se correlacionam de forma aceitável talvez porque os máximos de  $ET_o$  (em dias de céu limpo) ocorrem a meio do dia, momento em que a superfície do solo molhado na linha de árvores se encontra quase completamente sombreada (Conceição, 2001), como dito anteriormente.

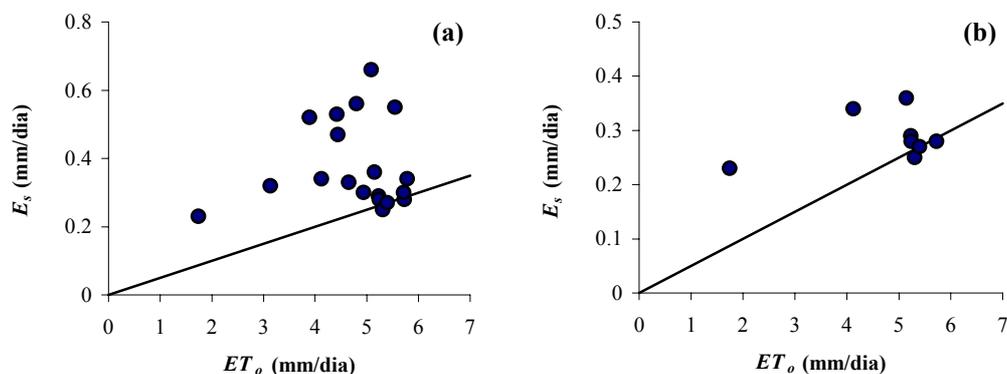


Figura IV.32 – Evolução diária da  $E_s$  com a  $ET_o$ ; (a) para todos os dias em que se realizou a medição da  $E_s$  em 1998 e 1999, (b) apenas para o período entre o dia do ano 174 e o dia do ano 202, em 1999; a linha representa a equação  $E_s = 0.05 ET_o$ .

Em resumo, poderá salientar-se que a elevada frequência da rega e a diferente dinâmica da evaporação introduzem no sistema em análise algumas diferenças relevantes, quando comparado com os que serviram de base ao desenvolvimento dos modelos de evaporação do solo descritos em II.5.3. Por um lado, os lisímetros localizados na linha

encontravam-se sombreados a meio do dia, mas eram atingidos por radiação directa de manhã cedo e ao fim da tarde, dada a orientação das linhas (13° NNE). Por outro lado, as árvores apresentavam um sistema de condução que forçava alguns ramos a aproximarem-se mais da linha do que numa situação livre, provocando uma maior concentração de folhas e um acentuado sombreamento do local durante uma parte do dia, contribuindo para o afastamento entre a dinâmica diária de  $E_s$  e a da  $ET_o$ . Um efeito de micro-advecção devido ao apreciável espaçamento entre linhas poderá também ter influenciado o padrão de evolução de  $E_s$  ao longo do dia. De referir ainda que, no pomar em estudo, sendo a rega localizada, é limitada a superfície de solo humedecida e, conseqüentemente, a quantidade de água evaporada a partir do solo, em relação a outros sistemas de rega que humedecem uma área de maior dimensão ou mesmo toda a superfície do solo.

Dado pretender-se melhorar o processo de estimativa da  $E_s$ , para estender a estimativa a toda a época de medições, foi desenvolvido um modelo empírico para o efeito, baseado nas medições realizadas em 1999 e na estimativa da energia disponível à superfície do solo, em cada área de influência associada aos lisímetros. Esta estimativa foi desenvolvida com base em curvas de luminosidade obtidas localmente o que permitiria, em princípio, resolver parcialmente os inconvenientes dos modelos referidos anteriormente. As curvas de luminosidade indicam a representatividade das áreas que recebem radiação solar directa ao longo do dia, relativamente à área total de cada área de influência. Encontram-se descritas pormenorizadamente em Conceição (2001). A estimativa da energia disponível à superfície do solo permite realizar um ajustamento da  $ET_o$ , tendo em conta o efeito do sombreamento, obtendo-se  $ET_o_{aj}$ .

O modelo desenvolvido inicialmente (modelo A) encontra-se esquematizado na Figura IV.33. Em dias subsequentes à ocorrência de precipitação, as estimativas de  $E_s$  com este modelo mostraram-se bastante afastadas da  $E_s$  medida. Nestas condições, foi assim utilizado um modelo específico para estes dias (modelo B, Figura IV.34), que permite obter estimativas até ao 3º dia subsequente à ocorrência de precipitação. Ambos são descritos nos parágrafos seguintes.

A estimativa de  $E_s$  realizou-se separadamente para as áreas de influência associadas à localização dos lisímetros (vd. Figura III.23). Os lisímetros 1, 2, 4 e 5 estão associados à área de influência que se designou por 3 (ver III.6), o lisímetro 3 está associado à área de influência tipo 2 e os lisímetros 6, 7, 8 e 9 estão associados à área de influência tipo 1. Designou-se por  $E_{si}$  a evaporação do solo em condições idênticas ao solo do lisímetro  $i$ , inserido na área de influência correspondente.

$E_{si}$  é estimada para os lisímetros 1 a 5, a partir da  $ET_o$  ajustada ( $ET_o_{aj}$ ). O ajustamento é efectuado mediante a estimativa da quantidade de energia disponível à superfície dos lisímetros, de acordo com o procedimento descrito em Conceição (2001). Para os lisímetros 6, 7, 8 e 9, a medição da evaporação permitiu concluir que os resultados dos lisímetros 6 e 7 podem ser considerados repetições (Conceição, 2001), ocorrendo o mesmo em relação a 8 e 9. São portanto considerados em conjunto.

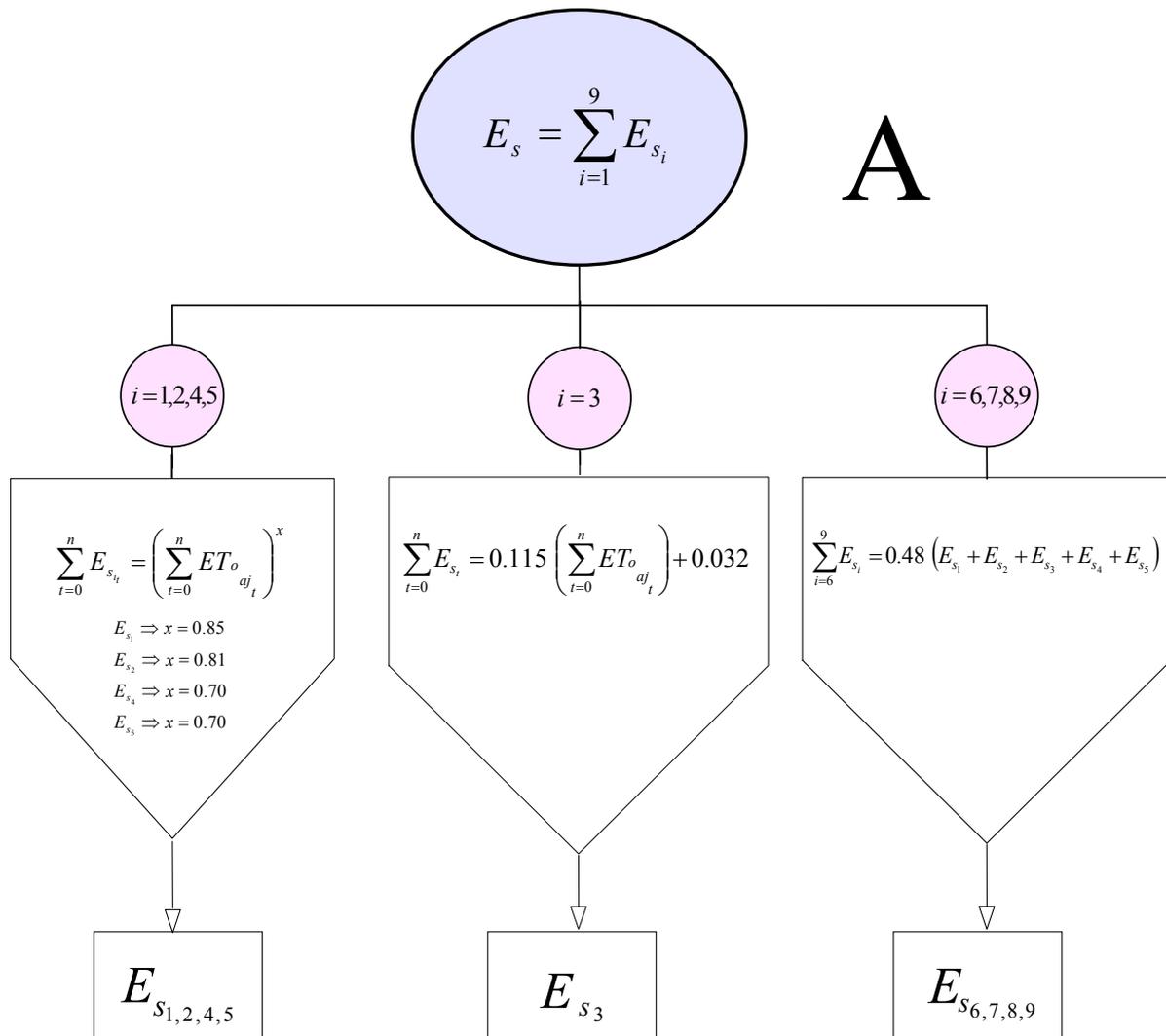


Figura IV.33 – Modelo de estimativa da evaporação do solo, na ausência de precipitação;  $E_{s_i}$  é a evaporação do lisímetro  $i$ ,  $t$  é o tempo decorrido após o início do ciclo de dessecação [dias]. O resultado para cada grupo de lisímetros (1, 2, 4, 5/3/6, 7, 8, 9) é calculado para a área de influência associada [ $\text{kg m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ].

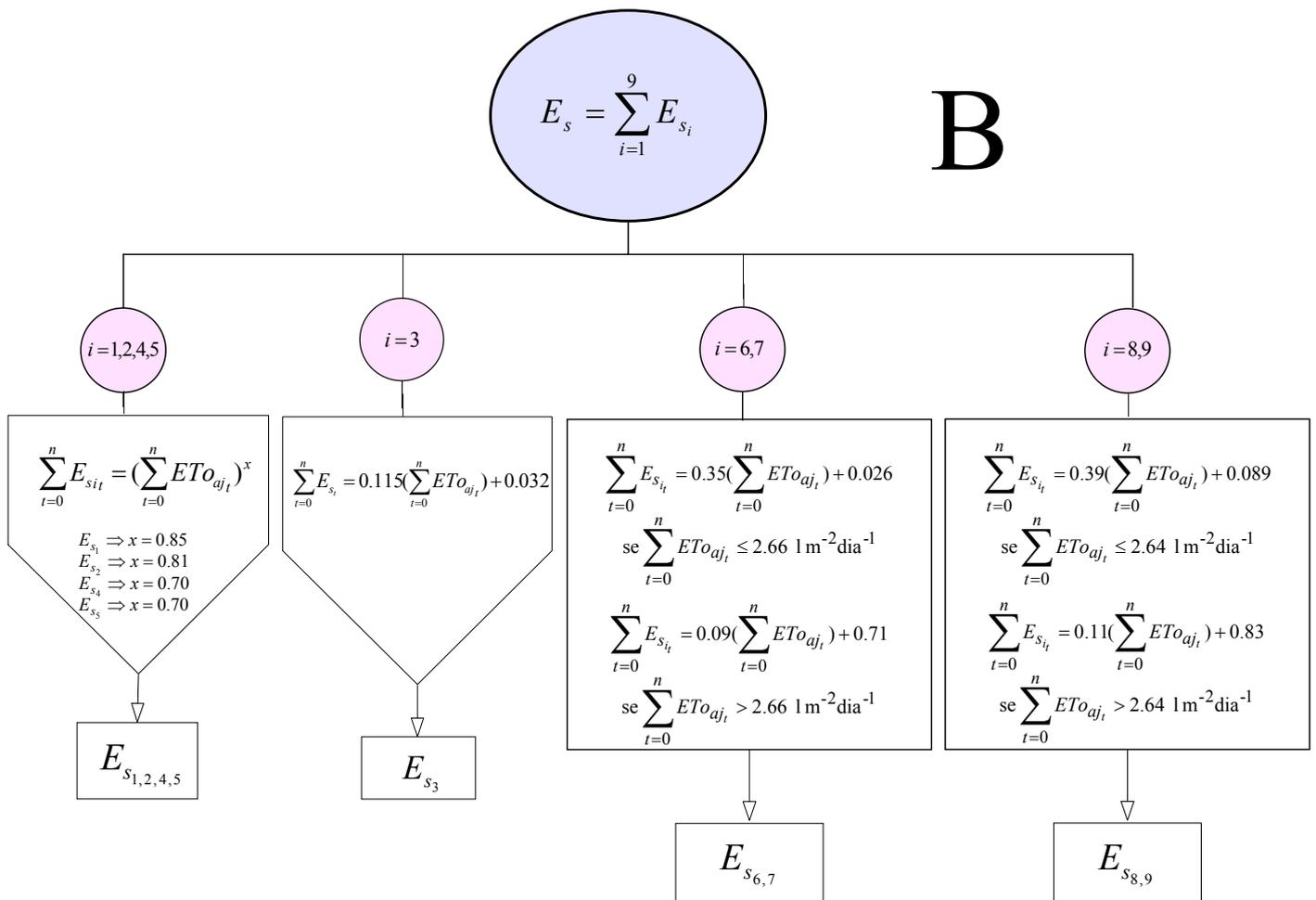


Figura IV.34 – Modelo de estimativa da evaporação do solo a seguir à ocorrência de precipitação;  $E_{s_i}$  é a evaporação ocorrida na área de influência correspondente ao lisímetro  $i$ , por unidade de superfície e por dia,  $t$  é o tempo decorrido após o início do ciclo de dessecação [dias]. O resultado para cada grupo de lisímetros (1, 2, 4, 5/3/6, 7, 8, 9) é calculado para a área de influência associada [ $\text{kg m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ].

Optou-se por estimar  $E_{si}$  com  $i = 1, 2, 4$  e  $5$  e  $E_{si}$  com  $i = 3$  da mesma forma (em A e em B), quer ocorra ou não precipitação, dado que, sendo a área associada a estas condições relativamente reduzida (8%), o erro cometido não teria muito significado ao nível da parcela, além de  $E_s$  apresentar um valor reduzido em relação à  $ET$  (cerca de 10%, na ausência de precipitação). Para a  $E_s$  proveniente da zona da entrelinha (área de influência associada aos lisímetros 6, 7, 8 e 9) é, no entanto, necessário considerar um processo de estimativa diferente, dado estas zonas representarem 92% do total da área da parcela e porque, numa situação em que toda a superfície do solo está molhada, ao contrário do que acontece quando a água provém apenas da rega, a evaporação ocorre sobretudo a partir desta área. A diferença entre modelos (A e B) reside portanto no processo de estimativa da  $E_s$  proveniente da área de influência tipo 1. Não se efectuaram estimativas para os dias em que ocorreu precipitação (dias do ano 208, 215, 219 e 220).

Os modelos propostos para a estimativa da  $E_s$ , com o objectivo de completar a série de dados para  $E_s$ , fornecem valores com um erro mais elevado no início e no fim da época utilizada para o trabalho experimental (Figuras IV.35 e IV.36). No início da época, em 1999, o afastamento dos valores estimados poderá estar relacionado com o facto de, em zonas não molhadas pela rega, com uma área mais representativa ao nível da parcela, haver uma  $E_s$  mais elevada do que em pleno Verão. No fim da época de 1998, o afastamento poderá estar relacionado com a ocorrência de orvalho nas noites que antecedem os dias de medição, dado que a medição da  $E_s$  diurna não incorpora o aumento de peso nocturno, mas incorpora a evaporação do orvalho depositado nos lisímetros. Este efeito não se verificou durante as medições realizadas em 1999.

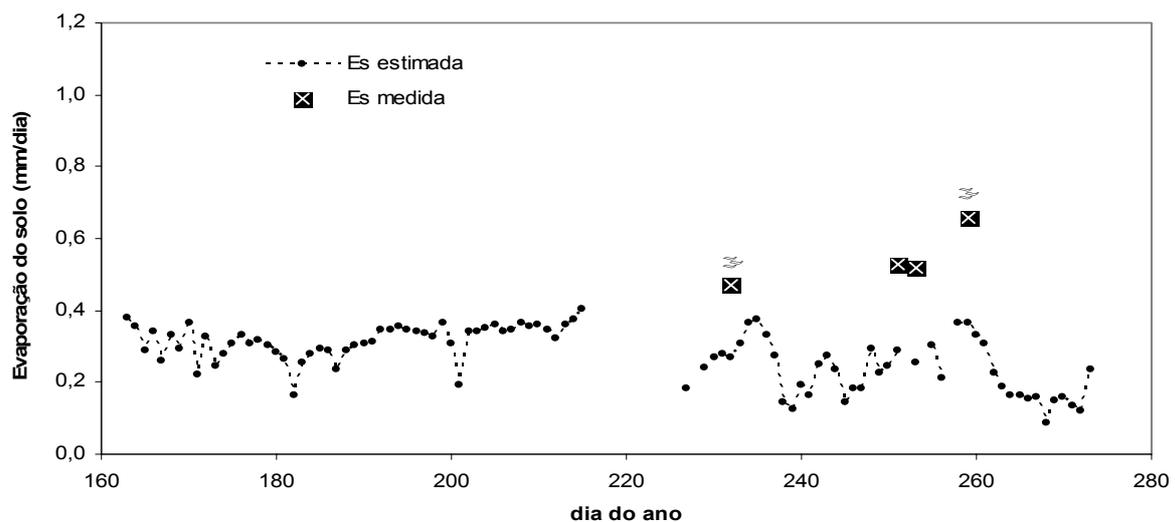


Figura IV.35 – Evaporação do solo ( $E_s$ ) estimada para o período em que decorreu o trabalho experimental pelo modelo desenvolvido para o pomar em estudo a utilizar na ausência de precipitação (modelo A) e medida para alguns dias da fase final (1998); ≡ assinala a ocorrência de orvalho em dias de medição de  $E_s$ .

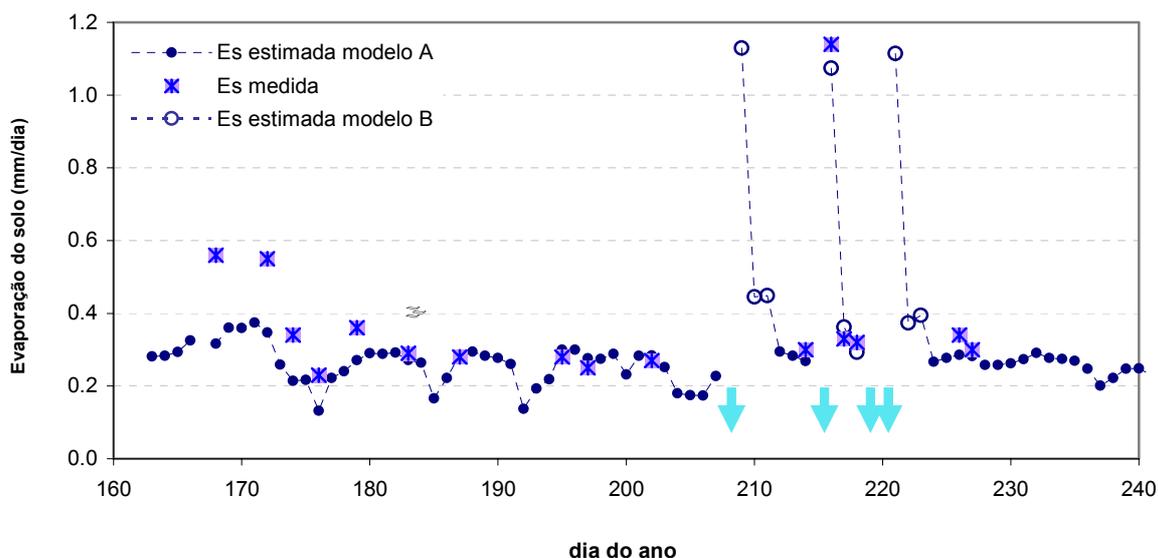


Figura IV.36 – Evaporação do solo ( $E_s$ ) medida e estimada usando os modelos desenvolvidos para o pomar em estudo (A e B), em 1999; as setas assinalam a ocorrência de precipitação nos dias 208, 215, 219 e 220; ☼ assinala a ocorrência de orvalho em dias de medição de  $E_s$ .

Para o período em que decorreu a maior parte do trabalho experimental desenvolvido, existe uma boa concordância entre valores medidos e estimados: no período compreendido entre o dia 174 e o dia 202 (Figura IV.36) o erro cometido é, em média, cerca de 17%. Estendendo o intervalo de tempo considerado a todo o período representado na Figura IV.36, o erro cometido na estimativa é idêntico. Considerando que a  $E_s$  representa apenas cerca de 10% da  $ET$  (na ausência de precipitação), poderá concluir-se que este modelo permitiu obter estimativas de precisão aceitável.

O modelo A (Figura IV.33) foi estabelecido com base num ciclo de dessecação, podendo ser utilizado para a estimativa da  $E_s$  de uma zona com plantas submetidas a défice hídrico, considerando  $t \geq 1$ . Assim procedeu-se à estimativa da  $E_s$  ao longo dos ciclos de *stress* a que foram submetidas as plantas (Figura V.37 (a) e (b)). O modelo foi estabelecido para um ciclo de 5 dias, sendo as estimativas para os dias subsequentes obtidas por extrapolação das dos dias anteriores, considerando uma taxa de variação idêntica. Tal simplificação não corresponde à realidade, dada a bem conhecida não linearidade desta variação. A curva real terá uma aproximação a zero de forma mais suave, mas, para os objectivos de utilização desta estimativa e uma vez que os valores são muito reduzidos relativamente à  $ET$  total, considerou-se ser este processo uma abordagem aceitável. Para os cinco dias em que é possível comparar a  $E_s$  medida e a  $E_s$  estimada, verificou-se que existe uma boa concordância (Figura IV.37 (b)).

O resultado da aplicação destas estimativas foi utilizado para o cálculo da  $E_s$  durante a indução de *stress* hídrico, permitindo obter  $ET$  nessas condições, como apresentado em V.2.

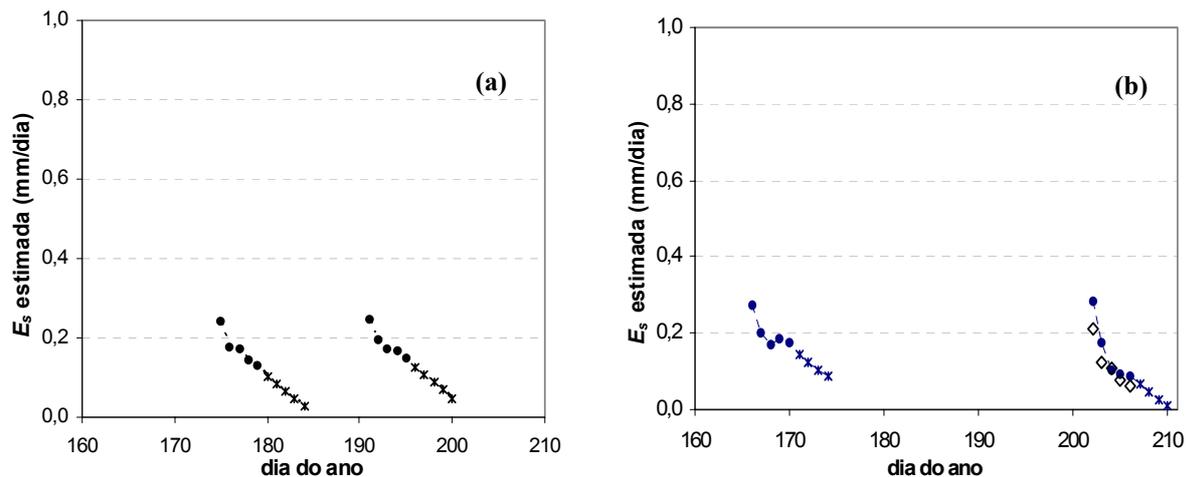


Figura IV.37 – Evaporação do solo estimada na zona submetida a *stress* hídrico, durante 2 ciclos de dessecação; (a) 1998, (b) 1999; os pontos assinalados por asteriscos são extrapolações, dado o modelo só produzir estimativas até ao 5º dia dos ciclos de dessecação, os losangos representam as medições efectuadas.

#### IV.4. Transpiração

A medição do fluxo de seiva pelo método de *Granier* permitiu a obtenção da transpiração para o pomar considerado. Utilizou-se o perfil radial de distribuição da densidade de fluxo de seiva, determinado com métodos de medição de fluxo de seiva por impulsos de calor, para corrigir os resultados, de forma a obter medições representativas, independentemente da profundidade do sensor. Este procedimento inovador, que evita a determinação directa da área de xilema condutor (que frequentemente só pode ser obtida de forma destrutiva), foi proposto em Ferreira *et al.* (1998) e é descrito adiante em IV.4.3.2.2. Procurou analisar-se aspectos metodológicos do método de *Granier*, designadamente, a influência nas medições dos gradientes naturais de temperatura no tronco e a representatividade da medição face ao ponto de colocação do sensor no xilema. A comparação com os resultados obtidos pelo método das flutuações instantâneas e com o método do balanço de calor, de modo a avaliar a precisão do método, é feita em IV.5.

##### IV.4.1. Gradientes naturais de temperatura no tronco: influência nas medições

Tal como sugerido em Ferreira e Zitscher (1996) utilizaram-se, durante períodos definidos, sensores sem aquecimento com o objectivo de determinar uma correcção para obviar o efeito dos gradientes térmicos naturais nas medições. Optou-se por desligar pontualmente o aquecimento de cada uma das sondas utilizadas para as medições de fluxo de seiva, em vez de utilizar sondas especificamente para este fim. A razão para este procedimento prende-se com o facto de se ter verificado que, neste caso particular, o padrão

encontrado para cada árvore apresentava diferenças marcadas (Figura IV.38). Estas diferenças relacionaram-se com a orientação das sondas e com a altura a que se encontravam posicionadas no tronco em relação ao solo. É, por exemplo, possível associar o comportamento distinto da sonda identificada na Figura IV.38 com o número 9, à sua posição, muito próxima de um gotejador. O tubo com gotejadores acompanhava a direcção das linhas, próxima da direcção norte-sul (13° NNE), encontrando-se esta sonda colocada na direcção sul (vd. Tabela III.6). Todas as outras sondas identificadas na Figura IV.38 se encontravam colocadas em direcções distintas da direcção norte ou da direcção sul e, portanto, mais afastadas dos gotejadores. A sonda número 7, a única colocada no lado oeste da linha, do conjunto considerado na Figura IV.38, encontrava-se assim no lado da linha exposto à radiação durante a tarde, mas sombreado durante a manhã. Durante a manhã, verificava-se um menor fluxo de calor para o solo no lado oeste da linha (vd. IV.2.2) do que durante a tarde e o consequente menor aquecimento do solo durante a manhã no lado oeste poderá ter originado o gradiente de temperatura encontrado. A sonda *Granier* número 8 (Figura IV.38) encontrava-se bastante perto do solo (o sensor inferior encontrava-se a cerca de 3.6 cm do solo), o que terá influenciado o aparecimento, durante a manhã, de um gradiente natural de temperatura mais acentuado, em relação às outras sondas.

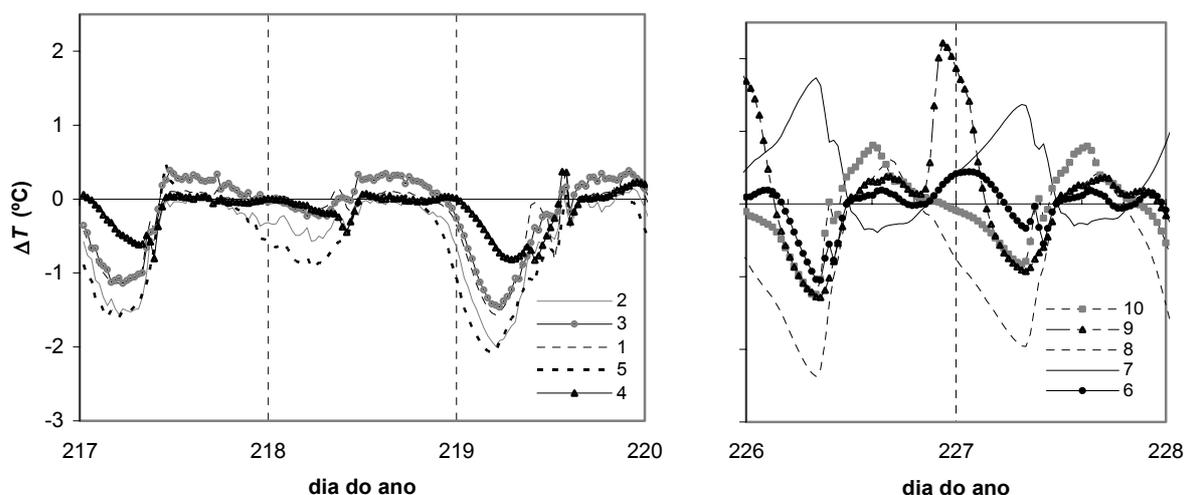


Figura IV.38 – Exemplo de alguns padrões das curvas de  $\Delta T$  obtidas sem aquecimento; os números da legenda referem a identificação das árvores, 1999.

Verificou-se que a ausência ou presença de rega influenciava fortemente a variação do gradiente térmico natural, tal como exemplificado na Figura IV.39 e na Figura IV.40, embora este efeito não se generalizasse a todas as árvores observadas. Nas Figuras IV.39 e IV.40 pode observar-se a evolução da diferença de temperatura entre sondas, sem aquecimento da sonda superior, durante sete dias consecutivos, ou muito próximos, para uma determinada árvore. Nos dias em que não ocorreu rega (Figura IV.39) os padrões de variação encontrados oscilam entre cerca de -1.5 e 0.5°C repetindo-se, neste conjunto de dias, com uma forma muito

semelhante. Nos dias em que ocorreu rega (Figura IV.40) verifica-se um aumento da amplitude térmica encontrada (a temperatura varia aproximadamente entre  $-1.5$  e  $2^{\circ}\text{C}$  durante um período diário) existindo uma nítida alteração relativamente ao padrão analisado na situação anterior (Figura IV.39), a partir do momento em que se inicia a rega. A rega decorreu a partir das 20.00 h e até cerca da 1.00 h (0.83 e 0.04 na escala da figura, respectivamente) o que coincide com uma alteração marcada do gradiente de temperatura, que no dia 229 chega a atingir cerca de  $2^{\circ}\text{C}$ . Estes gradientes são superiores aos normalmente observados e diferem ainda do padrão habitual nestes casos, dada a proximidade dos sensores em relação ao solo e dado o coberto ser bastante aberto, devido à realização da rega diária sobre a linha e à existência do cômodo.

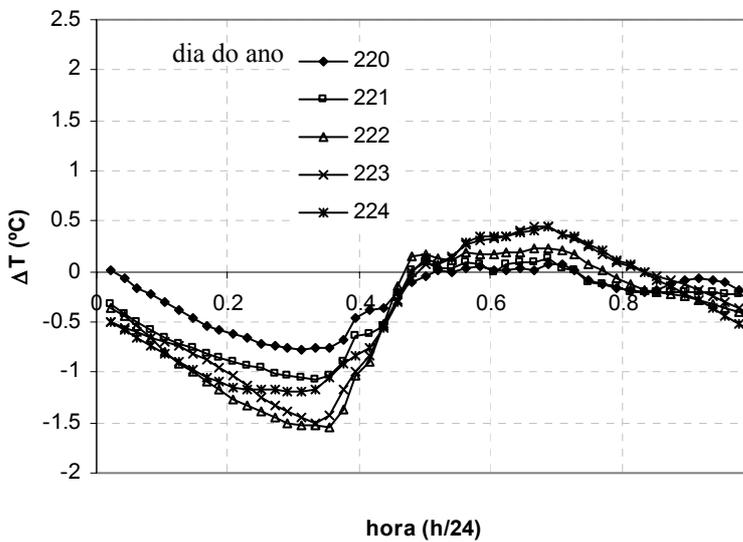


Figura IV.39 – Diferença de temperatura entre sondas de um sensor *Granier*, numa árvore individual (árvore 9, em 1999, que se encontrava junto de um gotejador) em dias em que não ocorreu rega nem aquecimento da sonda superior.

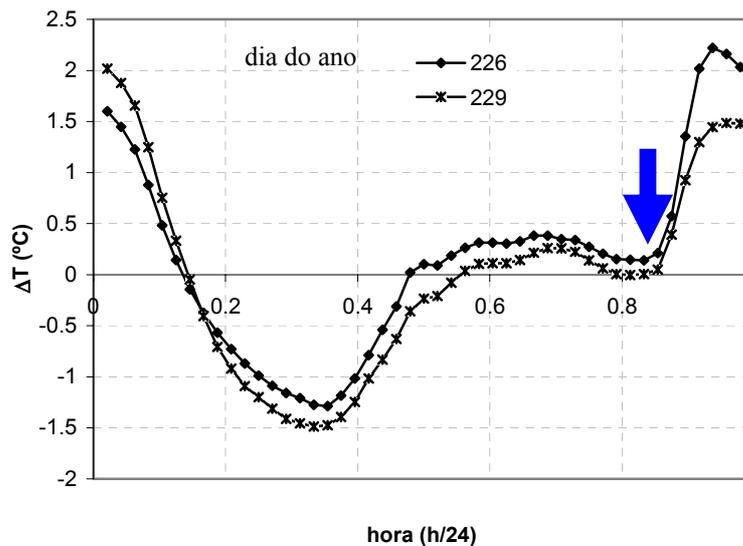


Figura IV.40 – Diferença de temperatura entre sondas de um sensor *Granier*, na mesma árvore da figura anterior (árvore 9, em 1999, que se encontrava junto de um gotejador), em dias em que ocorreu rega e na ausência de aquecimento da sonda superior; a seta assinala o início da rega.

Além da perturbação causada pela rega, existia naturalmente uma influência das condições ambientais, responsável por alterações no padrão de variação do  $\Delta T$  sem aquecimento, ao longo do tempo. Para ter em conta esta situação, foram utilizadas, sempre que possível, correcções representativas de períodos de mais do que um dia e de momentos diferentes no decorrer dos períodos experimentais. O facto de a zona de colocação das sondas se situar bastante próxima do solo terá, certamente, contribuído para o aparecimento de gradientes elevados. O aparecimento de gradientes naturais tão elevados, a par com a impossibilidade de determinar simultaneamente o padrão diário dos gradientes naturais e a densidade do fluxo de seiva, poderá ter introduzido alguma imprecisão nos resultados. No caso da determinação de  $\Delta T_{max}$  (vd. II.4.2.3), dado que este ocorre, geralmente, ao fim da noite e dado que, nesse momento, o gradiente de temperatura na ausência de aquecimento revela frequentemente um afastamento pronunciado do valor nulo, poderá ter ocorrido um erro de estimativa do fluxo, em dias em que a correcção não anulou completamente o efeito dos gradientes naturais.

#### IV.4.2. Estimativa de $\Delta T_{max}$

O gradiente máximo de temperatura entre a sonda aquecida e a não aquecida, de um sensor de *Granier*, ocorre preferencialmente ao fim da noite, em condições de humidade do ar próximas da saturação (Granier, 1985). No entanto, verifica-se por vezes transpiração nocturna se as condições ambientais se mostrarem favoráveis (Granier, 1987b). Num pomar de pessegueiros, em Águas de Moura, observou-se transpiração nocturna, proporcional ao *VPD* (Ferreira, comunicação pessoal). Com efeito, verificou-se experimentalmente que  $\Delta T_{max}$  tendeu a ser mais elevado em noites com humidade relativa do ar próxima de 100% e o oposto quando esta se reduz (Figura IV.41). Para ultrapassar as dificuldades de estimativa de  $\Delta T_{max}$  consideram-se, por vezes, períodos de cerca de 10 dias, utilizando uma regressão linear dos valores máximos de  $\Delta T$  verificados (Granier, 1987a) ou utiliza-se a envolvente superior dos mesmos valores (Granier, 1987b) (vd. III.5.2). No âmbito deste estudo, utilizou-se a envolvente superior da sucessão de valores de  $\Delta T_{max}$ . A Figura IV.42 apresenta um exemplo do cálculo de  $\Delta T_{max}$ , mostrando os máximos gradientes de temperatura medidos para uma das árvores amostradas em 1998, os mesmos gradientes depois de efectuada a correcção para obviar os efeitos dos gradientes naturais de temperatura e a linha utilizada para estimar  $\Delta T_{max}$  (na presença de transpiração nocturna). Neste caso, é possível verificar que o conjunto de procedimentos adoptado provocou alterações no  $\Delta T_{max}$  que rondaram, por vezes, os 2°C. Geralmente o  $\Delta T_{max}$  apresenta uma maior estabilidade mas, em situações mais críticas, como a presente, é necessário realizar uma apreciação cuidada em relação com as variáveis meteorológicas, o que torna difícil uma automatização do processo.

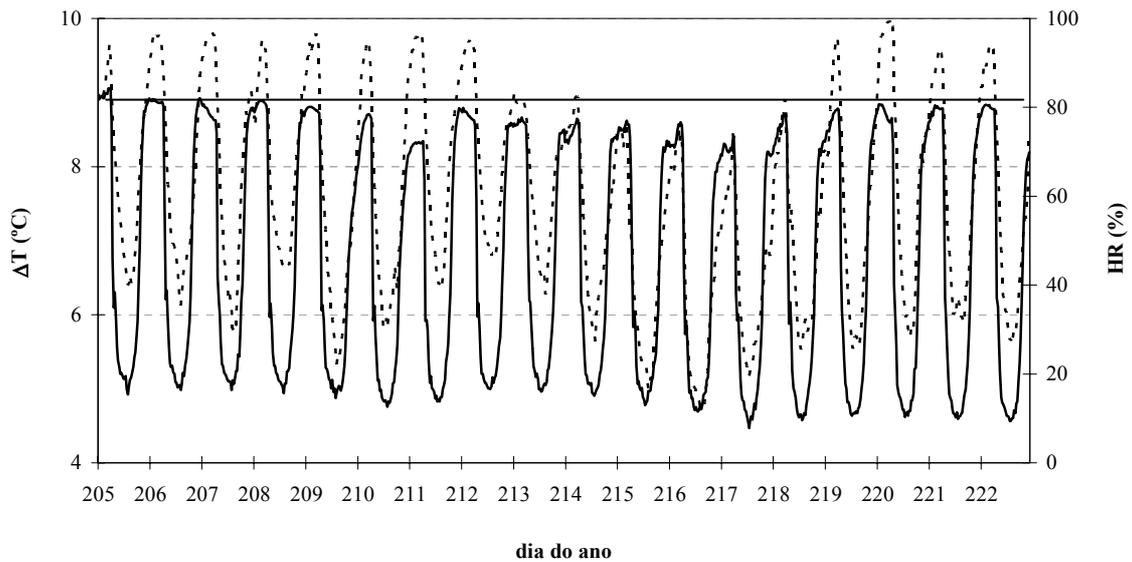


Figura IV.41 – Evolução conjunta do  $\Delta T$ , já corrigido para os efeitos dos gradientes naturais (linha a cheio) e da umidade relativa (linha tracejada); exemplo para a árvore 1, em 1998.

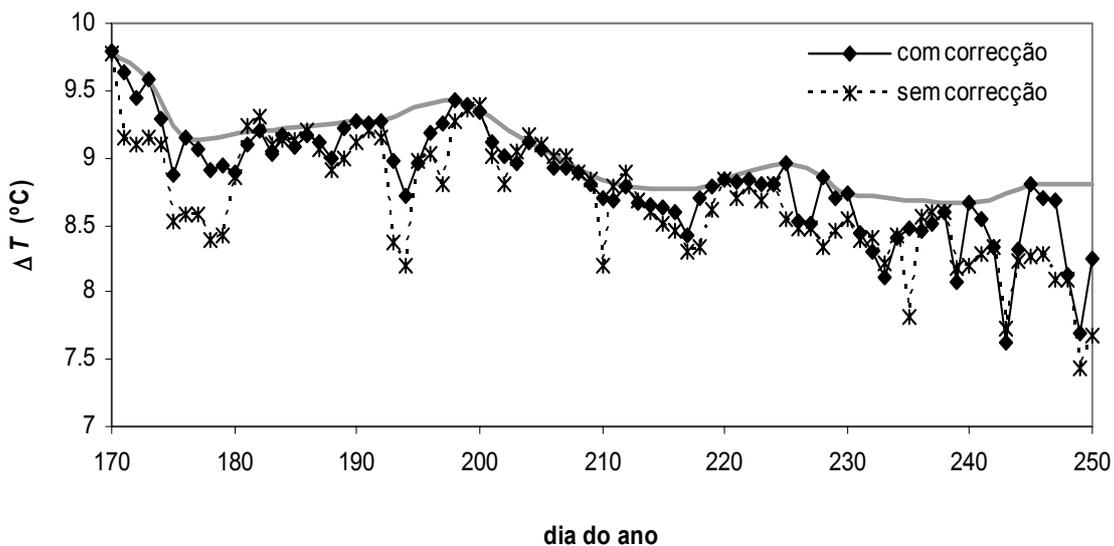


Figura IV.42 – Evolução diária do  $\Delta T$  máximo, não corrigido e corrigido para o efeito dos gradientes naturais de temperatura; exemplo para a árvore 1 em 1998; a linha cinzenta representa os valores finais utilizados (envolvente).

#### IV.4.3. Análise de parâmetros para o estudo da transpiração do coberto vegetal

A transpiração média do coberto vegetal é frequentemente estimada a partir das características do povoamento, procurando-se “extrapolar” para a população a informação obtida a partir da amostra estudada. Este processo é denominado por *upscaling* na nomenclatura anglo-saxónica. Nesta secção são analisadas informações recolhidas referentes a parâmetros necessários em diferentes etapas desse processo ou simplesmente ao estudo da transpiração em relação com características dos indivíduos.

#### IV.4.3.1. Índice de área foliar

As funções obtidas por análise de regressão para estimar a área foliar em função do comprimento e/ou largura das folhas (como descrito em III.9.1) são descritas na Tabela IV.5. Destas, optou-se por utilizar a que relaciona a área foliar com o comprimento da folha elevado ao quadrado (equação destacada na Tabela IV.5). A razão para esta escolha prende-se com a maior facilidade de utilização, face à relação que utiliza simultaneamente a largura e tendo em conta que se trata também de uma correlação de coeficiente elevado. A utilização deste tipo de função permite ainda a comparação dos resultados com os descritos em Ferreira *et al.*, (1997a e b) para um pomar de pessegueiro de características semelhantes e onde se usou a mesma metodologia de estimativa do *LAI*.

Na Tabela IV.5 apresentam-se também as funções encontradas para estimar a área foliar em função do número de folhas (*nf*). Em 1998, o tamanho da amostra era pequeno ( $n = 3$ ) o que poderá ter dificultado a obtenção de um coeficiente de correlação mais elevado. No ano seguinte, apesar de a função obtida em 10/08/99 apresentar um coeficiente de correlação mais baixo, foi a escolhida para estimar a área foliar por ter sido determinada num momento mais próximo daquele em que se fez a contagem do número de folhas.

Tabela IV.5 - Estimativa da área foliar em função das dimensões da folha ( $A_f = f(c^2)$ ) e do número de folhas ( $\Sigma A_f = f(nf)$ );  $A_f$  = área foliar,  $c$  = comprimento,  $l$  = largura,  $nf$  = número de folhas; o tipo de função  $A_f = f(c^2)$  em destaque, foi a escolhida, dada a facilidade de utilização e a possibilidade de comparação com resultados anteriores em pessegueiro (Ferreira *et al.*, 1997a e b).

Tipo de função	Equação de regressão		Coeficiente de correlação ( $r^2$ )	Equação de regressão		Coeficiente de correlação ( $r^2$ )
	1998	1999		1999	1999	
$A_f = f(c.l)$	$y = 0.65x + 0.78$		0.96			
$A_f = f(c^2)$	$y = 0.13x + 5.85$		<b>0.88</b>	$y = 0.14x + 4.39$ (16/06/99)		0.96
				$y = 0.16x + 2.77$ (10/08/99)		0.98
$A_f = f(c)$	$y = 3.86x - 22.30$		0.86			
$A_f = f(l)$	$y = 19.48x - 32.91$		0.83			
$\Sigma A_f = f(nf)$	$\Sigma A_f = 14.78 (nf) + 905.64$		0.66	$y = 14.52x + 693.25$ (16/6/99)		0.86
				$y = 14.90x + 852.27$ (10/08/99)		0.70

Na Figura IV.43 são apresentados os resultados obtidos na Atalaia (Montijo), referentes às funções do tipo  $A_f = f(c^2)$ , bem como resultados obtidos anteriormente, em pessegueiro, na zona de Águas de Moura, Setúbal (Ferreira, informação pessoal). Os declives das rectas ajustadas são muito próximos, indicando uma boa concordância para as duas situações e também para as diferentes datas entre si.

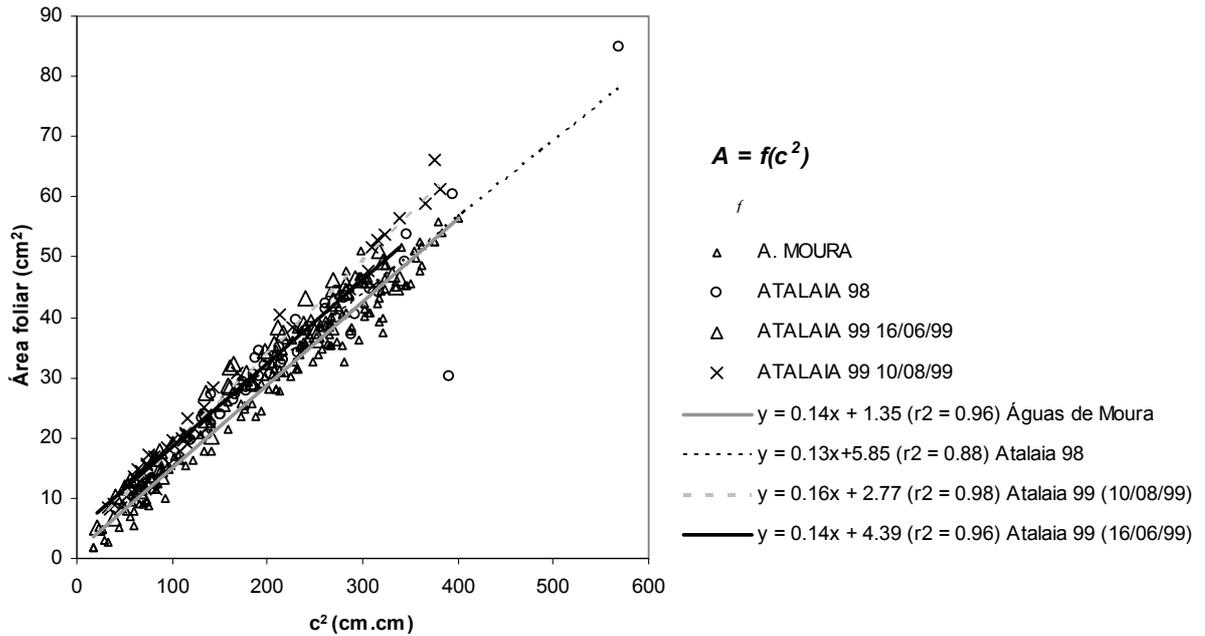


Figura IV.43 – Estimativa da área foliar em função do comprimento das folhas, em plantas de pessegueiro, para duas situações experimentais distintas.

Na Figura IV.44 são comparadas as diferentes funções do tipo  $\Sigma A_f = f(nf)$  obtidas, tanto em Atalaia (Montijo) como em Águas de Moura (Setúbal). Também aqui as rectas ajustadas são próximas, embora para Águas de Moura se verifique uma tendência de variação um pouco diferente.

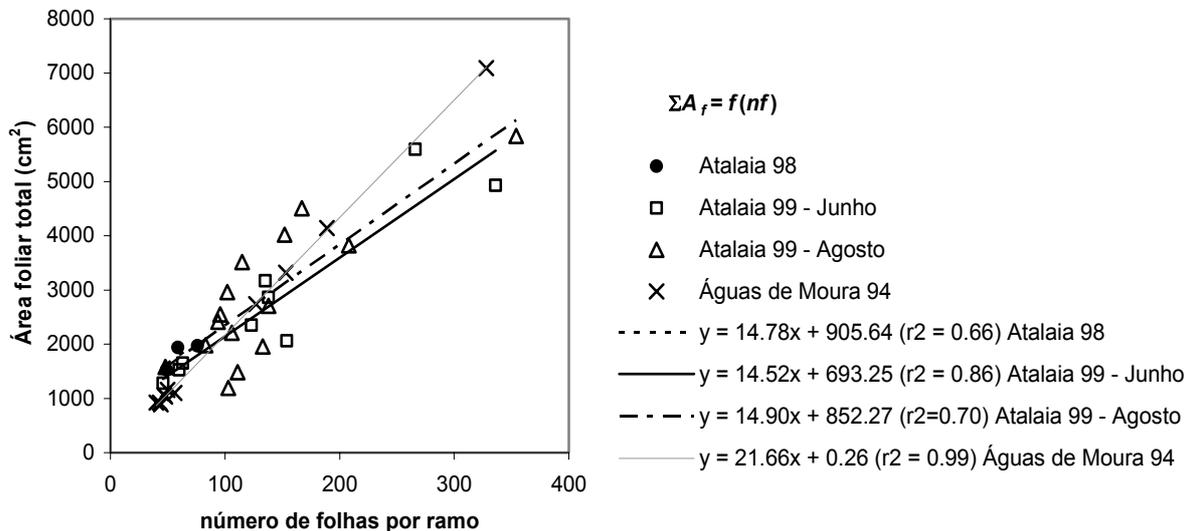


Figura IV.44 – Estimativa da área foliar em função do número de folhas, em plantas de pessegueiro, para duas situações experimentais distintas.

Em 1998, foi estimado um  $LAI$  médio (para as árvores em que foi medido o fluxo de seiva pelo método de *Granier*) de 1.2, correspondente à contagem de folhas realizada em Julho/Agosto e que decresceu para 0.13 quando essa contagem foi feita em Outubro. Em

1999, foram estimados respectivamente os valores de 1.4 (Julho) e de 0.03 (Outubro). A Figura IV.45 indica o *LAI* de cada árvore estudada, para o primeiro período de medições (em pleno Verão), verificando-se que existe uma grande variabilidade individual, embora a média das amostras seja próxima. O *LAI* encontrado em Julho de 1999 (1.4) é coincidente com o referido em Ferreira *et al.* (1997a e b) para pessegueiro e em condições semelhantes às deste estudo.

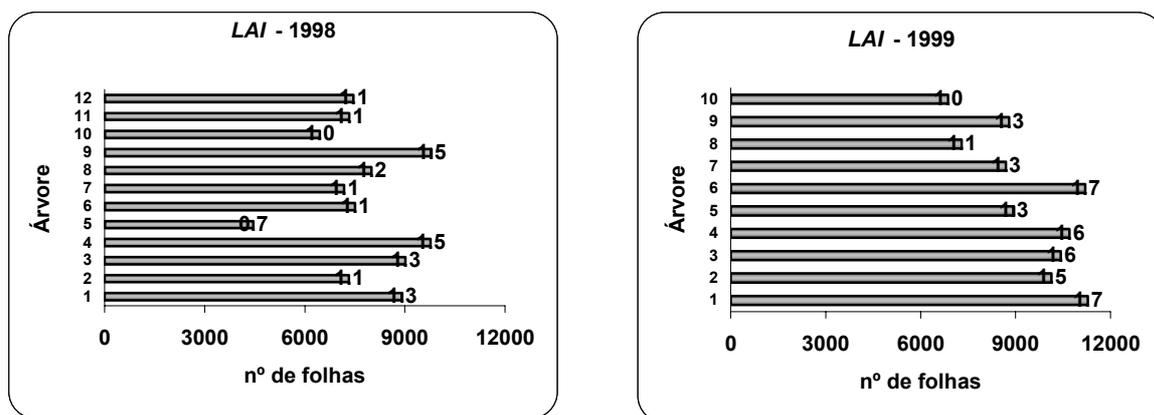


Figura IV.45 – Número de folhas de cada árvore e *LAI* estimado em pleno Verão; em 1998 a estimativa foi realizada entre o final de Julho e o princípio de Agosto, em 1999 foi realizada em Julho.

Verificou-se que o *LAI* e o diâmetro do tronco se correlacionavam (Figura IV.46). De uma forma geral, trata-se de um pomar muito intervencionado, com podas intensivas, inclusive poda em verde. Consequentemente, a área foliar estará algo reduzida, relativamente a uma árvore no estado natural. As dimensões do tronco não são, no entanto, modificadas artificialmente. Tal poderá originar um aumento do *LAI* menos pronunciado face ao aumento do diâmetro do tronco, para valores mais elevados de ambos.

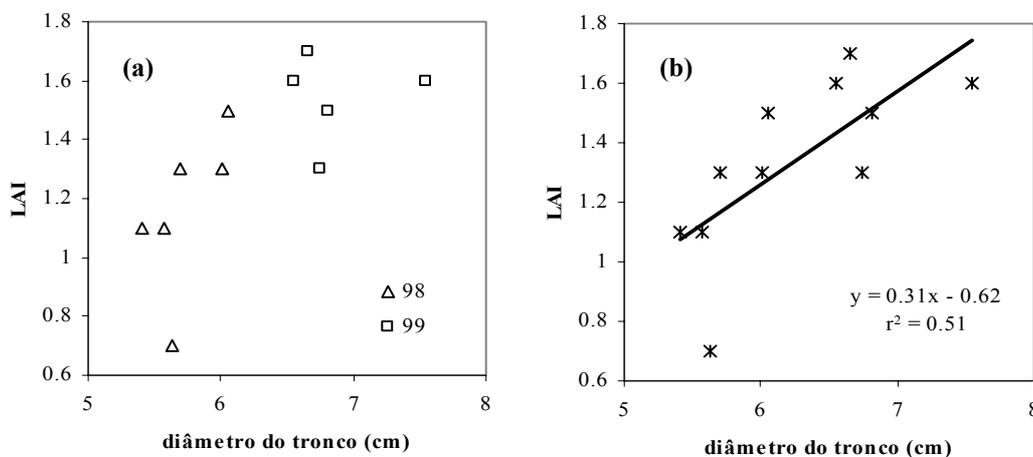


Figura IV.46 – Relação entre o *LAI* e o diâmetro do tronco; (a) representação gráfica das observações referentes a cada uma das amostras, (b) mesmos pontos com regressão linear.

### IV.4.3.2. Área activa de transporte no xilema

#### IV.4.3.2.1. Determinação através da circulação de corantes no xilema

A área de xilema condutor determinada através da circulação de corantes no tronco (vd. III.9.2) foi, em média, de cerca de 64% (Figura IV.47 (a)) em relação à área total da secção transversal (incluindo a casca). Este valor é inferior ao encontrado por Tavares (1993), 80%, para pessegueiros com 3 anos, mas superior ao observado nesse mesmo pomar (48%) 3 anos depois (1996). Excluindo a casca, a percentagem de xilema condutor representa cerca de 75% da área da secção transversal. Foi feita a avaliação da mobilidade, como descrito em III.9.2, tendo-se verificado que a forma como os corantes progrediam no tronco (Figura IV.47 (b)) se assemelhava no caso do *verde malaquite*, da *safranina* e da *toluidina azul*. O decréscimo da área corada, à medida que aumenta a distância ao ponto de inserção, processa-se a uma taxa semelhante nestas três situações, apenas com uma ligeira diferença nas secções iniciais coradas com *safranina*, em que a área corada permanece quase constante até cerca de 10 cm de distância do ponto de inserção do corante. Para o *verde-rápido* observou-se um decréscimo inicial da área corada muito rápido, antes de percorridos os primeiros 10 cm, seguido de uma extensão do tronco em que a área corada é aproximadamente constante. Ainda para o *verde-rápido* e acima dos 30 cm, verificou-se um ligeiro decréscimo da área corada. Na utilização deste corante foi notória uma perda acentuada da intensidade da cor quando se compararam as primeiras três secções amostradas e as seguintes. Este comportamento não foi observado para os outros corantes. O *verde-rápido* distinguiu-se também pela manutenção de um anel colorido de contornos nítidos ao longo das secções do tronco, enquanto que, quando se utilizaram os outros corantes isto se verificava apenas nas primeiras secções, mais perto da base do tronco, evoluindo para zonas de contorno irregular por vezes com o aspecto de um conjunto de linhas, em vez de uma área completamente preenchida (Figura IV.48).

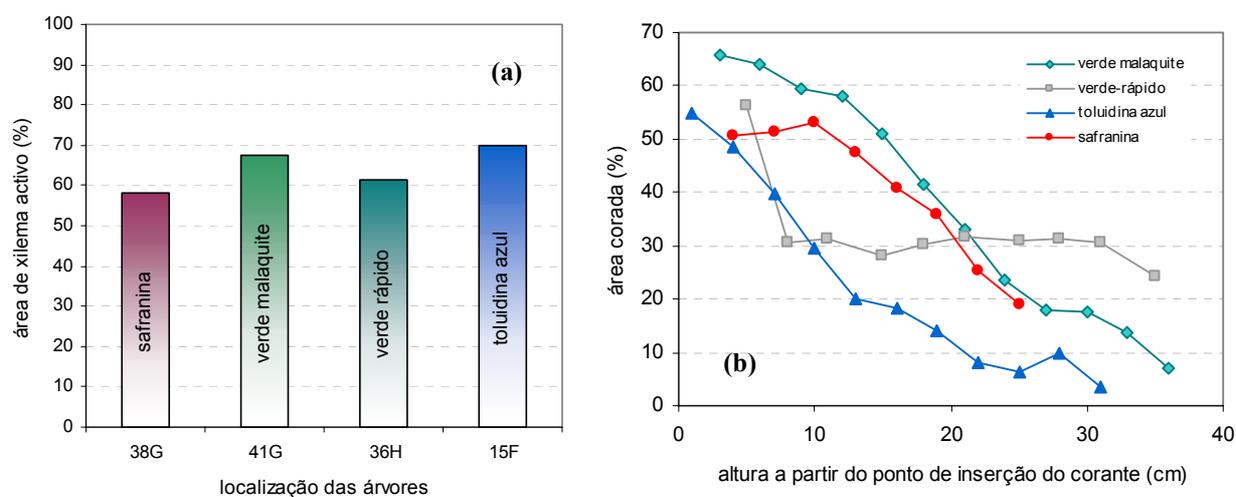


Figura IV.47 – (a) Área de xilema activo determinada através da circulação de corantes no tronco (% em relação à área total da secção transversal); (b) Avaliação da mobilidade dos corantes utilizados, através da medição da área corada em secções sucessivas, a partir do ponto de inserção do corante.

Não se encontraram razões para a selecção preferencial de *safranina*, *toluidina azul* ou *verde malaquite*, na realização deste tipo de ensaio. Em relação aos outros corantes, o *verde-rápido* apresenta uma absorção mais marcada num sector inicial do tronco, acompanhado de um esbatimento acentuado da cor entre as secções do tronco iniciais e as restantes. Tal poderá dificultar a identificação das áreas coradas, não sendo este corante eventualmente muito indicado para este tipo de estudos.

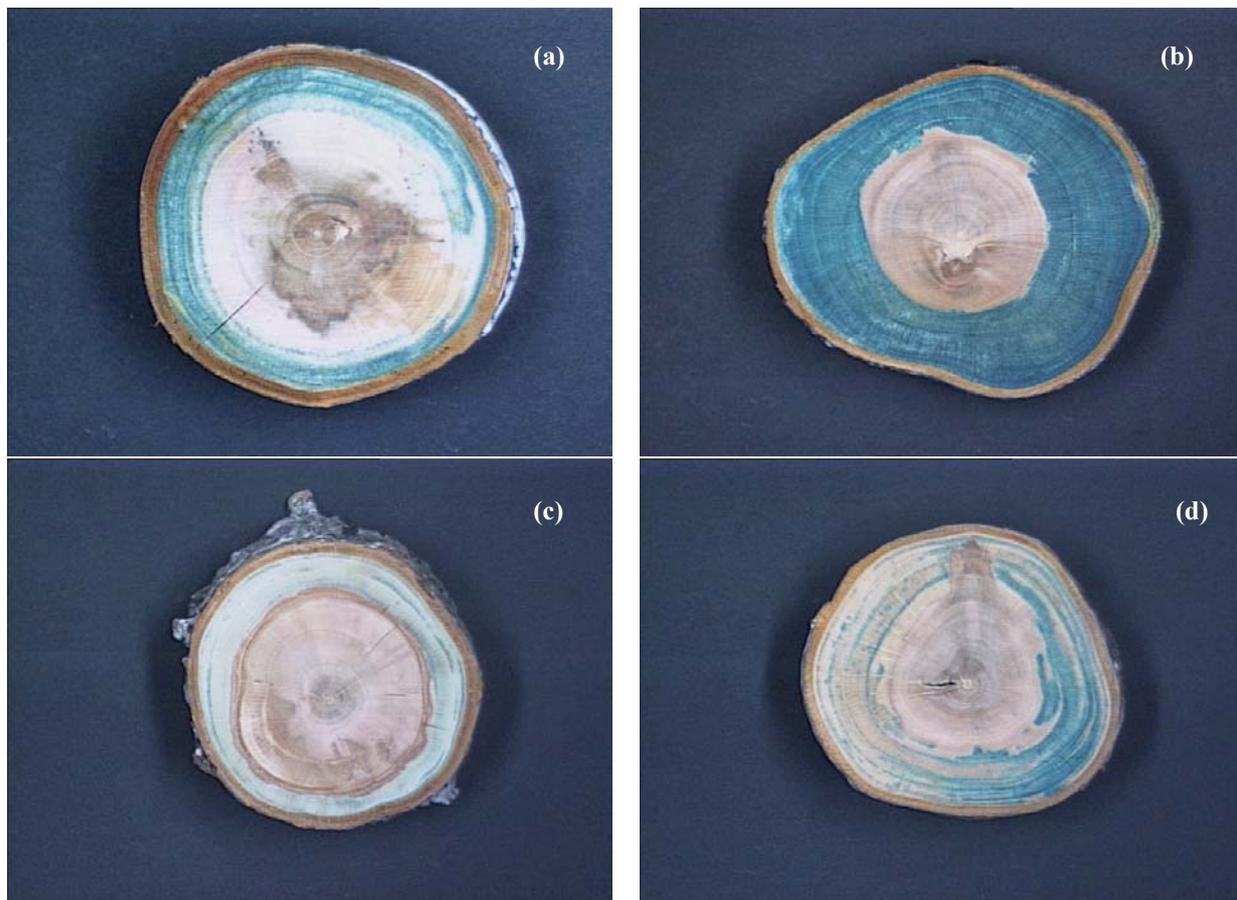


Figura IV.48 – Aspecto da secção transversal do tronco após a circulação de corantes; (a) *verde-rápido* numa secção perto do ponto de inserção do corante; (b) *verde malaquite* numa secção perto do ponto de inserção do corante; (c) *verde-rápido* numa secção no extremo oposto ao da inserção de corante; (d) *verde malaquite* numa secção no extremo oposto ao da inserção de corante.

#### IV.4.3.2.2. Correção dos fluxos através do perfil radial de distribuição do fluxo de seiva

Foram utilizados dois métodos que permitem a determinação do perfil radial do fluxo de seiva (como referido em III.5.4, o método dos impulsos de calor e o método de deformação do campo de temperaturas) tendo-se detectado uma distribuição não homogénea da densidade de fluxo de seiva com a profundidade no tronco. Nesta situação, a posição em que se insere radialmente um sensor de *Granier* pode introduzir erros na determinação do fluxo, se a densidade de fluxo medida não for representativa da densidade de fluxo média no raio

considerado. Para ultrapassar esta dificuldade foi utilizada uma metodologia desenvolvida por Ferreira *et al.* (1998), que associa a utilização do método de *Granier* (para a determinação da densidade do fluxo de seiva) a um método que determine o perfil radial de distribuição, permitindo o cálculo de uma correcção a aplicar, quando a profundidade da medição pontual não é representativa. A utilização dos métodos que permitem conhecer o perfil radial fornece, neste caso, informação apenas sobre a frequência de distribuição da densidade de fluxo, não se recorrendo à utilização de valores absolutos de transpiração, o que evita a introdução na correcção de hipotéticos desvios, decorrentes da diferença entre metodologias quanto à avaliação quantitativa da transpiração.

A Figura IV.49 apresenta um exemplo, para um dos dias de medição (dia do ano 211 de 1999) da variação do perfil radial de distribuição da densidade de fluxo de seiva ao longo do dia, obtido pelo método de impulsos de calor. Durante o período diurno, embora ocorram variações quantitativas que se reflectem num maior ou menor afastamento das curvas do plano nulo, observa-se que o tipo de forma geométrica dos sucessivos perfis é semelhante.

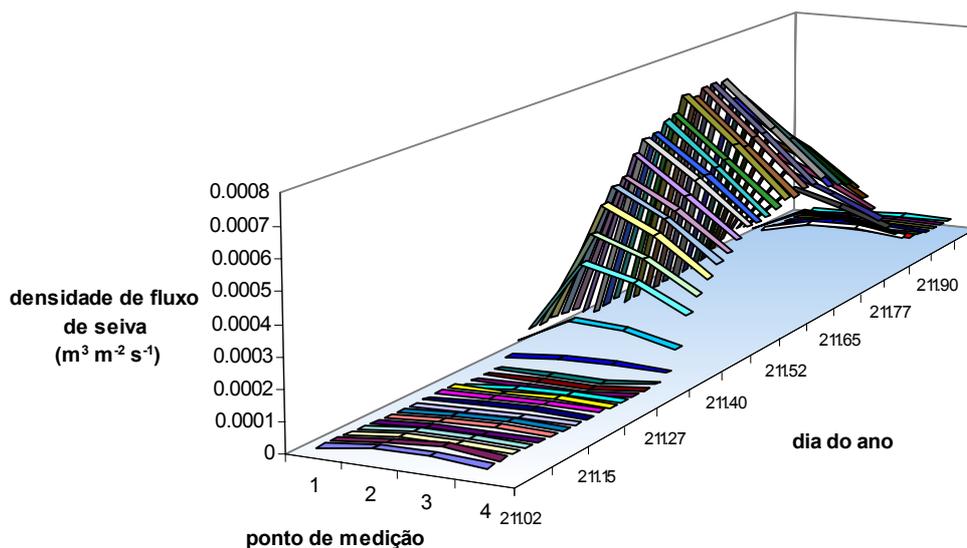


Figura IV.49 – Perfil radial de distribuição da densidade de fluxo de seiva medido pelo método dos impulsos de calor; exemplo para o dia do ano 211, de 1999 (28 de Julho). O ponto de medição 1 corresponde à posição mais externa.

A Figura IV.50 mostra o resultado das medições dos perfis radiais, realizadas em duas árvores, durante períodos de oito dias sucessivos, entre as 12 e as 15 horas (hora local). A primeira árvore (Figura IV.50 (a)), com a referência 37-D (ver Figura III. 5), tinha um raio igual a 3.8 cm (sem considerar a casca) e a sonda utilizada foi colocada na direcção noroeste. A segunda árvore (Figura IV.50 (b)), com a referência 36-D (igualmente indicada na Figura III.5), tinha um raio igual a 3.9 cm (sem considerar a casca) e a sonda foi colocada na direcção oeste. Os dados do sensor localizado a maior profundidade, na árvore 36-D (Figura IV.50 (b)), não foram utilizados, por se terem detectado erros na medição. Em cada dia, a densidade de fluxo de seiva é máxima a uma profundidade de cerca de 0.75 cm, nas duas

árvores amostradas e em todos os dias considerados. A forma do perfil obtido é também idêntica.

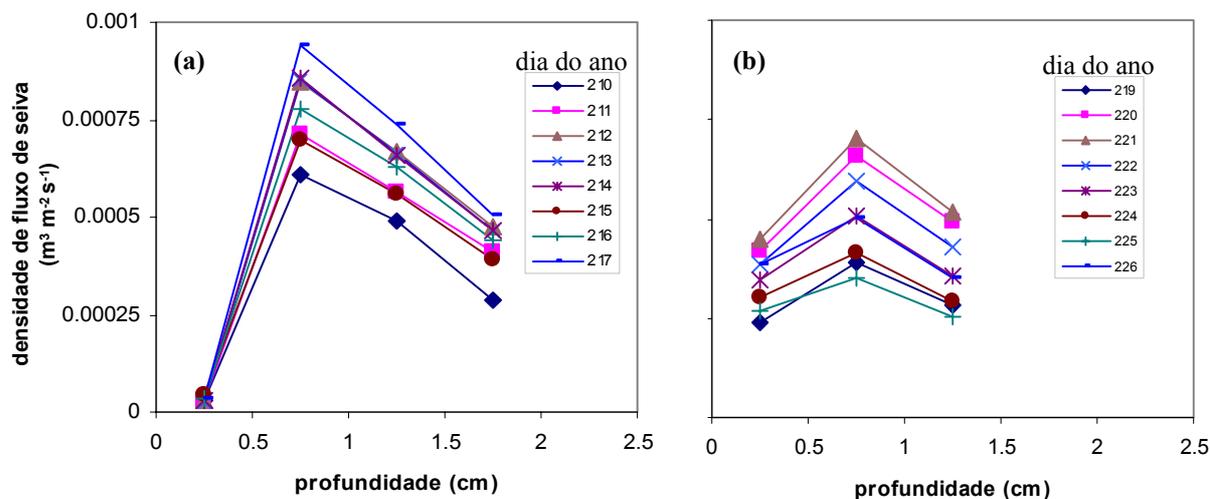


Figura IV.50 – Perfil radial de distribuição do fluxo de seiva medido pelo método dos impulsos de calor, (a) árvore 37-D; (b) árvore 36-D; médias obtidas num período de 8 dias, entre as 12 e as 15 horas (hora local); a escala representada em abcissas indica a profundidade no tronco a que foram realizadas as medições.

A Figura IV.51 apresenta o resultado da medição do perfil radial de distribuição do fluxo de seiva, obtido pelo método de deformação do campo de temperaturas, no dia 5 de Julho de 1999 (186). A árvore amostrada, identificada na Figura III.5 com a referência E-17, tinha um raio igual a 4.5 cm (sem considerar a casca) e o sensor foi colocado na direcção noroeste. A máxima densidade de fluxo foi observada um pouco depois do primeiro centímetro de profundidade.

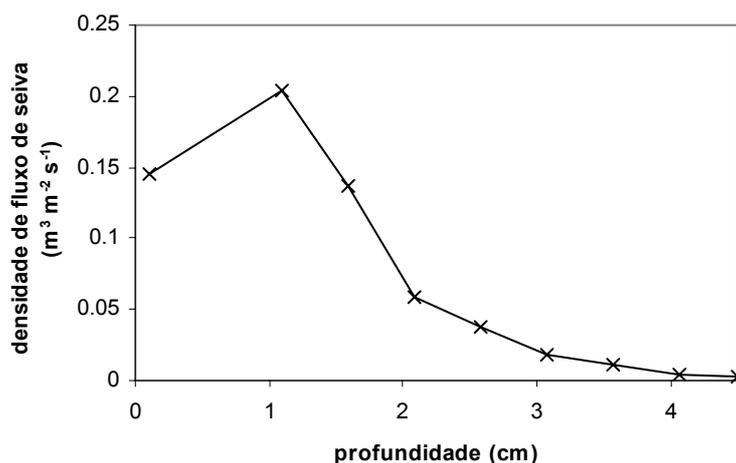


Figura IV.51 – Perfil radial de distribuição do fluxo de seiva obtido pelo método de deformação do campo de temperaturas, cerca das 13 horas (hora local) do dia 186, 1999 (5 de Julho); a escala representada em abcissas indica a profundidade no tronco a que foram realizadas as medições.

Segundo a determinação realizada com corantes (ver IV.4.3.2.1), a área de xilema condutor representa, em média, cerca de 64% da área total e cerca de 75% da secção transversal do tronco, excluindo a área correspondente à casca do tronco, o que permite calcular que o raio de xilema condutor é cerca de 50% do raio total da secção transversal do

tronco, medido a partir do exterior e não considerando a casca. Este resultado não concorda completamente com a medição do perfil radial de fluxo de seiva apresentada na Figura IV.51 verificando-se, no entanto, que efectivamente, a partir de 50% da profundidade considerada (que corresponde a cerca de 2.3 cm), a densidade de fluxo de seiva se reduz drasticamente, atingindo valores quase nulos. As diferenças encontradas poderão estar relacionadas com aspectos metodológicos, no caso do método de deformação do campo de temperaturas, ou de amostragem. As medições utilizáveis, obtidas com o método de deformação do campo de temperaturas, dizem respeito apenas a uma árvore, com um tronco de diâmetro superior à média da parcela. Tal sugere alguma cautela na utilização deste tipo de perfil radial para a extrapolação para outros indivíduos. No entanto, estes dados são concordantes com os obtidos pelo método dos impulsos de calor, mesmo se, neste caso, as árvores amostradas tinham um diâmetro inferior. O perfil obtido pelo método de impulsos de calor não abrange todo o raio da secção transversal do tronco (até ao ponto central) dadas as dimensões das sondas. Apesar desta limitação, a forma dos perfis encontrados assemelha-se até à profundidade em que é possível a comparação, abrangendo além disso, a zona de maior fluxo (Figura IV.50 e IV.51).

Foi portanto possível constatar que, tal como em muitas outras espécies, a distribuição radial de fluxo de seiva apresenta uma forte heterogeneidade. Tal como referido em II.4.2.3 frequentemente as densidades de fluxo de seiva são mais elevadas nas camadas mais exteriores do tronco. Quando se utiliza um único ponto de medição da densidade de fluxo, como no método de *Granier*, ao assumir que esta medição é representativa de todo o raio condutor, poderá então incorrer-se em erro. A utilização simultânea do conhecimento do perfil de distribuição radial e de medições de carácter pontual no tronco pode, como atrás referido, ajudar a ultrapassar esta dificuldade. Idealmente, a medição com o método de *Granier* deveria ser realizada num ponto representativo, nem sempre conhecido. No entanto, conhecendo o perfil radial de distribuição é possível calcular matematicamente a densidade do fluxo no ponto representativo. Sendo  $D_{eq}$  a densidade do fluxo no ponto representativo<sup>9</sup>,  $D_i$  a densidade do fluxo na secção radial  $i$ ,  $A_i$  a área da secção radial  $i$ ,  $p_i$  a razão entre a área da secção radial e a área da secção total do tronco e  $A_T$  a área da secção total do tronco, verifica-se que (Ferreira *et al.*, 1998):

$$F = D_1 A_1 + D_2 A_2 + \dots + D_n A_n$$

sendo  $p_i = A_i/A_T$ , então

$$F = D_1 p_1 A_T + D_2 p_2 A_T + \dots + D_n p_n A_T$$

$$= (D_1 p_1 + D_2 p_2 + \dots + D_n p_n) A_T$$

$$= \left( \sum D_i p_i \right) A_T$$

$$= D_{eq} A_T$$

(IV.2)

<sup>9</sup> A densidade de fluxo de seiva representa-se aqui por  $D$  para manter a nomenclatura utilizada em Ferreira *et al.* (1998), apesar de o símbolo utilizado noutras partes deste trabalho ser  $u$ .

em que  $i$  varia entre 1 e  $n$ , sendo  $n$  o número de secções consideradas, que correspondem ao número de pontos de medição no perfil. Segundo Ferreira *et al.* (1998), a razão  $D_i/D_{eq}$  vai permitir conhecer qual a profundidade a que se deve colocar o sensor, para obter uma medição representativa (profundidade a que se verifica  $D_i/D_{eq} = 1$ ) ou qual o factor de correcção a aplicar quando o sensor não é colocado no ponto representativo. A correcção correspondente ao ponto de localização do sensor seria função de  $D_i/D_{eq}$ , no pressuposto de que cada medição representaria apenas um ponto. Nos resultados apresentados em Ferreira *et al.* (1998), esta correcção não apresentou uma variação significativa em função do tempo (variação diária durante um período de 11 dias) ou em função do estado hídrico da planta, na gama considerada. Verificou-se também que o valor de correcção se mantinha aproximadamente constante durante o período diurno.

Como descrito na secção anterior, os perfis radiais de distribuição de fluxo de seiva analisados por dois métodos distintos, mostraram uma marcada assimetria entre as secções circulares mais exteriores e o cerne. A comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos e entre árvores diferentes, apenas é possível utilizando um factor de normalização, dada a ampla variação dos valores absolutos (obtidos em períodos e plantas diferentes, com os sensores colocados em posições distintas). Para este efeito, utilizou-se a razão  $D_i/D_{eq}$ , obtendo-se os resultados apresentados na Figura IV.52. Optou-se também por utilizar as dimensões reais das plantas e não as dimensões relativas. Esta opção baseou-se em dados anteriores (Ferreira, informação pessoal) em que se constatou que as diferentes idades e dimensões das plantas, em pessegueiro, não alteravam de forma significativa a profundidade (radial) até à qual se verifica a existência de xilema activo. A este respeito, a Figura IV.53 apresenta a relação entre a parte do raio que atravessa a área de xilema ( $r_x$ ) e o raio total ( $r_t$ , excluindo a parte correspondente à casca). São comparados dados obtidos no mesmo pomar de pessegueiro (variedade *Maybelle*), referentes a momentos diferentes: 1993 e 1996 (Águas de Moura - Setúbal; Tavares, 1993 e Ferreira, dados não publicados). Pela observação da Figura IV.53, parece ser razoável considerar a utilização das dimensões reais das plantas para a apreciação do perfil radial de distribuição da densidade de fluxo de seiva, dado  $r_x$  não variar de forma apreciável com  $r_t$ . Utilizando as dimensões reais do tronco, verifica-se que a zona de maior densidade de fluxo é coincidente, apesar de os troncos das árvores terem diferentes raios (Figura IV.52).

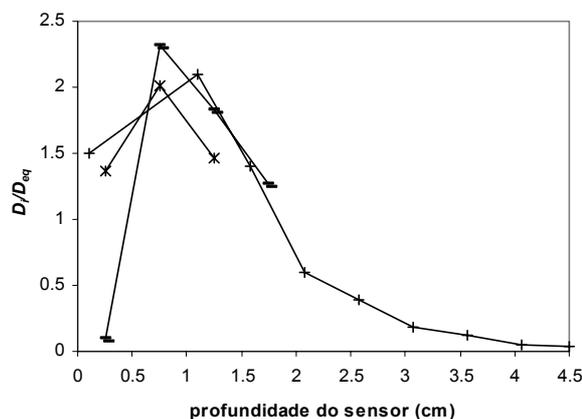


Figura IV.52 – Cálculo da razão  $D_i/D_{eq}$  para duas árvores amostradas pelo método dos impulsos de calor e para uma árvore amostrada pelo método de deformação do campo de temperaturas.

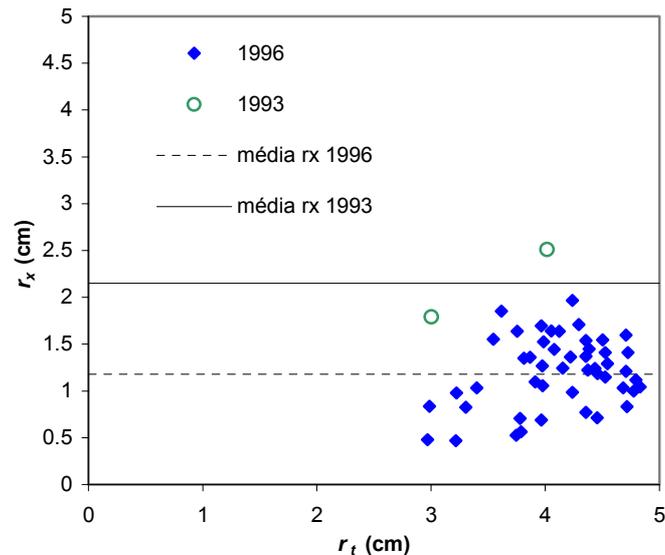


Figura IV.53 – Raio do tronco de árvores de pessegueiro (variedade *Maybelle* - Águas de Moura-Setúbal, 1993 e 1996) não considerando a casca ( $r_t$ ) e fracção do raio correspondente à área de xilema ( $r_x$ ); as árvores tinham 3 anos em 1993.

A sobreposição dos perfis obtidos pelos dois métodos de determinação do perfil radial (Figura IV.52) mostra que o pico do perfil se localiza em ambas as situações entre 0.75 e 1.25 cm de profundidade, indicando uma zona de maior passagem de fluxo situada aproximadamente entre os 0 e os 2 cm de profundidade (considerada a partir do início da zona de xilema).

Apesar de os dois métodos de determinação do perfil radial realizarem medições até diferentes profundidades, é possível detectar uma concordância aceitável entre os perfis obtidos por ambos, até à profundidade utilizada em simultâneo, na zona de maior fluxo. Desta forma, associaram-se os dois conjuntos de dados, tendo em vista encontrar uma caracterização global do perfil de distribuição radial do fluxo de seiva. Analisando em simultâneo todos os dados obtidos (Figura IV.54) e utilizando as dimensões reais das plantas (em abcissas no gráfico), foi possível estabelecer a função:

$$D_i / D_{eq} = 24.78 \cdot r_t^{1.82} e^{-2.54 \cdot r_t} \quad (IV.3)$$

( $r^2 = 0.74$ ), sendo  $r_t$  o raio do tronco [cm].

Na Tabela IV.6 são indicadas as correcções calculadas para cada amostra, de acordo com o perfil radial determinado e com o método descrito. Para as sondas com 1 cm de comprimento, o ponto de medição da temperatura situa-se a 0.5 cm, a que corresponde uma correcção, dada pela razão  $D_i/D_{eq}$  calculada pela equação IV.3, igual a 1/2.21. De igual modo, para as sondas com 2 cm de comprimento, o ponto de medição da temperatura situa-se a 1 cm, a que corresponde uma correcção igual a 1/2.19. As duas correcções são bastante

semelhantes não existindo portanto, neste caso, uma grande diferença nos resultados obtidos mediante a utilização de sondas com o comprimento de 1 ou de 2 cm.

Dado que o valor das correcções encontradas é inferior à unidade (tanto para sondas de 1 cm como para sondas de 2 cm) tal indicaria, para esta situação, uma sobrestimativa da densidade do fluxo de seiva.

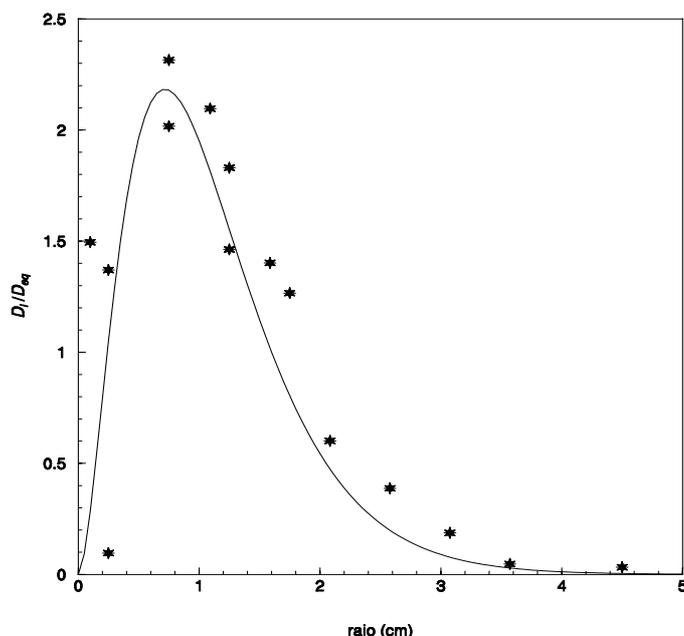


Figura IV.54 – Simulação do perfil radial de distribuição de fluxo de seiva através de medições pelo método de impulsos de calor e pelo método de deformação do campo de temperaturas; os pontos representam a densidade de fluxo de seiva afectada de um factor de normalização; a curva representa a equação de regressão estabelecida; o raio do tronco não considera a casca.

Tabela IV.6 – Correcções a utilizar no cálculo do fluxo de seiva pelo método de *Granier*, para a determinação da densidade de fluxo de seiva equivalente, obtidas através do estudo do perfil radial de distribuição de fluxo de seiva.

Ano de medições	Comprimento das sondas	Correcção utilizada
1998	1 cm	0.45
1999	2 cm	0.46

Para obter a densidade de fluxo correspondente à medição representativa (situação em que  $D_i/D_{eq} = 1$ ) é então necessário multiplicar a densidade de fluxo medida pelo valor de correcção encontrado ( $D_{eq} = D_i (1/2.21)$  ou  $D_{eq} = D_i (1/2.19)$ ). Se, para o ponto de medição da densidade de fluxo de seiva utilizado, a razão  $D_i/D_{eq}$  fosse igual à unidade, tal significaria que a medição era realizada exactamente no ponto representativo do perfil radial. A área sombreada da Figura IV.55 representa o fluxo medido nesta situação, que seria, por sua vez, igual à integração do perfil radial, ou seja, a área tracejada na Figura IV.55.

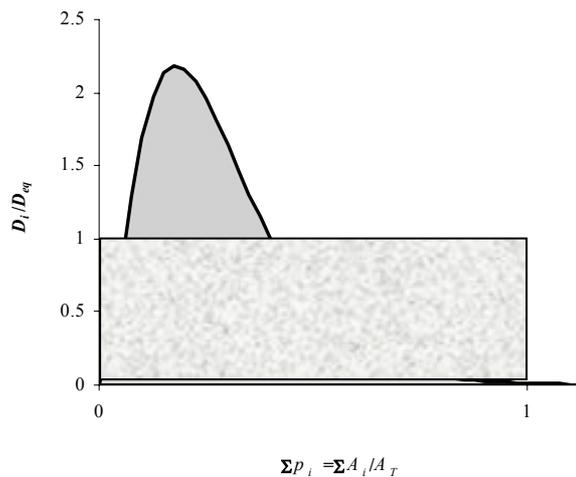


Figura IV.55 – Evolução da razão  $D_i/D_{eq}$  ao longo do raio; em esquema simplificado, a área tracejada representa o integral da densidade do fluxo, a área sombreada representa a área equivalente se a medição da densidade de fluxo de seiva for efectuada em pontos representativos (vd. Figura IV.56).

Dado o carácter pontual da medição,  $D_i/D_{eq}$  é geralmente diferente da unidade. A área que corresponde à integração do perfil radial de distribuição de fluxo de seiva e a área que representa a integração da densidade média de fluxo de seiva tenderão, em muitas situações, a ser distintas, ao contrário da situação esquematizada na Figura IV.55. A aplicação das correcções determinadas para cada tipo de sondas implica uma diminuição do fluxo estimado, dado que o ponto de amostragem utilizado se situou sempre na zona de maior fluxo.

A utilização do perfil simulado e da função associada permite ainda prever que, para não ser necessário efectuar qualquer correcção, o ponto de medição da densidade de fluxo teria que corresponder a uma profundidade de cerca de 0.22 ou 1.68 cm (Figura IV.56). Nestas condições,  $D_i/D_{eq}$  assume um valor unitário, ou seja, como referido anteriormente, a densidade de fluxo medida é exactamente igual à densidade de fluxo representativa. Os sensores a utilizar, dentro dos pressupostos considerados, teriam um comprimento ideal de cerca de 0.44 ou 3.36 cm, respectivamente, dado que a medição se efectua no ponto médio da sonda.

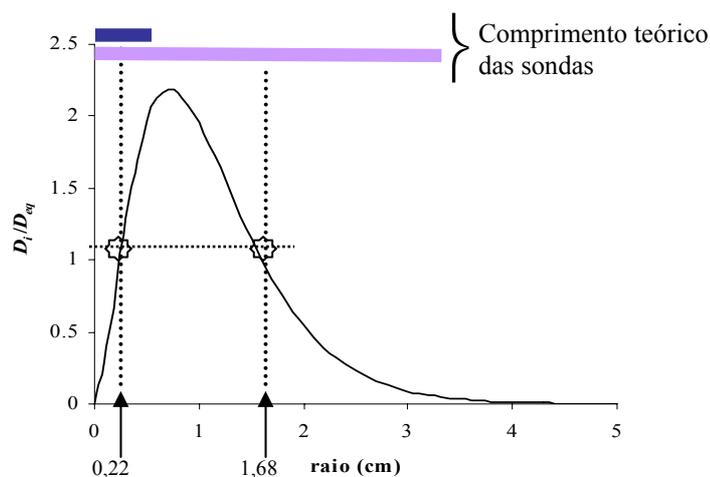


Figura IV.56 – Comprimento teórico das sondas de medição de fluxo de seiva, para que a medição pudesse ser realizada num ponto representativo (a 0.22 ou 1.68 cm de profundidade no xilema);  $\odot$  assinala os pontos de medição representativos.

#### IV.4.4. Estimativa da transpiração para o coberto vegetal

Para conhecer a transpiração do coberto vegetal, é necessário usar a informação obtida à escala da planta e passar à escala da população amostrada, ou seja, é necessário realizar o, assim chamado, *upscaling* (vd. IV.4.3). A estimativa do fluxo total de transpiração do coberto, mediante a utilização do método de *Granier*, como proposto pelo seu autor, pressupõe o conhecimento da área total de xilema condutor desse coberto. O fluxo de seiva do coberto ( $F_T$ ) [ $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ] é dado por:

$$F_T = \bar{u} A' \quad (\text{IV.4})$$

em que  $\bar{u}$  é a densidade média de fluxo de seiva na parcela e  $A'$  é a área de xilema condutor por unidade de superfície da parcela. De acordo com os resultados obtidos em IV.4.3.2.1, a área de xilema condutor individual, determinada a partir da utilização de corantes, apresentou uma boa correlação com as dimensões do tronco (Figura IV.57) e poder-se-ia utilizar esta relação para estimar a área de xilema activo na parcela. No entanto, utilizou-se uma abordagem diferente já que a forma de cálculo de  $D_{eq}$  (vd. equação IV.2 e Figura IV.55) tem a vantagem de implicar matematicamente a consideração da área total ( $A_T$ ), como a equação IV.5 sugere.  $A_T$  foi medida em todas as árvores (vd. III.1.1 e Figura III.5).

Em resumo, o procedimento adoptado para o cálculo do fluxo de seiva à escala da parcela (vd. IV.4.3.2.2 e equação IV.2), utilizando o conhecimento do perfil radial de distribuição, permite reescrever a equação IV.4 na seguinte forma:

$$F_T = \overline{D_{eq}} \sum_{i=1}^n A_{T_i} \quad (\text{IV.5})$$

representando  $F_T$  o fluxo de seiva do coberto,  $\overline{D_{eq}}$  a densidade de fluxo de seiva equivalente média do coberto,  $A_{T_i}$  a área da secção transversal do tronco da árvore  $i$  e  $n$  o número de árvores da parcela.

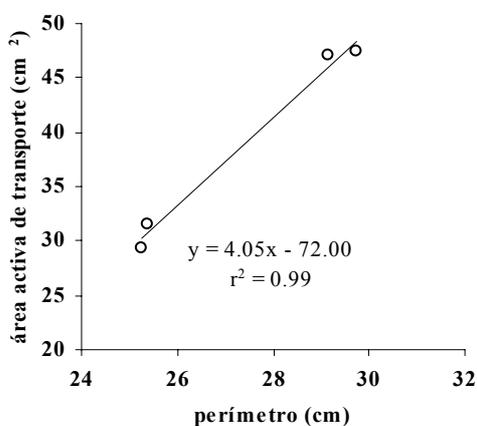


Figura IV.57 – Relação da área activa de transporte de seiva (determinada com corantes) com as dimensões do tronco.

Se a amostra considerada não for representativa do coberto no que concerne à densidade de fluxo de seiva, será necessário analisar qual o impacto no cálculo da transpiração do coberto e proceder aos necessários ajustamentos. Para estudar a representatividade das amostras utilizadas, procedeu-se à análise da variabilidade da densidade de fluxo de seiva em função do  $LAI^{10}$  (Figura IV.58) e do diâmetro do tronco (Figura IV.59). Em ambos os casos não há efeito notório das dimensões da árvore (expressas quer pelo  $LAI$ , quer pelo diâmetro do tronco) na densidade de fluxo. Em consequência, mesmo na eventualidade de falta de representatividade das árvores escolhidas em 1999, considerou-se não haver impacto na transpiração calculada. De qualquer forma, esta questão é habitualmente difícil de estudar porque existe uma grande variabilidade azimutal e a medição pontual não é necessariamente representativa da árvore.

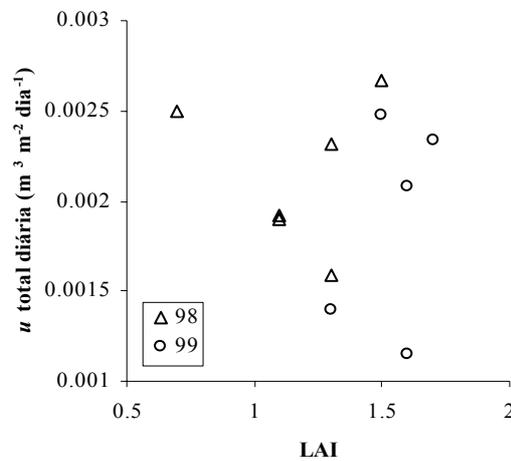


Figura IV.58 – Relação entre a densidade de fluxo de seiva ( $u$ ) total diária de cada árvore e o  $LAI$ ;  $u$  calculada para períodos de dias de céu limpo: 190-197/1998 e 208-215/1999.

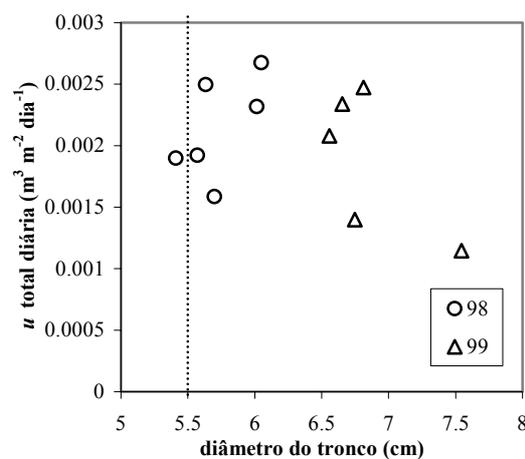


Figura IV.59 – Relação entre a densidade de fluxo de seiva ( $u$ ) total diária de cada árvore e o diâmetro do tronco;  $u$  calculada para períodos de dias de céu limpo: 190-197/1998 e 208-215/1999; a linha tracejada indica o diâmetro médio do tronco determinado para a parcela em 1998.

<sup>10</sup> Apesar de serem valores de área foliar das árvores individuais, foi reportado à unidade de área de solo correspondente.

Na Figura IV.60 mostra-se um exemplo, para um dia representativo dos períodos estudados, dos resultados das medições de fluxo de seiva com o método de *Granier*, para árvores individuais, evidenciando a variabilidade existente.

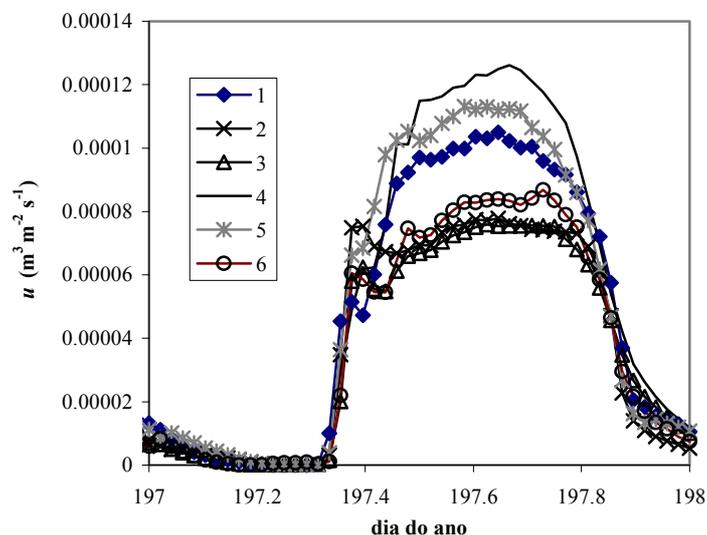


Figura IV.60 – Resultados da medição do fluxo de seiva em árvores individuais (método de *Granier*); exemplo para o dia do ano 197 em 1998; os números referem a identificação das árvores.

A Figura IV.61 apresenta um exemplo da evolução horária da transpiração, medida pelo método de *Granier*, ao longo de um ciclo de *stress* hídrico (2º ciclo realizado em 1998), numa parcela regada e numa parcela em que foi interrompida a rega. A última rega, anterior à indução do défice hídrico, decorreu no dia 190 à noite. A rega foi retomada no dia 200. No período considerado (dia do ano 187 a dia do ano 203, a maioria dos quais apresentou condições de céu limpo – Figura IV.61 (b)), o fluxo máximo (0.039 mm/h) ocorreu no dia 198, nas plantas regadas (Figura IV.61 (a)). Simultaneamente, verificou-se o valor de *VPD* mais elevado para o período em causa (5.2 kPa), (Figura IV.61 (c)). A partir do dia 194 é evidente a redução acentuada da transpiração nas plantas submetidas a défice hídrico. A partir do dia 196, observa-se, durante a manhã, o aparecimento de um pico na transpiração, seguido de imediato por um decréscimo acentuado do fluxo.

Nas Figuras IV.62 e IV.63 são apresentados os resultados da transpiração diária medidos ao longo dos períodos experimentais, com o método de *Granier*. A transpiração medida oscilou entre cerca de 0.04 e 0.5 mm/dia mas, como analisado posteriormente (vd. IV.5), estes resultados denotam uma subestimativa, pelo que não devem ser considerados como absolutos.

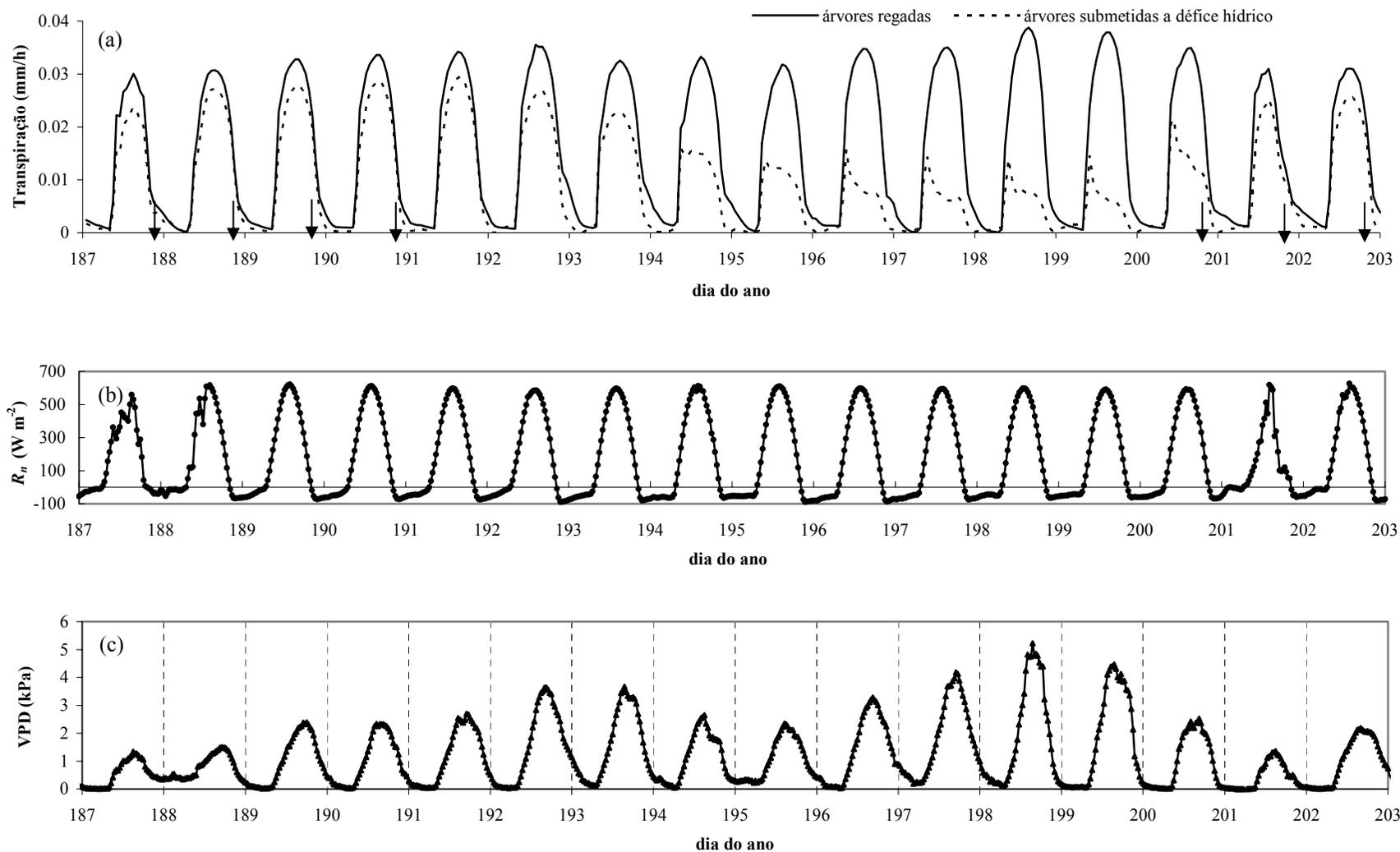


Figura IV.61 – (a) Informação qualitativa relativa à transpiração medida pelo método de *Granier* durante o 2º ciclo de *stress* hídrico realizado em 1998 (não normalizada, vd. explicação de normalização em IV.6.4), (b) balanço da radiação, (c) déficit da pressão de vapor do ar; as setas indicam a ocorrência de rega na parcela submetida a *stress* hídrico.

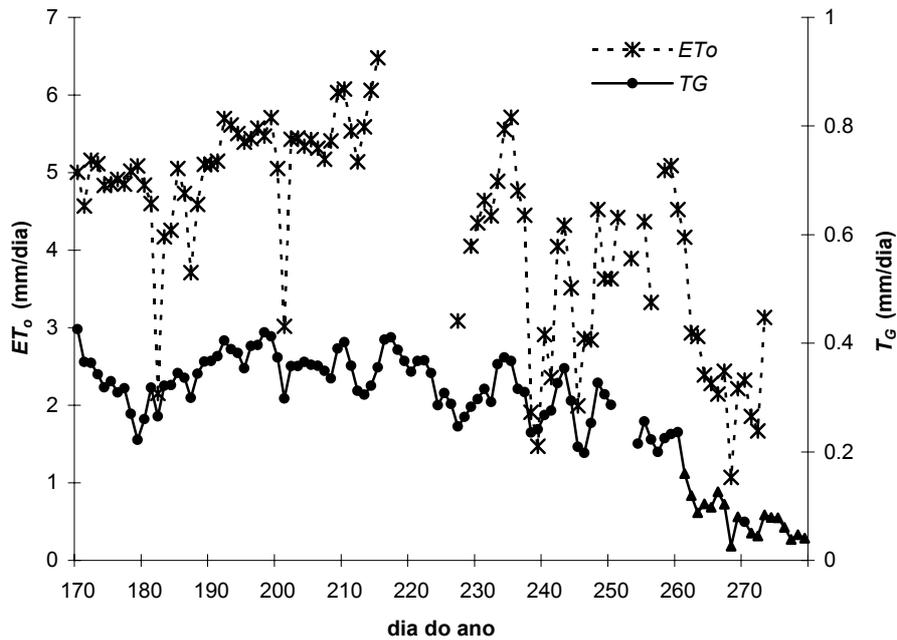


Figura IV.62 – Transpiração medida pelo método de *Granier*; os pontos assinalados com triângulos (a partir do dia 261) indicam dias em que não foi possível utilizar uma correção para o efeito dos gradientes naturais de temperatura; 1998. Analisar apenas evolução qualitativa (vd. IV.5).

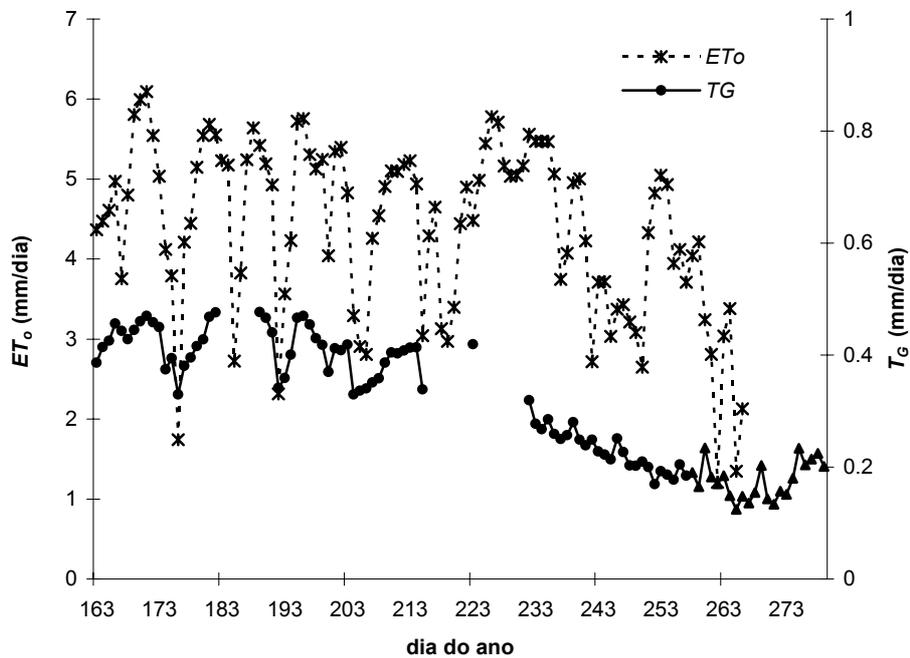


Figura IV.63 – Transpiração medida pelo método de *Granier*; os pontos assinalados com triângulos (a partir do dia 261) indicam dias em que não foi possível utilizar uma correção para o efeito dos gradientes naturais de temperatura; 1999. Analisar apenas evolução qualitativa (vd. IV.5).

## IV.5. Comparação das metodologias utilizadas para a medição da evapotranspiração

### IV.5.1. Transpiração medida pelo método do balanço de calor vs. $ET$ medida pelo método das flutuações instantâneas

Quando se compara a transpiração obtida pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ) (vd. Figura IV.65) com a medida pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}-E_s$ , em que  $E_s$  é a evaporação do solo, estimada de acordo com os modelos A e B desenvolvidos em IV.3, Figuras IV.33 e IV.34, respectivamente), para períodos diários, assiste-se a uma ligeira subestimativa do método do balanço de calor (Figura IV.64) que se acentua para valores mais elevados. Existe também um valor máximo de  $T_{bc}$ , de cerca de 1.8 mm/dia, a partir do qual  $ET_{ec}-E_s$  continua a aumentar. Para valores de  $T_{bc}$  entre 1.5 e 1.8 mm/dia, verifica-se uma maior variação de  $ET_{ec}-E_s$ , entre 2 e 2.7 mm/dia, existindo uma certa dispersão nesta zona de valores. Foi possível estabelecer a seguinte correlação entre  $ET_{ec}-E_s$  e  $T_{bc}$  (Figura IV.64):

$$ET_{ec} - E_s = 1 / (0.10 + 1.71e^{-T_{bc}}) \quad (IV.7)$$

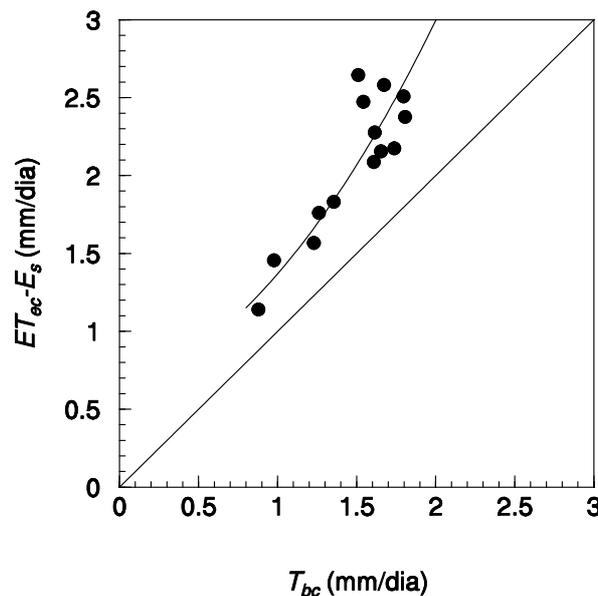


Figura IV.64 – Relação entre a transpiração obtida pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ) e a transpiração estimada pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}-E_s$ );  $ET_{ec} - E_s = 1 / (0.10 + 1.71e^{-T_{bc}})$  ( $r^2 = 0.88$ ).

Observando a evolução dos fluxos horários (Figura IV.65) é possível verificar que a subestimativa do método do balanço de calor ocorre sobretudo durante o meio do dia. Este efeito tem sido observado por outros autores que utilizaram o método do balanço de calor. À escala horária, diversos trabalhos (Baker e Nieber, 1989; Cohen *et al.*, 1993; Weibel e de Vos, 1994; Khan e Ong, 1995; Tarara e Ferguson, 2001) documentam a existência de um limiar (que varia entre 0.06 e 1.0  $dm^3 h^{-1}$ ), a partir do qual o método do balanço de calor subestimou

a transpiração quando comparado com medições gravimétricas (Tabela IV.7). Para o pessegueiro, na Atalaia (Montijo), este limiar verifica-se a partir de fluxos aproximadamente iguais a  $1.2 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$  (vd. Figura IV.65).

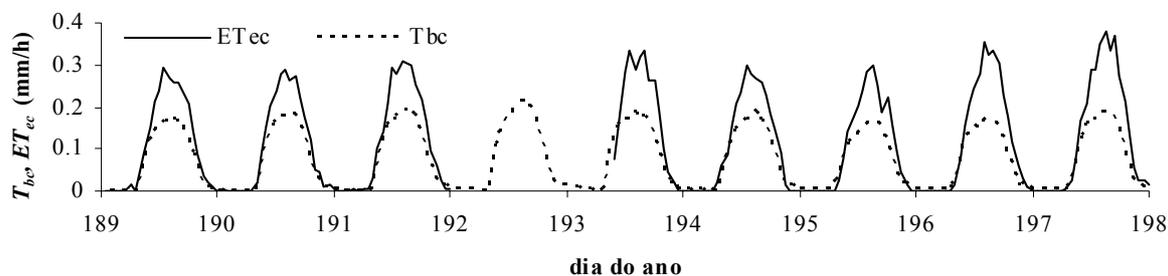


Figura IV.65 – Medição da  $ET_{ec}$  e da  $T_{bc}$  ao longo do dia para os dias do ano 189 a 197, em 1998.

Tabela IV.7 - Comparação entre a transpiração obtida pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ) e por medição gravimétrica, ao longo do dia, em situação de subestimativa de  $T_{bc}$ .

Espécie	Limiar a partir do qual se verifica subestimativa de $T_{bc}$ ( $\text{dm}^3 \text{ h}^{-1}$ )	Valor máximo de $T_{bc}$ observado ( $\text{dm}^3 \text{ h}^{-1}$ )	Referência
<i>Glycine Max</i>	0.07	0.10	Cohen <i>et al.</i> (1993)
<i>Malus domestica</i> var. <i>Red Elstar</i> e <i>Jonagold</i>	0.06	0.12	Weibel e de Vos (1994)
<i>Grevillea robusta</i>	-	0.08	Khan e Ong (1995)
<i>Vitis labrusca</i> var. <i>Concord</i>	1.0	2.7	Tarara e Ferguson (2001)

À escala diária, apenas se encontrou informação sobre este assunto para a cultura da soja, em que Cohen *et al.* (1993) apresentam dados em que se verifica a formação de um limiar, embora menos pronunciado do que o encontrado nos dados obtidos na Atalaia, Montijo (Tabela IV.8).

Tabela IV.8 Comparação entre a transpiração diária obtida pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ) e por medição gravimétrica, em situação de subestimativa de  $T_{bc}$ .

Espécie	Limiar a partir do qual se verifica subestimativa de $T_{bc}$ ( $\text{dm}^3/\text{dia}$ )	Valor máximo de $T_{bc}$ observado ( $\text{dm}^3/\text{dia}$ )	Referência
<i>Glycine max</i>	0.5	0.8	Cohen <i>et al.</i> (1993)

Noutros estudos (p. ex., Valancogne e Nasr, 1989; Valancogne e Nasr, 1993), o método do balanço de calor produziu estimativas mais precisas da transpiração, nomeadamente para o caso do pessegueiro (Ferreira *et al.*, 1996).

Em resumo, constata-se que, no contexto deste estudo, e na gama de valores encontrada, existe uma subestimativa da transpiração diária medida pelo método do balanço

de calor de cerca de 30%, em média, em relação aos resultados obtidos com o método das flutuações instantâneas. Esta subestimativa acentua-se para valores elevados de transpiração, notando-se a formação de um valor limiar, a partir do qual cessa o aumento de  $T_{bc}$  (o mesmo não acontecendo com  $ET_{ec}-E_s$ ), tendo este comportamento sido observado por outros autores, como referido nos parágrafos anteriores. Para a evolução horária da transpiração, é possível verificar que, é sobretudo durante o meio do dia e a partir de determinado valor limiar (cerca de  $1.2 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$ ), que  $T_{bc}$  não acompanha o aumento de  $ET_{ec}$ .

#### IV.5.2. Transpiração medida pelo método de *Granier* e pelo método do balanço de calor

Os resultados obtidos para a transpiração, através da medição do fluxo de seiva com o método de *Granier* e com o método do balanço de calor, foram comparados para o período entre o dia do ano 171 a 202, em 1998. A Figura IV.66 mostra a evolução semi-horária da transpiração durante alguns dias deste período, evidenciando uma acentuada subestimativa nas medições com o método de *Granier* em relação às medições efectuadas com o método do balanço de calor. Idêntica situação, embora não tão pronunciada, foi encontrada por Rojas (2003) em citrinos.

Comparando a transpiração diária obtida pelo método do balanço de calor e pelo método de *Granier* (Figura IV.67), é possível observar que a correlação entre  $T_{bc}$  e  $T_G$  é excelente. Como na Figura IV.66, também aqui é visível a importante subestimativa com o método de *Granier*. Em média,  $T_G$  é cerca de 78% inferior a  $T_{bc}$ . A relação entre  $T_{bc}$  e  $T_G$  não é linear, indicando, sobretudo para valores elevados de fluxo, o acentuar da subestimativa.

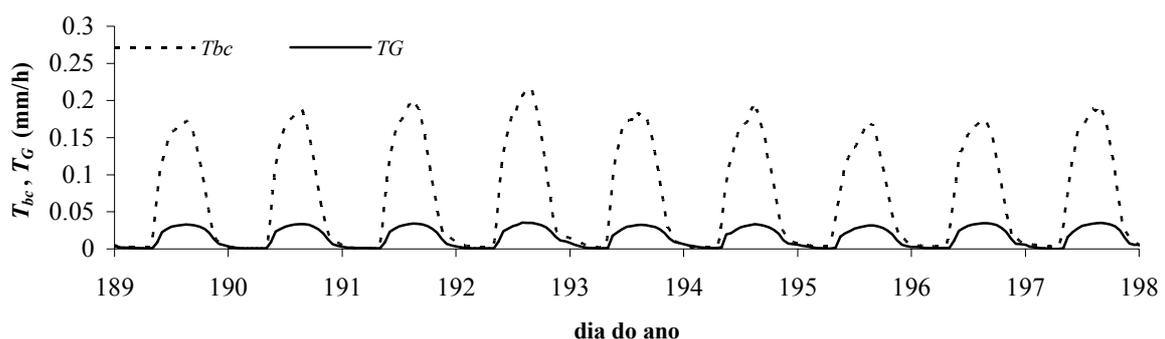


Figura IV.66 – Medição da transpiração ao longo do dia pelo método de *Granier* ( $T_G$ ) e pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ), para os dias do ano 189 a 197, em 1998.

O método de *Granier* e o método do balanço de calor foram anteriormente utilizados simultaneamente, para a medição da transpiração em pomar de pessegueiro, por Ferreira *et al.* (1997a), que constataram também uma subestimativa por parte do método de *Granier*. Esta

subestimativa era de cerca de 38%, em média, logo menos importante do que no presente estudo.

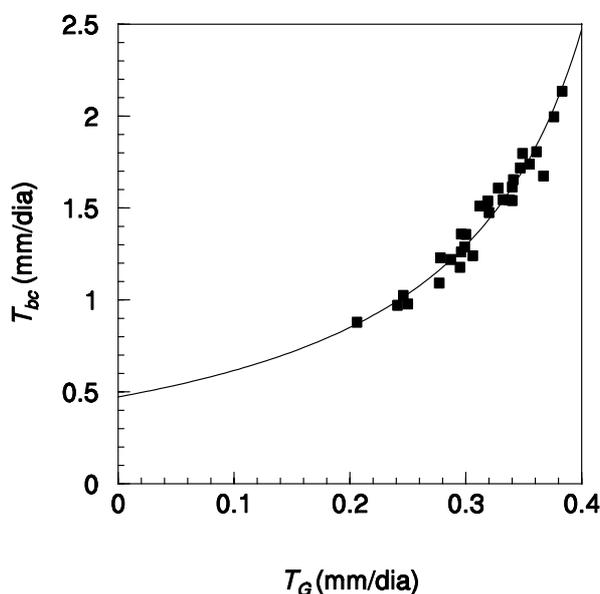


Figura IV.67 – Relação entre a transpiração obtida pelo método de *Granier* ( $T_G$ ) corrigida utilizando o perfil radial de distribuição e a transpiração obtida pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ );  $T_{bc} = 1/(-3.08 + 5.20 e^{-T_G})$  ( $r^2 = 0.95$ ).

Utilizou-se a informação obtida sobre a área de xilema activo, determinada pela utilização de corantes (64% da área total da secção) para calcular o fluxo de transpiração ( $T_{G_x}$ ) a partir das medições de fluxo de seiva com o método de *Granier*, de acordo com o procedimento clássico do método. Os resultados obtidos foram comparados com a transpiração obtida a partir das mesmas medições de fluxo de seiva, considerando o perfil radial de distribuição (vd. IV.4.3.2.2). A Figura IV.68 mostra um exemplo dessa comparação, para o período entre o dia do ano 189 e o dia do ano 197, em 1998.

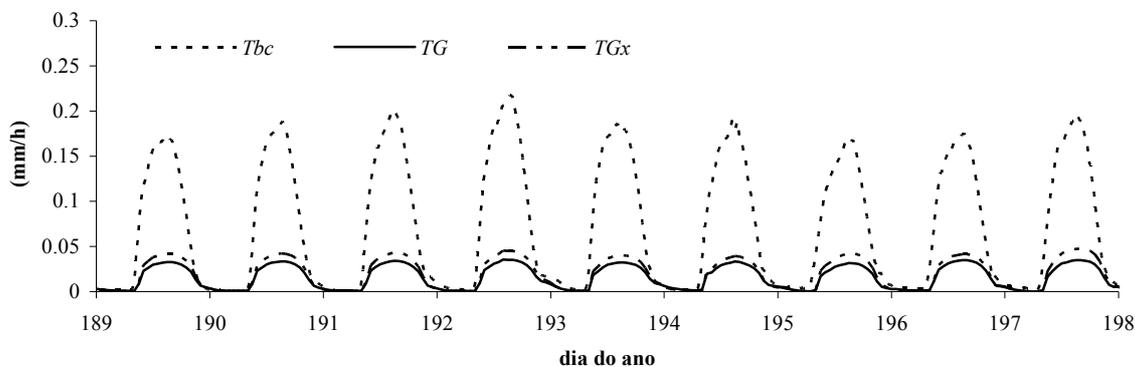


Figura IV.68 – Evolução da transpiração obtida pelo método de *Granier* -  $T_G$  (cálculo a partir do conhecimento do perfil radial) e  $T_{G_x}$  (cálculo com a área de xilema activo determinada pela utilização de corantes) - e pelo método do balanço de calor -  $T_{bc}$ , 1998.

A utilização do perfil radial de distribuição de fluxo de seiva no processo de cálculo da transpiração, levou a uma maior subestimativa, em relação aos resultados que utilizam a área de xilema, determinada mediante a utilização de corantes. A consideração do perfil radial não permitiu portanto explicar e solucionar o problema de subestimativa da transpiração, encontrado para o método de *Granier*, neste caso.

Relativamente à transpiração relativa (*TR*), a Figura IV.69 apresenta uma comparação entre os valores obtidos pelo método do balanço de calor e pelo método de *Granier*, durante a realização de um ciclo de *stress* hídrico. Entre o dia 171 e o dia 180 (Figura IV.69), a quantidade de água aplicada pela rega não permitiu que as plantas atingissem uma situação de conforto hídrico, quer pela aplicação de dotações reduzidas (vd. Figura III.6), quer pela ausência de rega (como se pode constatar pela observação das medições do potencial de base - Figura IV.75(a)). A partir do dia 191, iniciou-se um ciclo de *stress* hídrico, tendo sido retomada a rega no dia 200 à noite.

Quando se submete uma das amostras a *stress* hídrico, o método do balanço de calor indica uma transpiração relativa mais baixa, o que se explica tendo em conta a subestimativa do método de *Granier* para valores de fluxo elevados. Em situação de *stress* hídrico, a transpiração das plantas é mais reduzida, deixando de ser tão notória a subestimativa com o método de *Granier*. Quando se efectua o cálculo da *TR*, durante períodos de *stress* hídrico, a transpiração diária medida pelo método de *Granier* para plantas submetidas a *stress*, representa então uma fracção menor da transpiração de plantas bem regadas, em comparação com os resultados obtidos pelo método do balanço de calor.

Face a estes resultados, optou-se pela utilização dos resultados obtidos com o método do balanço de calor para o cálculo da *TR*. Dado que este método foi utilizado para a medição da transpiração durante o 2º ciclo de *stress* hídrico realizado em 1998, os resultados referentes à *TR*, apresentados posteriormente neste trabalho, dizem respeito a esse período.

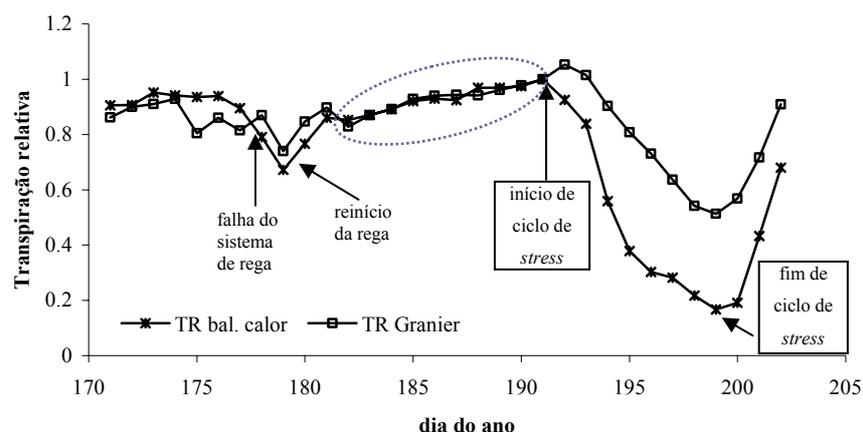


Figura IV.69 – Transpiração relativa normalizada calculada pelo método do balanço de calor e pelo método de *Granier*; a linha tracejada indica os dias em que todas as plantas amostradas se encontravam em conforto hídrico.

### IV.5.3. Transpiração medida pelo método de *Granier* vs. *ET* medida pelo método das flutuações instantâneas

Quando se comparam as medições de *ET* obtidas pelo método das flutuações instantâneas e as medições obtidas pelo método de *Granier*, à escala de tempo horária, verifica-se a existência de um subestimativa acentuada, por parte deste último método (Figura IV.70). Sistemáticamente,  $T_G$  apresenta uma plataforma de valores a meio do dia, que se mantém aproximadamente constantes, mas acima dos quais  $ET_{ec}$  continua a aumentar.

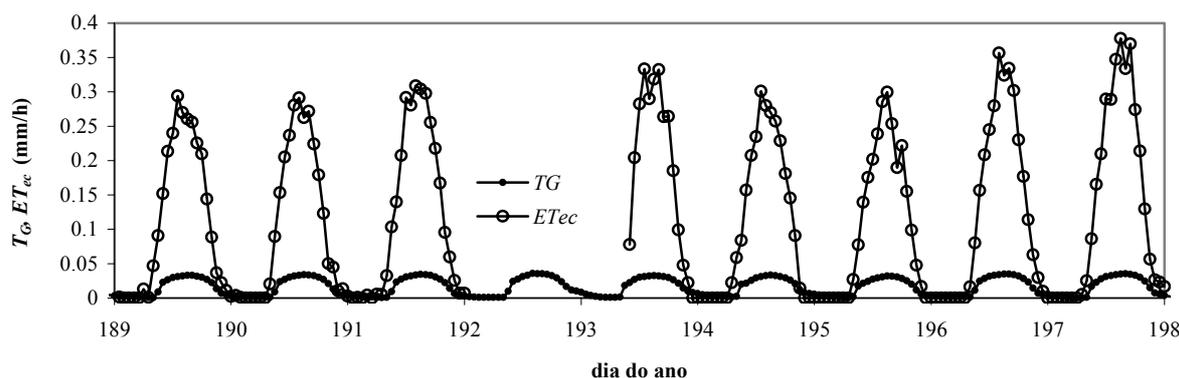


Figura IV.70 – Medição da  $ET_{ec}$  e da  $T_G$  ao longo do dia, para os dias do ano 189 a 197, em 1998.

Quando se efectua o mesmo tipo de comparação, mas com valores diários, observa-se um comportamento semelhante no que diz respeito aos valores mais elevados, existindo um máximo de  $T_G$  (cerca de 0,37 mm/dia) a partir do qual a  $ET_{ec}$  continua a aumentar (Figura IV.71 (a)). Este efeito não é originado pela não consideração de  $E_s$  nos cálculos, observando-se uma evolução muito semelhante quando aquela é considerada ( $E_s$  estimada de acordo com o processo descrito em IV.3), como apresentado na Figura IV.71 (b).

Verifica-se uma certa dispersão na zona de valores de transpiração mais elevados, em que uma reduzida gama de variação de  $T_G$ , limitada por um limiar, dá origem a uma gama de valores de  $ET_{ec}-E_s$  muito mais alargada. O mesmo tipo de comportamento pôde ser observado numa população de *Pinus pinaster* (Granier *et al.*, 1990) cuja transpiração foi avaliada pelas mesmas técnicas. Em estudos conduzidos nas zonas de Setúbal e Santarém, em vinha, têm sido obtidas idênticas conclusões em relação a este aspecto (Silvestre, 2003). A Tabela IV.9 apresenta mais alguns dados encontrados na bibliografia, referentes à comparação entre a transpiração diária obtida pelo método de *Granier* e pelo método das flutuações instantâneas.

Wilson *et al.* (2001) (Tabela IV.9) apresentam uma subestimativa sistemática da transpiração diária ao longo de todo o período de medições considerado e os seus resultados sugerem a formação de um patamar, tal como encontrado para a informação recolhida na Atalaia (Figura IV.71 (b)). Em Oren *et al.* (1998), o máximo referido para  $T_G$  é idêntico (Tabela IV.9), não se formando, no entanto, um patamar e, em Saugier *et al.* (1997), é ligeiramente inferior correspondendo a um valor máximo observado para  $ET_{ec}-E_s$  também

inferior. Note-se que os valores máximos observados para  $T_G$ , na Tabela IV.9, são relativamente mais próximos entre si que os valores observados para  $ET_{ec}-E_s$ , evidenciando o aparecimento de um patamar para  $T_G$  e a subestimativa de fluxos elevados.

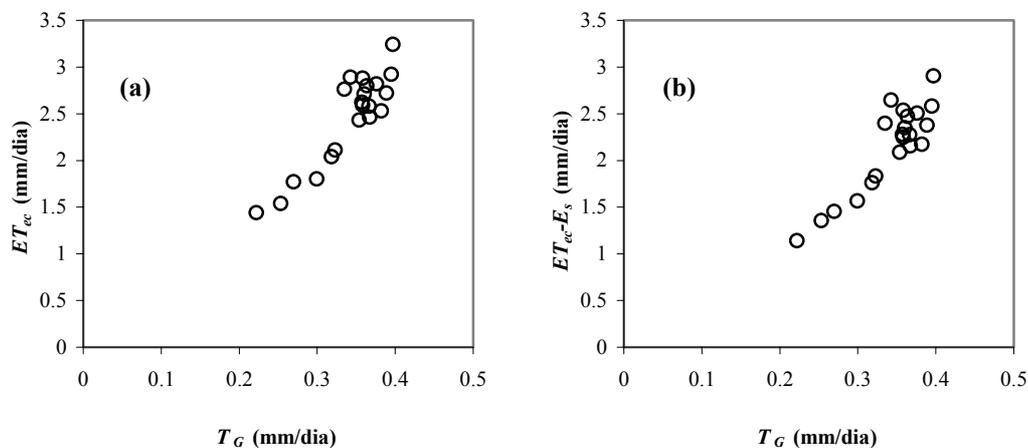


Figura IV.71 – Relação entre a transpiração obtida pelo método de Granier ( $T_G$ ) e a transpiração estimada pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}$  e  $ET_{ec}-E_s$ ) para os dias seleccionados de medições de  $ET_{ec}$  em 1998.

Tabela IV.9 – Comparação entre a transpiração diária obtida pelo método de Granier ( $T_G$ ) e pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}-E_s$ ), em situação de subestimativa de  $T_G$ .

Espécie	Valor máximo de $T_G$ observado (mm/dia)	Valor máximo de $ET_{ec}-E_s$ observado (mm/dia)	Referência
<i>Pinus banksiana</i>	1.8	2.8	Saugier <i>et al.</i> (1997)
<i>Pinus taeda</i>	2.5	3.5	Oren <i>et al.</i> (1998)
Floresta de caducifólias ( <i>Quercus</i> spp., <i>Acer</i> spp., ...)	2.5	5	Wilson <i>et al.</i> (2001)

No que diz respeito às medições realizadas ao longo do dia, alguns autores têm observado um comportamento idêntico quando se compara a transpiração obtida pelo método de Granier com medições gravimétricas (Tabela IV.10). Silvestre (dados não publicados) observou que, em vinha (cv. *Malvasia Bianca di Basilicata*), para fluxos superiores a  $0.12 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$ , medidos pelo método de Granier, a transpiração obtida gravimetricamente era sistematicamente mais elevada, tendo lugar a formação de um limiar para  $T_G$  (aproximadamente quando  $T_G = 0.18 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$ ). Num outro ensaio (cv. *Castelão*), os valores que encontrou foram ligeiramente superiores,  $0.15$  e  $0.20 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$ , respectivamente<sup>11</sup>.

Nas medições efectuadas em pomar de pessegueiro, no âmbito deste trabalho e considerando a distribuição espacial das plantas, é possível detectar a formação deste limiar quando  $T_G$  é igual a cerca de  $0.3 \text{ dm}^3 \text{ h}^{-1}$  (Figura IV.70). De referir que os fluxos horários

<sup>11</sup> na realidade, quando se pretende estudar as razões desta subestimativa (o que não é o objectivo deste trabalho) deve comparar-se as densidades de fluxo e não os fluxos totais.

máximos, medidos pelo método de *Granier* no âmbito deste estudo, são mais elevados que os referidos na Tabela IV.10, o que poderá ter contribuído para a acentuada subestimativa.

Tabela IV.10 – Comparação entre a transpiração obtida pelo método de *Granier* e por medição gravimétrica, ao longo do dia, em situação de subestimativa de  $T_G$ .

Espécie	Limiar a partir do qual se verifica subestimativa ( $\text{dm}^3 \text{h}^{-1}$ )	Máxima $T_G$ ( $\text{dm}^3 \text{h}^{-1}$ )	Referência
<i>Vitis vinifera</i> cv. <i>Malvasia Bianca di Basilicata</i> (área de xilema condutor = $19 \text{ cm}^2$ )	0.12	0.18	Silvestre (dados não publicados)
<i>Vitis vinifera</i> cv. <i>Castelão</i> (área de xilema condutor = $8 \text{ cm}^2$ )	0.15	0.20	Silvestre (dados não publicados)

Não obstante estes resultados, outros autores têm encontrado boa concordância entre a medição do fluxo de seiva pelo método de *Granier* e a transpiração obtida gravimetricamente: Lu e Chacko (1997) em mangueira e Lu *et al.* (2002) em bananeira. Lu e Chacko (1997) mediram valores máximos de transpiração horária de cerca de  $7$  a  $10 \text{ dm}^3 \text{h}^{-1}$  (para uma planta com uma área de xilema condutor igual a  $404 \text{ cm}^2$ ). Em bananeira, Lu *et al.* (2002) encontraram fluxos máximos de cerca de  $1 \text{ dm}^3 \text{h}^{-1}$  (para plantas com uma área de xilema condutor de cerca de  $50 \text{ cm}^2$ ).

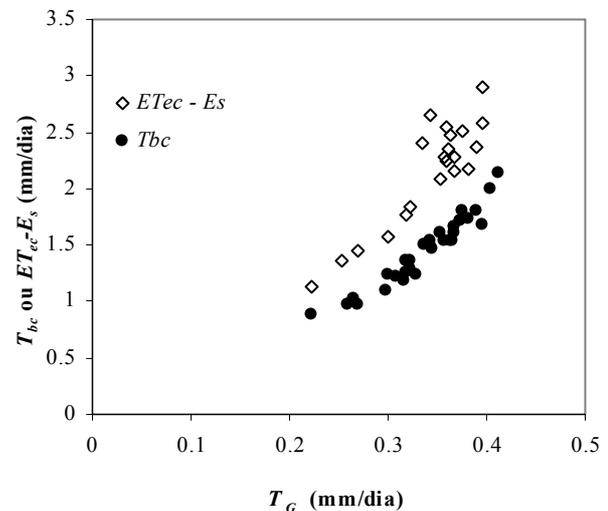
#### IV.5.4. Análise qualitativa do método de *Granier* para o pomar em estudo

Existe uma nítida correlação dos resultados obtidos tanto pelo método das flutuações instantâneas, como pelo método do balanço de calor, com os obtidos pelo método de *Granier* (Figura IV.72). No entanto, como analisado na secção anterior, este último mostra uma subestimativa muito elevada da transpiração em relação a ambos: cerca de 78%, quando comparado com o método do balanço de calor e 84 % quando se considera o método das flutuações instantâneas.

Ferreira *et al.* (1997a) apresentam resultados obtidos para a transpiração de uma outra variedade de pessegueiro em condições idênticas e utilizando simultaneamente os métodos de *Granier* e do balanço de calor, para a medição do fluxo de seiva, e o método das flutuações instantâneas para a medição da *ET*. Observaram que os valores mais baixos de transpiração foram obtidos com o método de *Granier*, os mais elevados com o método do balanço de calor e que os obtidos com o método das flutuações instantâneas se situavam entre os dois anteriores, mas mais próximos do balanço de calor. Utilizando o método das flutuações instantâneas, a transpiração foi calculada subtraindo a evaporação do solo, por sua vez estimada com base em medições locais. Para um período de nove dias de medições

simultâneas, verificaram que o método de *Granier* fornecia uma medição da transpiração correspondente, em média, a cerca de 2/3 da transpiração obtida com o método das flutuações instantâneas.

Figura IV.72 – Comparação entre a transpiração obtida pelo método do balanço de calor ( $T_{bc}$ ) e pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}-E_s$ ) com a transpiração obtida pelo método de *Granier* ( $T_G$ ).



A subestimativa encontrada no presente trabalho, com o método de *Granier*, sugere a necessidade de avaliar as condições de aplicação, nomeadamente no que diz respeito à calibração utilizada, mediante a verificação da relação empírica entre a densidade do fluxo de seiva e o índice  $k$ , função da diferença de temperatura entre sondas.

Recentemente, foi apresentada em Silva *et al.* (2002) a calibração do método de *Granier* para a cultura do cafeeiro, tendo-se obtido uma relação entre a densidade de fluxo de seiva e  $k$ , muito diferente da estabelecida primeiramente (Granier, 1985) e que foi apresentada como e parecia ser uma relação universal, independente da espécie (Granier *et al.*, 1990; Valancogne e Granier, 1997). Sobre este assunto, Smith e Allen (1996) salientam que o argumento utilizado por aqueles autores, a saber, que os parâmetros utilizados na calibração não dependem das características das árvores ou da anatomia da madeira, não se fundamenta nos princípios físicos que regem a transferência de calor. Aconselham assim a calibração do método para espécies em que nunca foi validado. A Figura IV.73 apresenta uma comparação das relações obtidas por diversos autores, entre  $k$  (ou índice de fluxo, como descrito em II.4.2.3) e a densidade de fluxo de água ( $u$ , [ $10^{-6}$  m s $^{-1}$ ]). Granier (1985) e Valancogne e Granier (1991) estabeleceram a relação  $u = 118.99 k^{1.231}$  em pseudotsuga (*Pseudotsuga menziesii*), pinheiro (*Pinus nigra*), carvalho (*Quercus pedunculata*), macieira (*Malus domestica*) e castanheiro (*Castanea sativa*). Esta calibração foi também posteriormente confirmada em três espécies arbóreas tropicais (*Eucalyptus deglupta*, *Anacardium excelsum* e *Bursera simaruba*) por Clearwater *et al.* (1999) e por Braun e Schmid (1999) em videira. Cabibel e Do (1991) referem uma calibração muito próxima desta, realizada em macieira, carvalho, castanheiro e numa fibra sintética. A relação toma, neste caso, o seguinte aspecto:  $u = 136.83 k^{1.2997}$ . Para o caso do cafeeiro (Silva *et al.*, 2002), a relação apresenta um aspecto distinto:  $u = 17.697 e^{2.4494 k}$ .

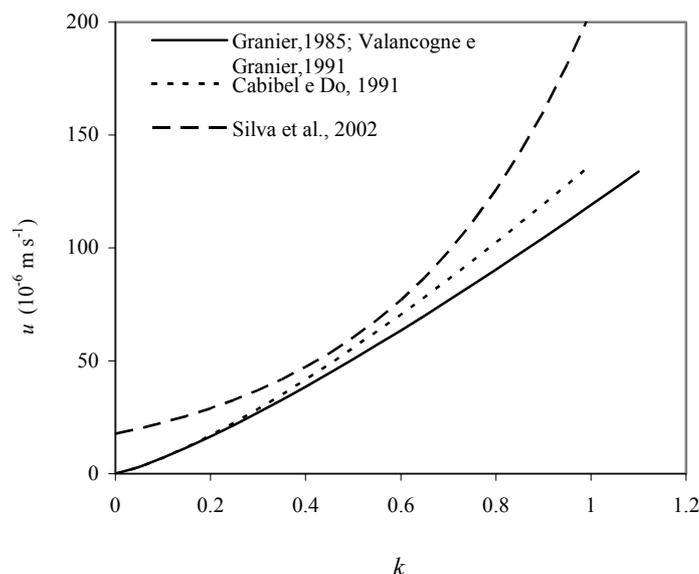


Figura IV.73 – Relação entre  $k$  (índice de fluxo) e a densidade de fluxo de água ( $u$ ) determinada por vários autores, em diversos meios.

Thomsen e Ferreira (2003) (vd. II.4.2.3 e Anexo I) desenvolveram um modelo de simulação teórico do campo de temperaturas em redor de um aquecedor linear, tendo evidenciado como a equação de calibração depende de parâmetros físicos, designadamente da condutividade térmica da madeira e como, para condutividades elevadas, os resultados se aproximam da equação teórica ( $\beta' = 1$ , vd. II.4.2.3 e equação III.7) referida por *Granier* (Granier, 1985, 1987a e b) para o cálculo da densidade de fluxo de seiva (Figura IV.74). Contudo, o modelo não permite explicar a subestimativa encontrada, verificando-se que, para um determinado índice de fluxo  $k$  determinado pelo modelo, a densidade de fluxo dada pela equação de *Granier* ( $\beta' = 1.23$ ) se aproxima mais da realidade (vd. II.4.2.3).

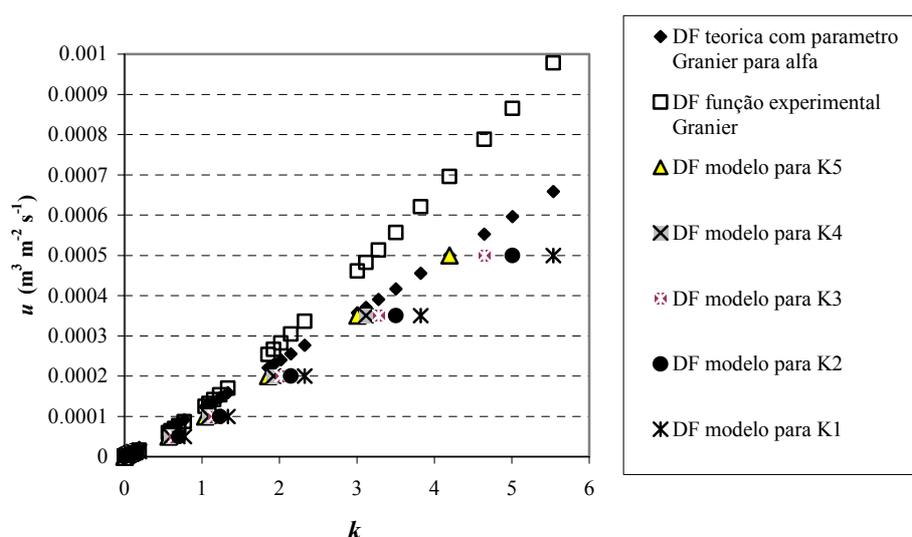


Figura IV.74 – Equação de calibração experimental (Granier, 1985, 1987a e b) e fornecida por um modelo de diferenças finitas para diferentes condutividades térmicas da madeira (K1, K2, K3, K4 e K5, sendo K5 a mais elevada); derivado de Thomsen e Ferreira (2003).

Um outro aspecto que poderá eventualmente contribuir para a obtenção de baixos valores de transpiração, poderá ser o processo de cálculo do fluxo, a partir do conhecimento da área de xilema condutor ou do conhecimento do perfil radial. Neste último caso, podemos questionar se a quantidade de informação utilizada para a simulação do perfil radial, será a suficiente para uma caracterização adequada. Pensamos que seria interessante investigar futuramente esta nova abordagem de cálculo para o método de *Granier*, recorrendo ao estudo de um maior número de perfis radiais. De qualquer forma, nunca este aspecto de per si, justificaria a subestimativa encontrada neste caso.

Existe, por outro lado, alguma incerteza sobre a área de xilema que afecta a medição, dado que apesar de a medição de temperatura se realizar pontualmente, é utilizado um tubo de alumínio preenchido com uma pasta com condução térmica elevada, para obter uma medição representativa, ao nível da área aquecida. Poderá não se verificar uma condução de calor homogénea entre a sonda e o tubo de alumínio e ao longo deste, levando à introdução de erros na medição de temperatura.

Outros factores estarão ainda relacionados com a subestimativa, tais como a disrupção dos tecidos no ponto de inserção da sonda, o que provocará certamente uma descontinuidade no fluxo, afectando o processo de convecção (transporte de calor). O necrosamento dos tecidos na zona envolvente das sondas poderá eventualmente contribuir para este processo.

Neste contexto, o método de *Granier* não pôde ser usado directamente para a obtenção de valores absolutos de transpiração. No entanto, revelou-se um método útil para a utilização na modelação da *ET* durante cada época de rega (capítulo V), dada a fácil automatização e a possibilidade de recolha de dados durante períodos longos, a um custo relativamente baixo. Face à informação obtida sobre a comparação entre métodos e por se verificar uma subestimativa no caso do método do balanço de calor, este foi utilizado apenas para análise metodológica e para o cálculo da transpiração relativa, tendo sido utilizados os resultados obtidos pelo método das flutuações instantâneas como referência para o trabalho de modelação (capítulo V).

## IV.6. Indicadores do estado hídrico da planta

### IV.6.1. Potencial hídrico foliar

Na Figura IV.75 (a), apresentam-se os resultados das medições do potencial hídrico foliar medido de madrugada ( $\Psi_b$ ) em 1998, representando a evolução média entre o dia 17 Junho (dia do ano 168) e o dia 20 de Agosto (dia do ano 232). Para as árvores regadas,  $\Psi_b$  variou em média entre -0.6 MPa e -0.1 MPa. O valor mínimo, registado no dia 180 para este grupo de plantas, surgiu em consequência do não funcionamento accidental do sistema de rega nos dias 177, 178 e 179. Uma situação semelhante ocorreu nos dias 192 e 193, provocando uma descida de  $\Psi_b$ .

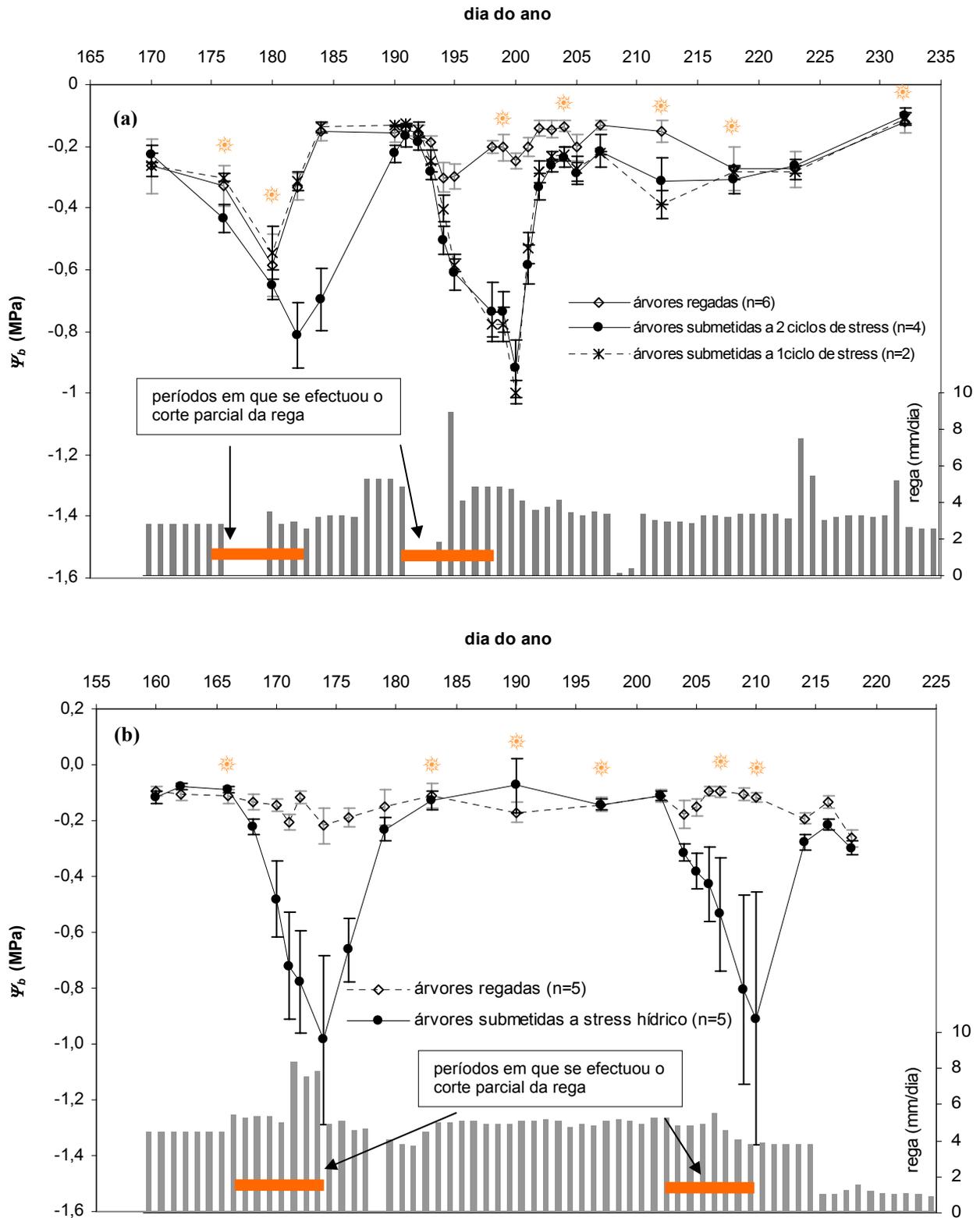


Figura IV.75 – Potencial hídrico foliar medido de madrugada ao longo da estação, média e desvio-padrão; (a) 1998 (n=12); (b) 1999 (n=10);  $\odot$  assinala os dias em que se realizaram cinéticas de potencial hídrico foliar.

Para as árvores submetidas a dois ciclos de *stress* hídrico foi atingido um mínimo igual a -0.92 MPa no fim do 2º ciclo (dia do ano 200). Um valor muito semelhante foi atingido no mesmo dia para as árvores submetidas a um ciclo (-1.0 MPa). Para o mesmo dia, e em árvores regadas,  $\Psi_b$  manteve-se em -0.2 MPa.

Durante o 2º ciclo de *stress*, o comportamento de plantas submetidas a um ciclo mostrou-se semelhante ao de plantas submetidas a dois ciclos, não sendo visível nenhum efeito do déficit hídrico anterior.

A Figura IV.75 (b) apresenta um conjunto semelhante de resultados obtidos em 1999. O valor mínimo atingido para  $\Psi_b$  foi de -1.0 MPa, no dia 23 de Junho (dia do ano 174), durante o primeiro ciclo de *stress*. Para o mesmo dia, as árvores regadas apresentaram um  $\Psi_b$  de cerca de -0.2 MPa. Durante o segundo ciclo de *stress*, o valor mínimo registado, no dia 29 Julho (dia do ano 210), foi de -0.9 MPa para as árvores não regadas enquanto que  $\Psi_b$ , para as árvores regadas, se manteve em -0.1 MPa.

Em 1999, observa-se um desvio-padrão maior do que nas situações descritas para o ano anterior, indicando uma maior variabilidade entre plantas. No final dos ciclos de *stress* hídrico, algumas plantas mantinham ainda potenciais de base elevados (cerca de -0.4 MPa) enquanto que outras apresentavam potenciais muito mais baixos (-1.4 MPa). Tal ocorrência suscita a hipótese de algumas árvores poderem ter tido condições para utilizar recursos hídricos provenientes do lençol freático.

Os resultados reportados em Tavares (1993), para um pomar em condições semelhantes assemelham-se aos resultados médios aqui descritos, para plantas regadas, embora em 1999 se tenham encontrado valores de  $\Psi_b$  um pouco mais elevados (aproximadamente entre -0.1 e -0.2 MPa).

Na Figura IV.76, apresentam-se os resultados das cinéticas diárias do potencial hídrico foliar ( $\Psi_f$ ) em sete dias de céu limpo em que todas as plantas estavam a ser regadas de acordo com o procedimento habitual no pomar (dias do ano 204, 211, 217 e 231, em 1998). A hora marcada em abcissas representa o momento médio do intervalo de tempo utilizado para cada medição. Pouco antes do nascer do sol, o potencial aproxima-se de zero, tornando-se em seguida mais negativo até atingir um valor mínimo perto do meio-dia solar ou um pouco depois desse momento. O  $\Psi_{min}$  atingiu, por vezes, valores próximos de -3 MPa, existindo no entanto uma grande variabilidade.

Os resultados obtidos para as cinéticas diárias de  $\Psi_f$  em 1998 (dias do ano 176, 180 e 198), durante o 2º ciclo de *stress* hídrico (Figura IV.77) parecem indicar que a principal diferença entre árvores sujeitas a déficit hídrico e árvores regadas consiste na ausência de recuperação do  $\Psi_f$ . Neste período, foi suspensa a rega das plantas identificadas nas figuras como “árvores submetidas a 2 ciclos de *stress*” (a última rega da parcela submetida a *stress* ocorreu no dia 174 à noite). O dia 25 de Junho (dia do ano 176) corresponde ao primeiro dia do 1º ciclo de *stress* hídrico realizado neste ano. Neste dia não se detectam ainda diferenças de comportamento entre plantas regadas e não regadas. De referir que este dia se insere num

período em que a dotação de rega era relativamente baixa (cerca de 3 mm/dia) e, provavelmente, as plantas regadas estariam a sofrer algum *stress* hídrico, o que terá também dificultado a obtenção de uma resposta mais diferenciada entre grupos de plantas. Nos dias 180 e 198, as plantas encontravam-se no 5º dia e no 7º dia, respectivamente, de diferentes ciclos de défice hídrico. Nestes dias, é possível observar um comportamento distinto entre plantas regadas e plantas sem rega, evidenciado pelo facto destas últimas não iniciaram a recuperação até ao fim do período diário de observações (entre as 18 e as 19 h). No dia 198, este comportamento é mais marcado, dado que é maior o número de dias anteriores sem rega, quando se compara com o dia 180.

O maior afastamento entre o  $\Psi_f$  de plantas regadas e de plantas sujeitas a défice hídrico ocorreu durante a tarde, dado não se ter verificado, nesse período, como analisado, o aumento dos valores de  $\Psi_f$  neste último grupo de plantas.

A Figura IV.78 apresenta uma colecção de dados referente às cinéticas diárias de  $\Psi_f$ , efectuadas em 1999, em plantas regadas de acordo com o procedimento habitual no pomar.  $\Psi_f$  assume valores mínimos próximos de -2 MPa, geralmente na proximidade do meio-dia solar, ou um pouco depois.

A Figura IV.79 apresenta as cinéticas diárias de  $\Psi_f$ , realizadas em 1999, durante um período em que se suspendeu a rega numa das amostras de plantas considerada. O dia 207 e o dia 210 correspondem ao 5º e 8º dias, respectivamente, do ciclo de *stress* hídrico (regou no dia 201 à noite pela última vez). Nestes dias, as plantas submetidas a défice hídrico apresentam um  $\Psi_f$  sempre inferior ao das plantas regadas, durante todo o dia. A diferença entre o  $\Psi_f$  dos dois grupos mostrou-se quase constante ao longo do dia, para os dias analisados, por vezes apenas com diferenças muito ligeiras, durante a tarde.

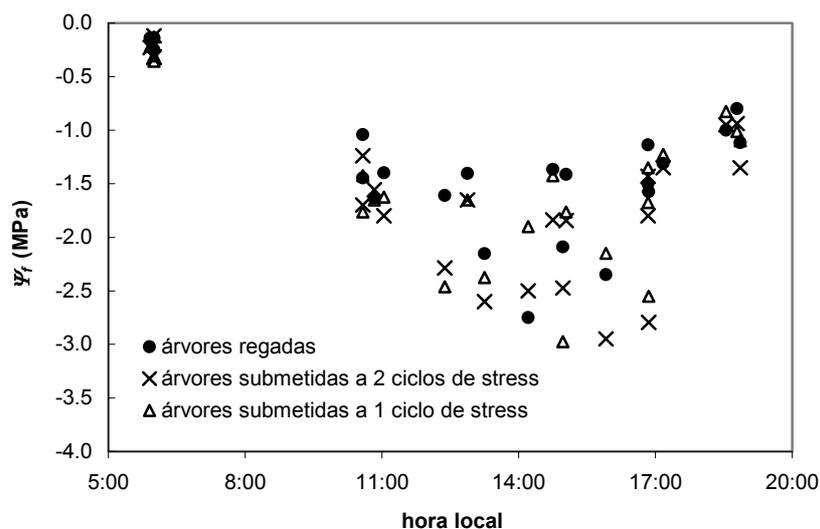


Figura IV.76 – Variação de  $\Psi_f$  ao longo do dia, em dias de céu limpo, em que todas as plantas estavam a ser regadas de acordo com o procedimento habitual no pomar (dias do ano 204, 211, 217 e 231) 1998; nos dias do ano 211, 217 e 231 o valor de  $\Psi_b$  considerado foi obtido por interpolação de medições em dias vizinhos.

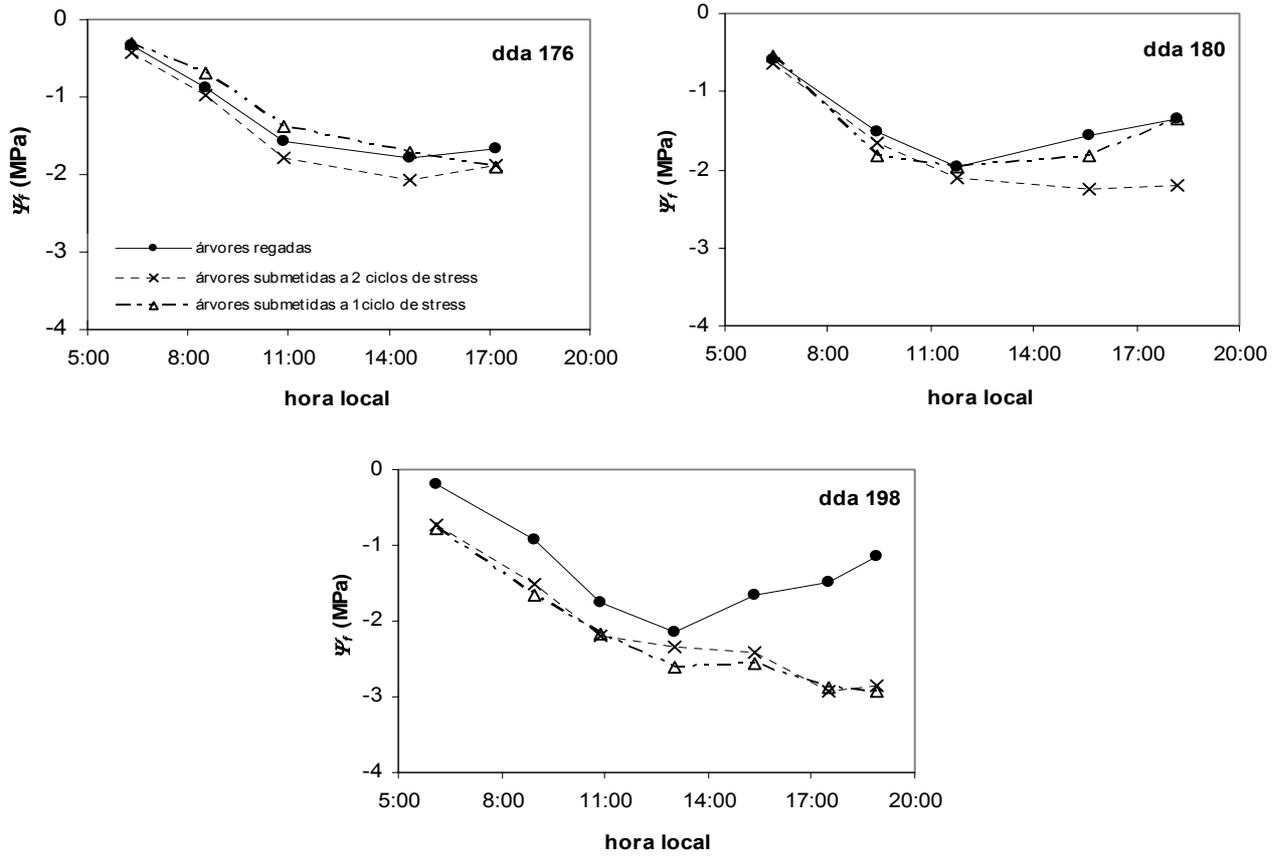


Figura IV.77 – Variação de  $\Psi_f$  ao longo do dia, em dias de céu limpo, para plantas regadas e plantas submetidas a déficit hídrico, 1998; dda = dia do ano (vd. Figura IV.75 (a) para identificação relativamente à ocorrência dos ciclos de *stress*).

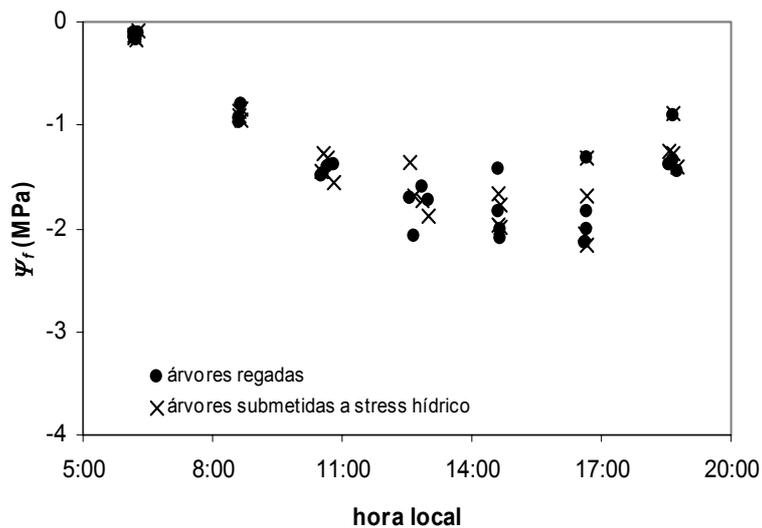


Figura IV.78 – Variação de  $\Psi_f$  ao longo do dia, em dias de céu limpo, em que todas as plantas estavam a ser regadas de acordo com o procedimento habitual no pomar (dias do ano 166, 183, 190 e 197), 1999.

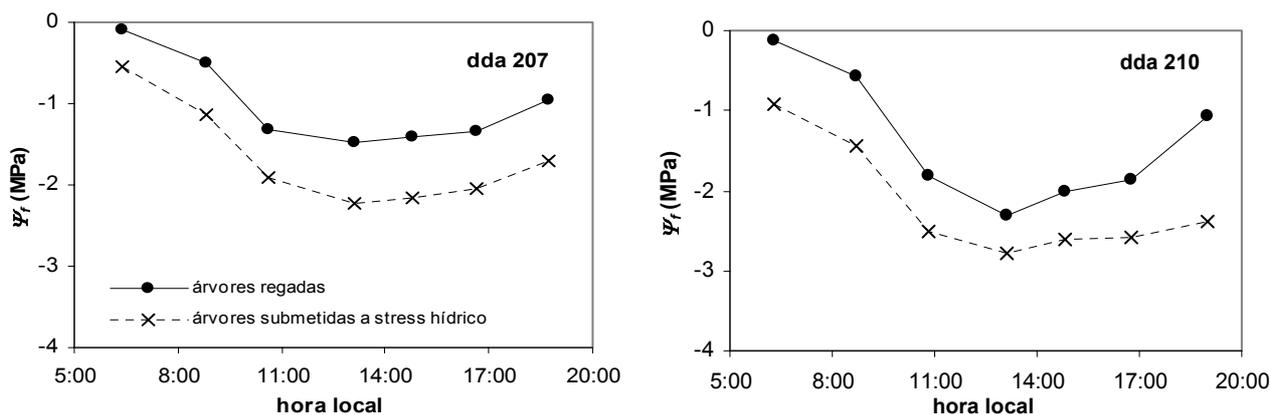


Figura IV.79 – Variação de  $\Psi_f$  ao longo do dia, em dias de céu limpo, para plantas regadas e plantas submetidas a déficit hídrico, 1999; dda = dia do ano.

Em síntese, para o conjunto de observações realizadas em condições de conforto hídrico, para todas as árvores, de acordo com o procedimento habitual no pomar, os valores de  $\Psi_{min}$  foram, regra geral, observados perto do meio-dia solar, ou pouco depois e os valores mais baixos foram próximos de -3.0 MPa. Estes valores são próximos dos reportados por Chalmers *et al.* (1983) para a mesma espécie (observaram valores mínimos de -2.5 MPa). Assemelham-se também aos descritos em Tavares (1993).

O comportamento das plantas, quando submetidas a déficit hídrico, indica tendência para um comportamento anisohídrico, embora não muito marcado, verificando-se o aparecimento de valores mínimos de  $\Psi_f$  geralmente depois do meio-dia solar. Este comportamento é idêntico ao encontrado para outras variedades desta espécie, por Ferreira (1996a).

Para a realização de medições do aqui chamado  $\Psi_{min}$  e de acordo com os resultados obtidos para as cinéticas diárias de  $\Psi_f$ , considerou-se que este ocorria durante a tarde, cerca das 14 horas (hora solar) (vd. III.8 e Figuras IV.77 e IV.79).

Na Figura IV.80, apresenta-se a evolução do potencial hídrico foliar mínimo ( $\Psi_{min}$ ), a par com a de  $\Psi_b$ . Observando os períodos em que decorreram os ciclos de *stress* hídrico, constata-se que as diferenças entre plantas em conforto hídrico e plantas submetidas a *stress* são claramente identificadas quando se analisa a variação de  $\Psi_b$ , mas menos óbvias, se a variável observada for  $\Psi_{min}$ . O  $\Psi_{min}$  de plantas regadas apresenta também uma maior instabilidade, relativamente ao  $\Psi_b$ , aproximando-se por vezes dos valores de  $\Psi_{min}$  obtidos para plantas submetidas a déficit hídrico. Consequentemente, torna-se difícil definir limites para  $\Psi_{min}$  quando se sujeitam as plantas a diferentes condições hídricas. Em 1999 (Figura IV.80 (b)), verificou-se uma diferenciação de comportamentos mais marcada durante o primeiro ciclo de *stress* hídrico. Em conclusão, no contexto deste trabalho e apesar do comportamento intermédio ou anisohídrico destas árvores, o  $\Psi_{min}$  não se revelou um indicador tão interessante como  $\Psi_b$ , para a avaliação do déficit hídrico.

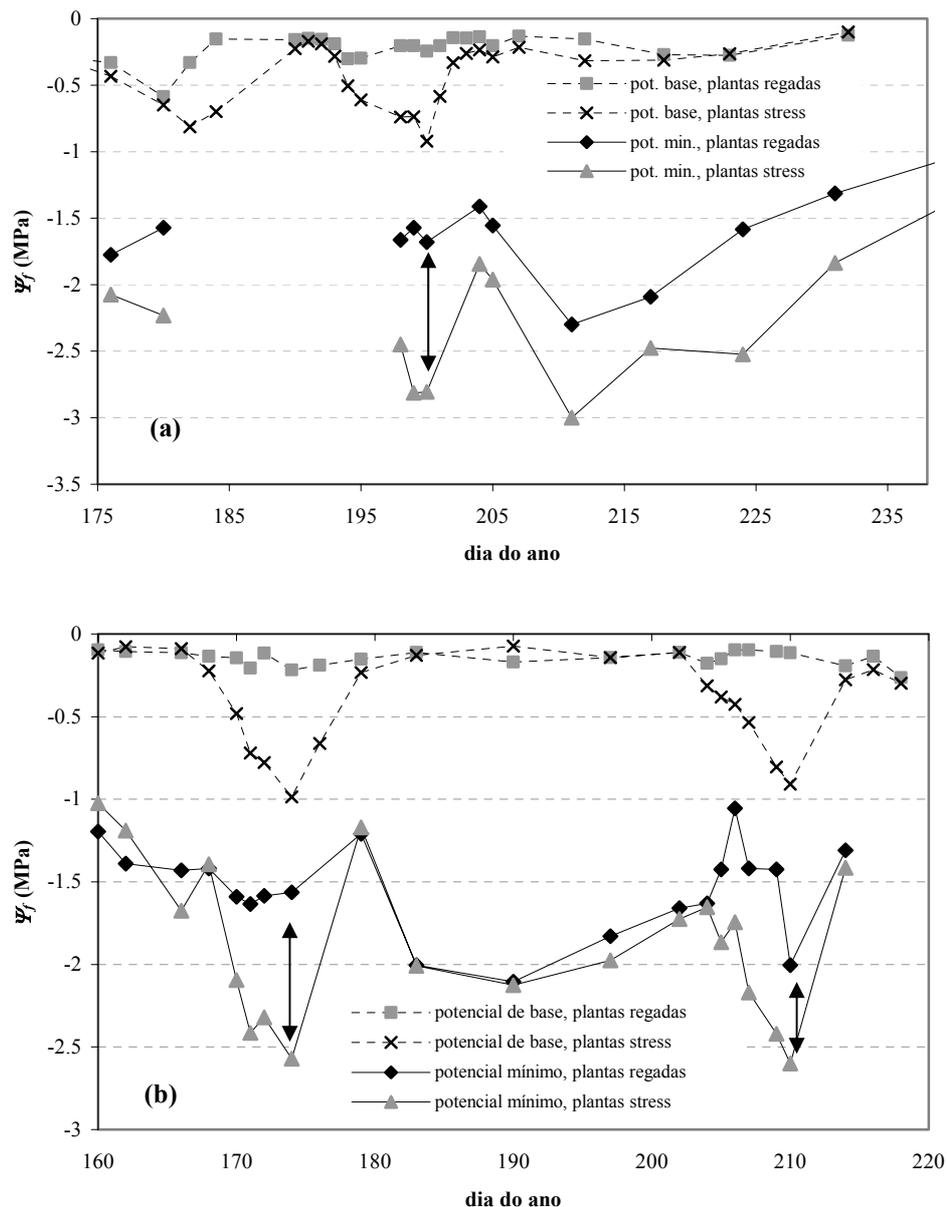


Figura IV.80 – Evolução do potencial hídrico foliar mínimo ( $\Psi_{min}$ ) e do potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ) ao longo do período de medições; (a) 1998, (b) 1999; as setas indicam o afastamento entre  $\Psi_{min}$  de plantas regadas e  $\Psi_{min}$  de plantas submetidas a déficit hídrico, no fim dos ciclos de *stress* hídrico.

#### IV.6.2. Condutância estomática

A Figura IV.81 apresenta os resultados das cinéticas diárias de condutância estomática, obtidos durante os meses de Junho, Julho e Agosto de 1998. O dia 3 de Julho (dia do ano 184) corresponde ao último dia do primeiro ciclo de *stress* hídrico realizado nesse ano. É evidente o acentuado fecho estomático deste grupo de plantas no último dia do ciclo. O dia 9 de Julho (dia do ano 190) ocorre cerca de uma semana depois do fim do primeiro ciclo de *stress*. Para todos os grupos são patentes condutâncias elevadas ao longo do dia, com

máximos compreendidos entre 0.8 e 1.4  $\text{cm s}^{-1}$ , aproximadamente. O dia 16 de Julho (dia do ano 197) corresponde ao período em que decorreu o segundo ciclo de *stress* hídrico, realizado neste ano (a última rega decorreu no dia 190 à noite). As plantas que não estavam a ser regadas apresentavam valores de  $g_s$  muito baixos, sobretudo entre as 12 e as 18 horas (hora local), em que quase atingem o valor de zero, indicando um forte fecho estomático. Neste dia, as plantas regadas apresentaram um comportamento semelhante ao encontrado habitualmente nesta espécie, em condições de conforto hídrico (vd. II.2). No dia seguinte (17 de Julho), ainda durante o ciclo de *stress*, o comportamento das plantas foi muito semelhante ao verificado no dia 16, embora os valores mínimos sejam ligeiramente mais elevados. No dia 23 de Julho (dia do ano 204), depois de ocorridas quatro regas, verificou-se que, nas plantas que não foram submetidas a *stress*, o comportamento era semelhante ao habitualmente encontrado, já descrito. Nas outras plantas, não ocorreu um fecho estomático perceptível a meio do dia, o que poderá estar relacionado com o fornecimento de uma quantidade de água adicional durante o dia, em relação à habitualmente praticada e à que estava a ser fornecida às plantas não submetidas a *stress* anteriormente. Nos restantes dias de medições (dias do ano 211, 217 e 231) a  $g_s$  seguiu os padrões de variação habitualmente encontrados para a espécie e todos os grupos de plantas tiveram um comportamento semelhante entre si.

Considerando todo o período de medições, a máxima  $g_s$  encontrada foi em média de cerca de 1.1  $\text{cm s}^{-1}$ , sendo mais elevada que a referida por outros autores para a mesma espécie (vd. II.2). Em média,  $g_s$  das plantas regadas, foi igual a 0.8  $\text{cm s}^{-1}$  no início e 0.4  $\text{cm s}^{-1}$  no fim do ciclo vegetativo, evidenciando um decréscimo na evolução sazonal.

A Figura IV.82 apresenta um conjunto idêntico de resultados obtido no ano seguinte. A cinética realizada no dia 15 de Junho (dia do ano 166) mostra que os dois grupos amostrados apresentavam condutâncias estomáticas dentro da mesma gama de valores, o mesmo acontecendo no dia 2 de Julho (dia do ano 183). O ciclo de *stress* hídrico decorrido anteriormente terminou no dia 174, verificando-se que as plantas que tinham sido submetidas a défice hídrico apresentavam novamente condutâncias estomáticas semelhantes ao grupo de plantas regadas (dia 183). Os dias 9 e 16 de Julho (dias do ano 190 e 197) correspondem a dias em que as plantas se encontravam em condições de conforto hídrico. No dia 9 de Julho, o grupo de plantas anteriormente submetido a *stress* hídrico apresentou condutâncias mais baixas, durante praticamente todo o dia, verificando-se idêntica situação durante o meio do dia 16 de Julho. A razão desta diferença prende-se com o facto de três das plantas do grupo que foi submetido a ciclos de *stress* não terem sido regadas no dia 8 de Julho à noite, devido a um deslocamento do tubo de rega. Os dias 26 e 29 de Julho correspondem respectivamente ao quinto e ao oitavo dias de um segundo ciclo de défice hídrico. Nos dois dias é possível observar uma diferença marcada entre os dois grupos de plantas, no que diz respeito a  $g_s$ , embora, como seria de esperar, mais nítida no segundo. No dia 26, a  $g_s$  das plantas submetidas a défice hídrico decresceu gradualmente ao longo do dia. No dia 29, decresceu durante a manhã, estabilizando durante a tarde, mas apresentando valores mais baixos durante quase todo o dia (entre 0.3 e 0.1  $\text{cm s}^{-1}$ , aproximadamente).

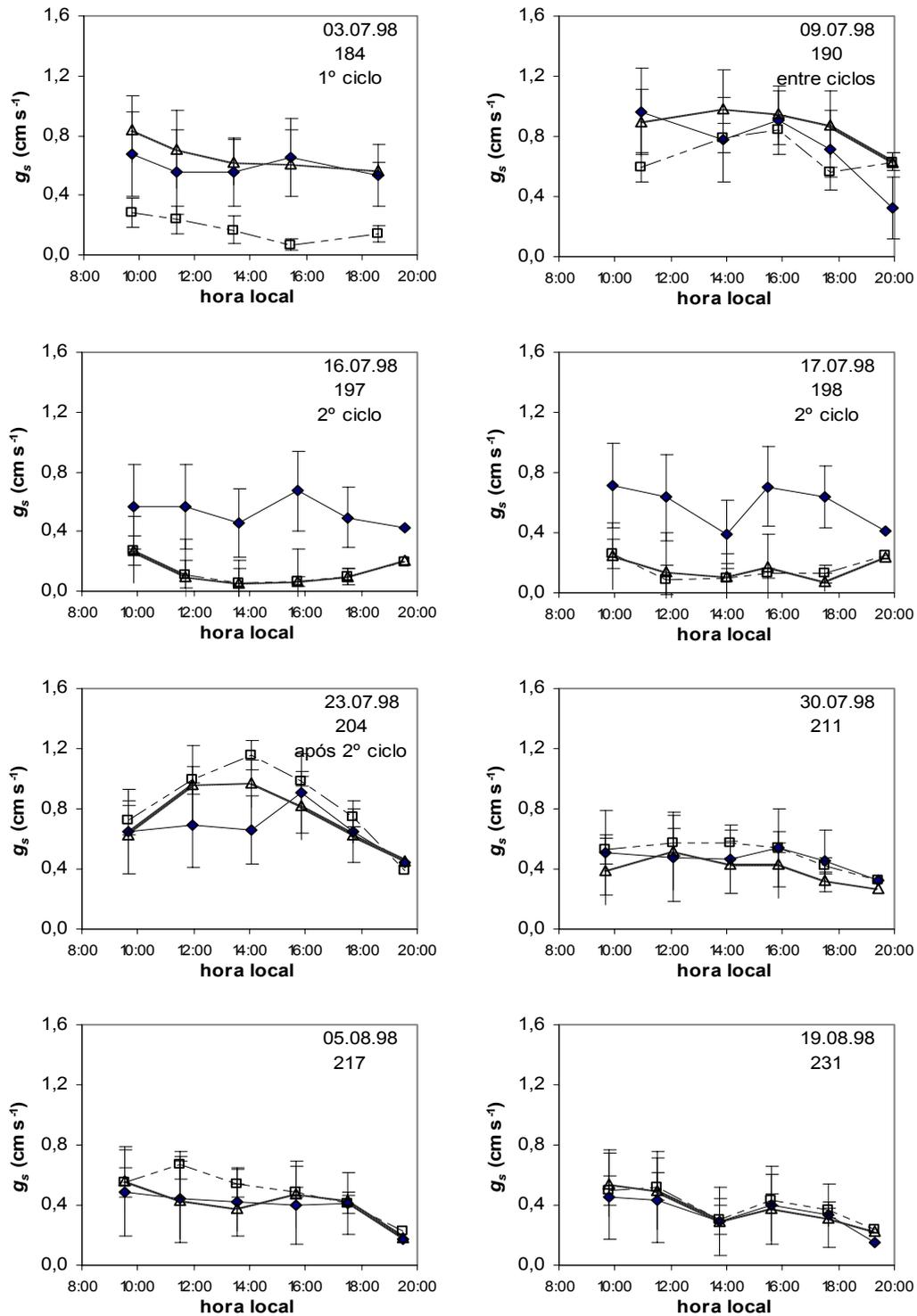


Figura IV.81 – Cinéticas diárias de condutância estomática em dias de céu limpo, excepto o dia 3 de Julho (dia do ano 184, em que se verificou alguma nebulosidade a meio do dia); média e desvio-padrão, 1998.

- ◆— árvores regadas
- - □ - - árvores submetidas a 2 ciclos de stress
- ▲— árvores submetidas a 1 ciclo de stress

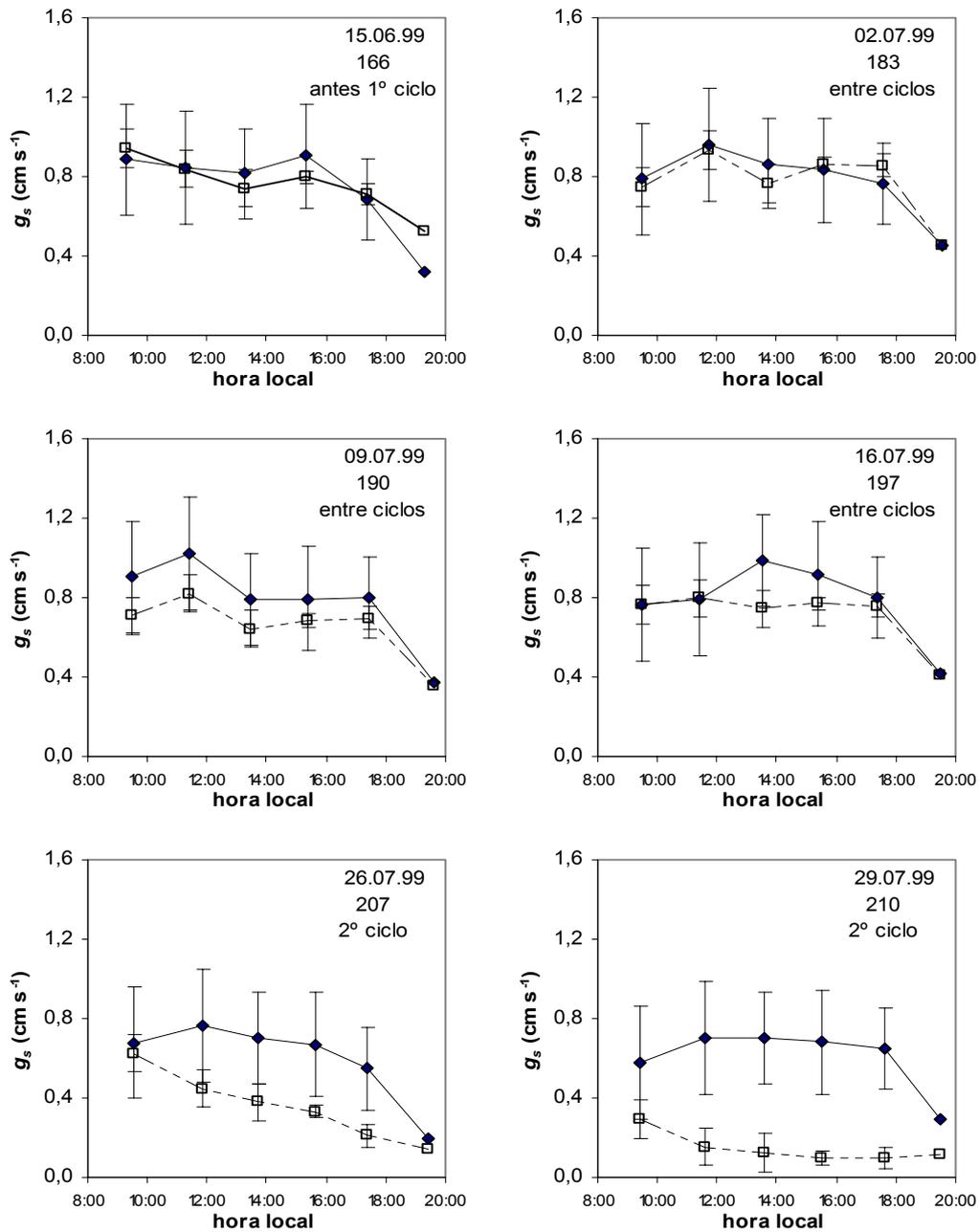


Figura IV.82 – Cinéticas diárias de condutância estomática em dias de céu limpo, excepto o dia 207 (em que se verificou alguma nebulosidade), 1999.

—◆— árvores regadas  
 - - - □ - - - árvores submetidas a 2 ciclos de stress

As condutâncias estomáticas médias observadas para a totalidade do período de observações durante este ano inserem-se dentro da gama de valores observada no ano anterior, sendo a  $g_s$  máxima, em média, cerca de  $1.0 \text{ cm s}^{-1}$ , observada geralmente ao fim da manhã. Em relação aos valores médios da parcela regada, a gama de variação observada foi idêntica à do ano anterior. Note-se que o fecho estomático a meio do dia, quando ocorre, não é pronunciado e que, durante a manhã,  $g_s$  é em média superior a  $g_s$  observada durante a tarde.

Tendo por finalidade avaliar a detecção do *stress* hídrico utilizando a medição da condutância estomática, considerou-se que o momento de medição mais interessante seria aquele em que se verifica maior diferença entre plantas em conforto hídrico e plantas em *stress*. Frequentemente isto verifica-se quando, durante a tarde, as plantas em *stress* não acompanham a reabertura dos estomas das plantas em conforto hídrico, que se segue à redução da abertura estomática perto do meio-dia solar (vd. Correia *et al.*, 1997). Katerji *et al.* (1988) e Tavares e Ferreira (1994) observaram que este momento correspondia aproximadamente ao período que medeia entre as 13.00 e as 13.30 h (hora solar) em experiências realizadas em tomate e pessegueiro, respectivamente. Para as nossas condições experimentais, a diferença máxima entre  $g_s$  de plantas regadas e de plantas sujeitas a déficit hídrico, ocorreu aproximadamente entre as 13 h e as 14 h (hora solar), sendo idêntico ao verificado por aqueles autores. Desta forma, foi este o momento escolhido para as medições de  $g_s$ , enquanto indicador de *stress* hídrico (vd. III.7).

Na Figura IV.83 (a) são apresentados os resultados das medições de condutância estomática após o meio-dia, ao longo de todo o período de medições, em 1998. Os valores mínimos observados (cerca de  $0.05 \text{ cm s}^{-1}$ ) ocorreram durante o ciclo de déficit hídrico indicado em plantas em que foi suprimida a rega (a última rega ocorreu no dia do ano 190, à noite, tendo sido retomada no dia 200; nas plantas regadas, a rega não decorreu nos dias 192 e 193, devido a uma falha do sistema de rega). Ao longo de todo o período considerado, quando todos os grupos se encontram em condições hídricas idênticas, as plantas apresentam um comportamento semelhante entre si. Observa-se uma rápida reacção das plantas, patente no dia imediatamente a seguir ao corte da rega. A reacção foi uniforme durante os três primeiros dias, dado a rega ter estado interrompida em toda a parcela, por falha do sistema, como referido.

Um conjunto idêntico de resultados, obtidos no ano seguinte, é apresentado na Figura IV.83 (b). Os valores extremos de  $g_s$  encontrados são bastante semelhantes aos representados na Figura IV.80 (a), existindo diferenças nítidas entre plantas regadas e plantas submetidas a *stress* hídrico.

A Figura IV.84 mostra a evolução da condutância estomática relativa (razão entre a condutância estomática de plantas submetidas a déficit hídrico e a condutância estomática de plantas em conforto hídrico) durante os ciclos de *stress* hídrico indicados. O tratamento da condutância estomática em termos relativos permite obviar o efeito das variações da humidade do ar que se verificam de dia para dia (Ferreira *et al.*, 1996 e 1997b). Com efeito,

diversos estudos evidenciam a dependência de  $g_s$  da humidade do ar, não só em condições controladas (p. ex., Gollan et al. (1985) e Turner *et al.* (1985)), como também em condições naturais (p. ex., Ferreira e Katerji (1992), em tomateiro e Küppers (1984) em *Prunus spinosa*, *Ribes uva-crispa*, *Crataegus macrocarpa*, *Acer campestre* e *Rubus corylifolius*).

A condutância estomática relativa (Figura IV.84) atingiu valores mínimos próximos de 0.1, no final dos ciclos, evidenciando o forte fecho estomático ocorrido nas árvores sem rega.

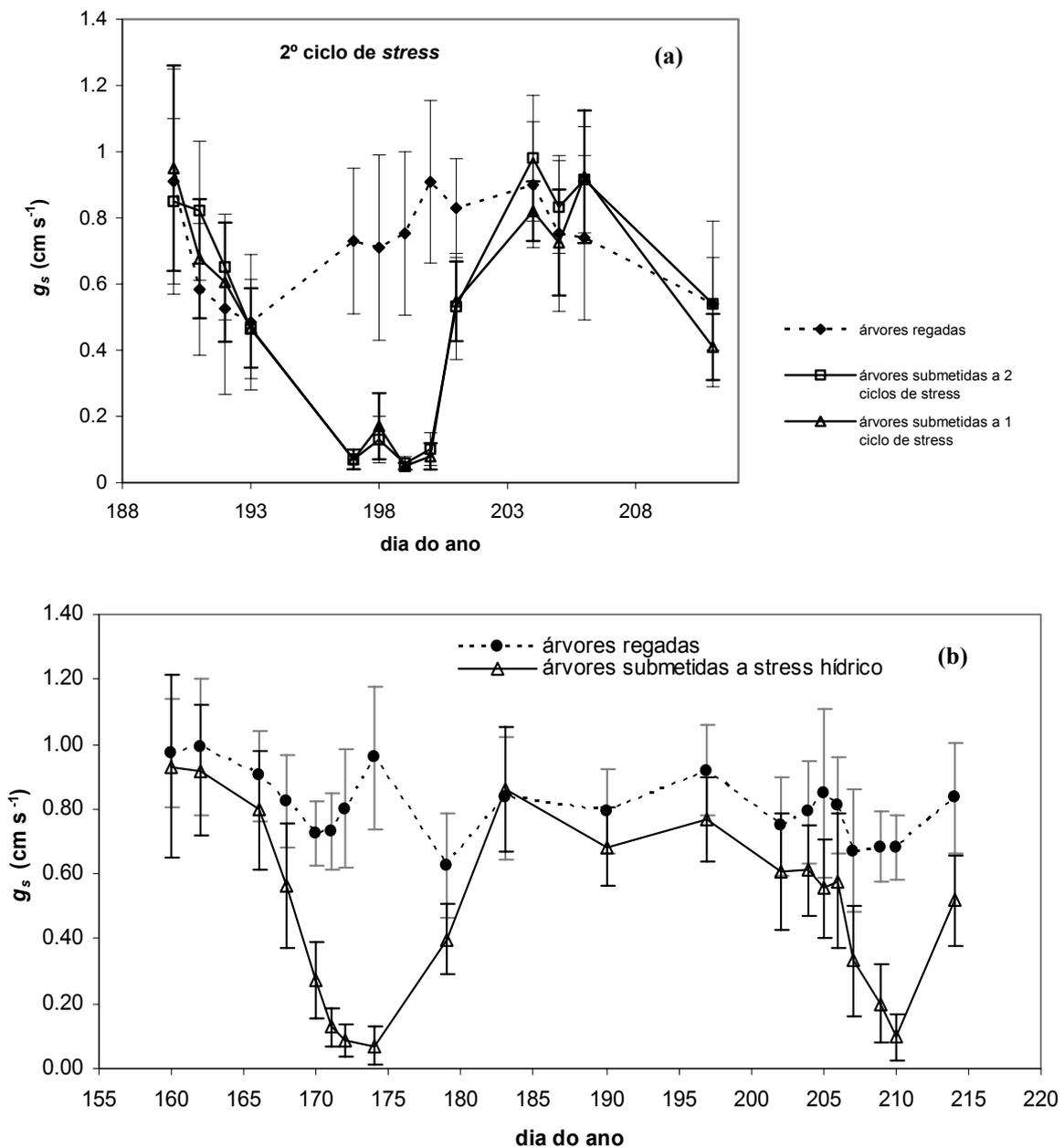


Figura IV.83 – Condutância estomática medida após o meio-dia solar, média e desvio-padrão; (a) 1998; (b) 1999.

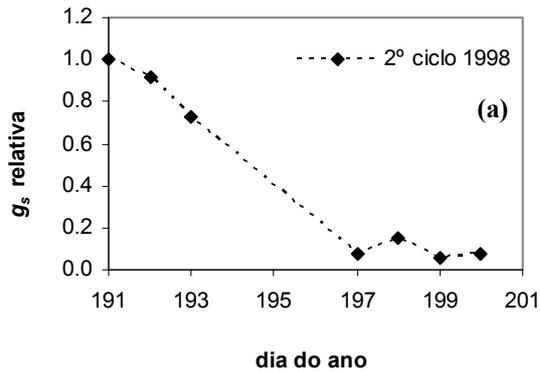
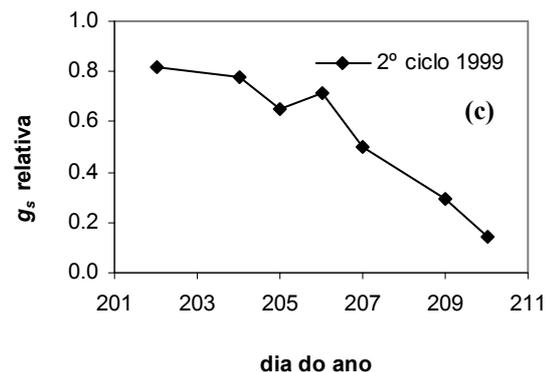
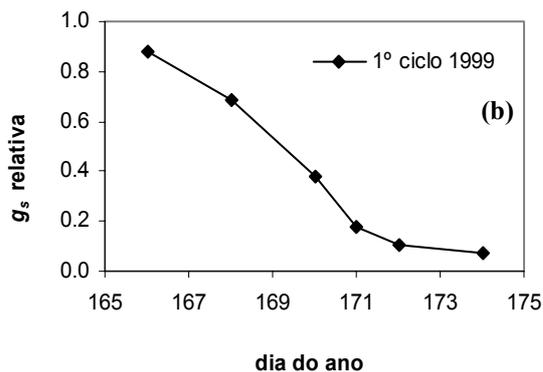


Figura IV.84 – Condutância estomática relativa (razão entre a condutância de plantas submetidas a *stress* hídrico e a condutância de plantas em conforto hídrico) ao longo dos ciclos de *stress* hídrico, 2º ciclo 1998 (a), 1º ciclo 1999 (b) e 2º ciclo 1999 (c).



### IV.6.3. Análise conjunta de cinéticas diárias de potencial hídrico foliar e de condutância estomática, em situação de déficit hídrico

As Figuras IV.85, IV.86 e IV.87 permitem analisar o comportamento das plantas quando submetidas a déficit hídrico, a partir das cinéticas diárias de  $g_s$  e  $\Psi_f$ , agora em conjunto. Nos três dias analisados (17.07.98, 198; 26.07.99, 207; 29.07.99, 210), é possível observar diferenças nítidas na  $g_s$  dos dois tratamentos (plantas regadas e plantas submetidas a *stress* hídrico), mais evidentes que as diferenças observadas para  $\Psi_f$ . Nos dias 26 e 29 de Julho (1999), a evolução de  $g_s$  ao longo do dia é semelhante para as plantas regadas, verificando-se um fecho estomático acentuado apenas no final do dia. No dia 26 de Julho, para as plantas submetidas a *stress* hídrico, assiste-se a um fecho gradual dos estomas ao longo do dia, enquanto que no dia 29, de manhã cedo,  $g_s$  apresenta já valores mais reduzidos do que no dia 26, decrescendo logo durante a manhã até valores mínimos. Tal decorre, naturalmente, do acentuar do déficit hídrico entre o dia 26 e o dia 29 (a última rega decorreu durante no dia 20.07.98, dia do ano 201). No dia 17.07.98, registaram-se, porém, valores de  $VPD$  mais elevados do que nos outros dois dias, o que possivelmente influenciou o fecho estomático mais evidente que ocorreu depois do meio-dia. Para a generalidade das observações, verifica-se que o fecho dos estomas parece ocorrer de forma gradual.

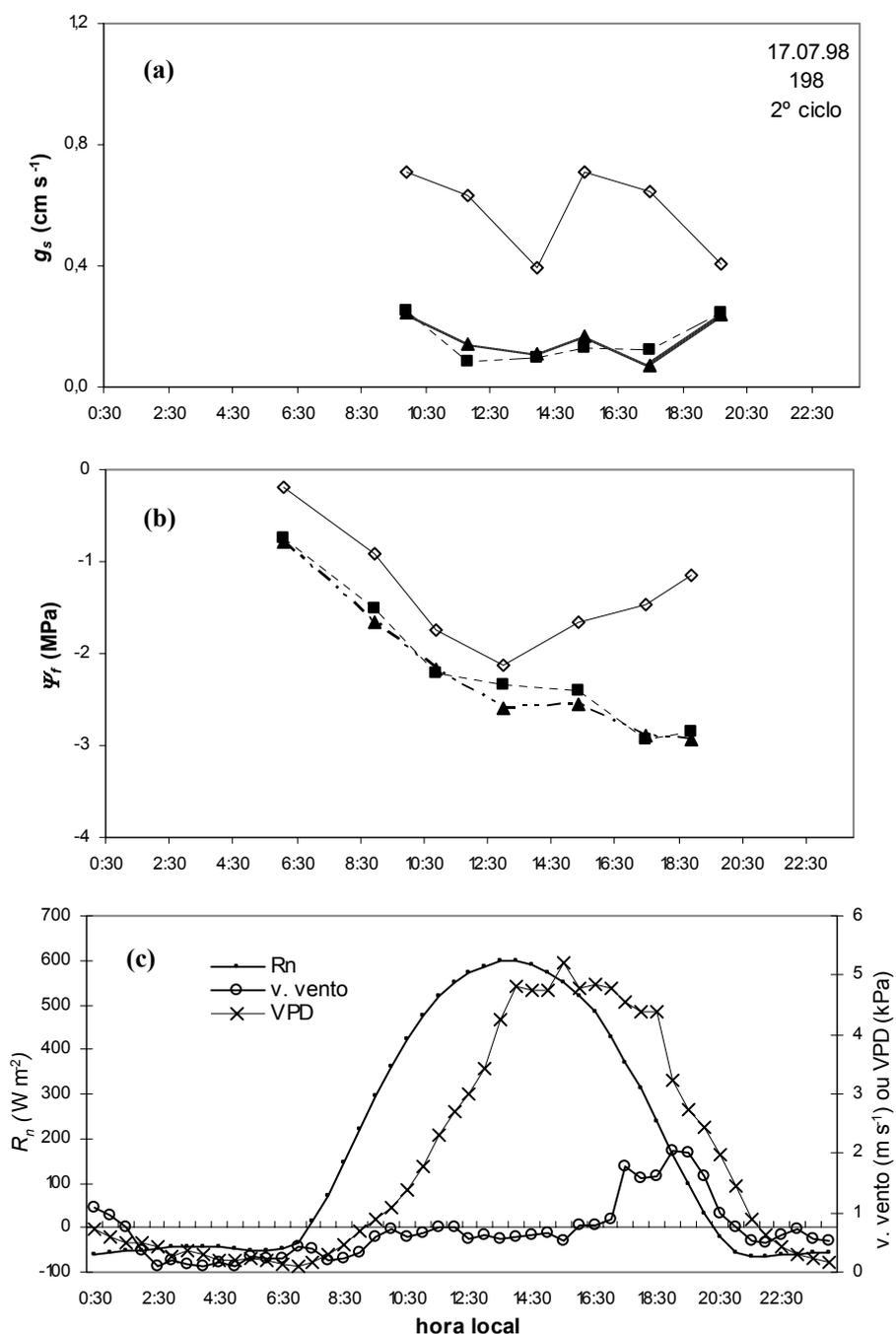


Figura IV.85 – Cinética diária de  $g_s$  (a) e de  $\psi_f$  (b) realizada no dia do ano 198 (17 de Julho), durante o 2º ciclo de *stress* hídrico realizado em 1998 (a última rega decorreu no dia 190 à noite);  $\diamond$  - plantas regadas,  $\blacksquare$  - plantas submetidas a 2 ciclos de *stress*,  $\blacktriangle$  - plantas submetidas a 1 ciclo de *stress*; (c) - balanço da radiação ( $R_n$ ), défice da pressão de vapor (VPD) e velocidade do vento para o mesmo dia.

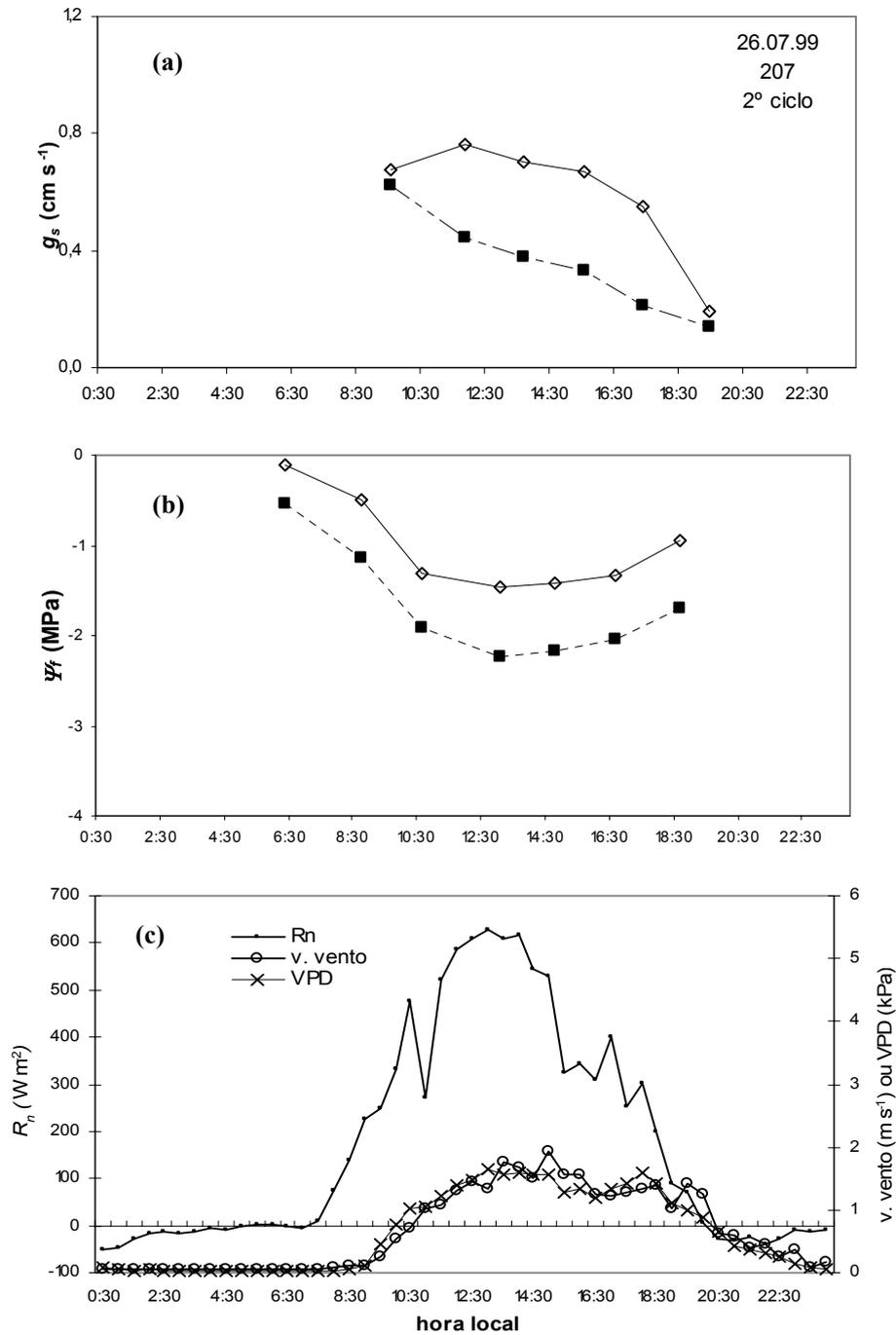


Figura IV.86 – Cinética diária de  $g_s$  (a) e de  $\Psi_L$  (b) realizada no dia do ano 207 (26 de Julho), durante o 2º ciclo de *stress* hídrico realizado em 1999 (a última rega decorreu no dia 201 à noite); ◇ - plantas regadas, ■ - plantas submetidas a 2 ciclos de *stress*; (c) - balanço da radiação ( $R_n$ ), défice da pressão de vapor ( $VPD$ ) e velocidade do vento para o mesmo dia.

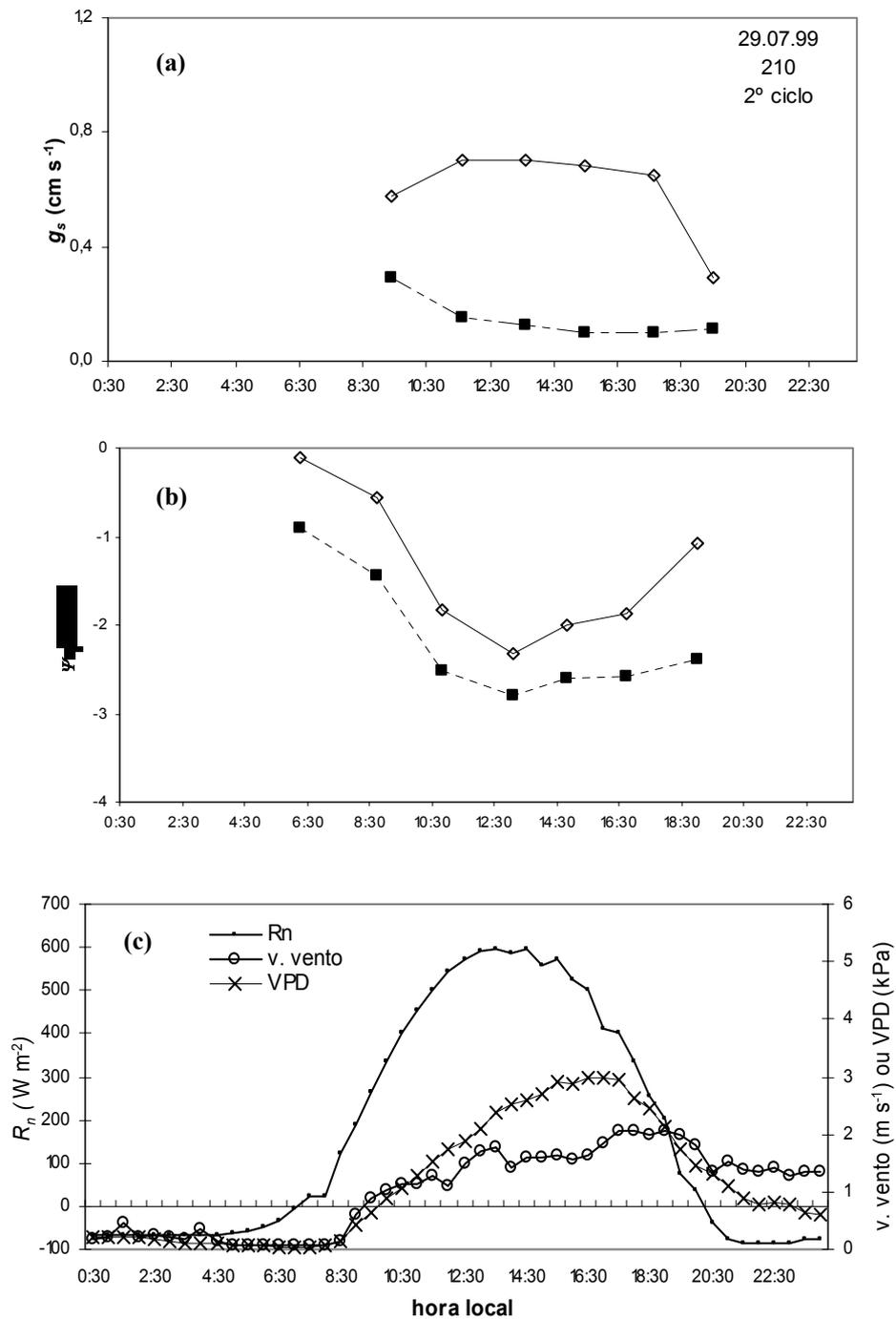


Figura IV.87 – Cinética diária de  $g_s$  (a) e de  $\Psi_f$  (b) realizada no dia do ano 210 (29 de Julho), durante o 2º ciclo de *stress* hídrico realizado em 1999 (a última rega decorreu no dia 201 à noite);  $\diamond$  - plantas regadas,  $\blacksquare$  - plantas submetidas a 2 ciclos de *stress*; (c) - balanço da radiação ( $R_n$ ), défice da pressão de vapor ( $VPD$ ) e velocidade do vento para o mesmo dia.

O fecho estomático gradual ao longo do dia tem sido observado nesta espécie por outros autores (Garnier e Berger, 1987; Ferreira, dados não publicados). Em damasqueiro, uma espécie do mesmo género do pessegueiro, este comportamento foi também detectado (Valancogne, 1995). Comparando a evolução de  $\Psi_f$  em plantas regadas e não regadas, ao longo do dia (Figuras IV.85 (b), IV.86 (b) e IV.87 (b)), é possível observar que a diferença entre um grupo e outro de plantas se mantém quer se trate de  $\Psi_b$  ou de  $\Psi_{min}$ . Ou seja, o grau de hidratação diminui de forma mais ou menos paralela, nos dois grupos de plantas, resultado do fecho estomático progressivo. Logo, nas plantas estudadas no contexto deste trabalho, não se verifica um comportamento típico de uma espécie isohídrica, nem de uma espécie anisohídrica, parecendo existir um comportamento intermédio, como referido anteriormente. Tal implica alguma dificuldade na utilização de  $\Psi_{min}$  como um indicador claro de *stress* hídrico para esta espécie, como já assinalado.

#### IV.6.4. Transpiração relativa

A Figura IV.88 apresenta a evolução da transpiração relativa (*TR* - razão entre a transpiração de árvores submetidas a défice hídrico e a transpiração de árvores em conforto hídrico), obtida a partir da medição do fluxo de seiva com o método do balanço de calor, ao longo do 2º ciclo de *stress* hídrico realizado em 1998. Como o gráfico mostra, as árvores submetidas a défice hídrico apresentaram uma *TR* que variou entre cerca de 1.2, quando se procedeu ao corte da rega, e cerca de 0.25 quando esta foi retomada. Para facilitar a visualização da redução de *TR* e para poder comparar a informação obtida com outras situações, sem que a variabilidade dos indivíduos em cada amostra interfira no valor de *TR*, procedeu-se à normalização dos resultados, tomando como factor de normalização o último dia em condições de rega normal (em que se considera uma transpiração relativa igual a 1). A transpiração relativa normalizada apresentou um valor mínimo de cerca de 20%, indicando uma redução na transpiração das árvores submetidas a défice hídrico de cerca de 80% (Figura IV.89).

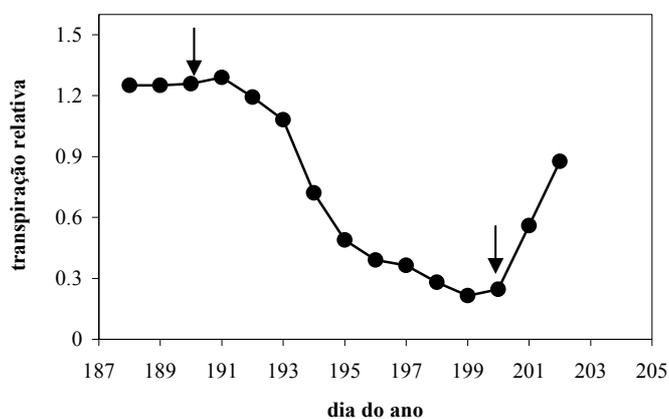


Figura IV.88 – Evolução ao longo do tempo da transpiração relativa, durante o aumento progressivo do défice hídrico; 2º ciclo de *stress* 1998; as setas assinalam o último dia em que regou, antes do início do ciclo de *stress* e o dia em que volta a regar.

Na Figura IV.89, optou-se por mostrar a evolução da  $TR$  com  $ET_o$  acumulada ao longo do ciclo e não com a  $ET$  acumulada. Para determinar a quantidade de água deplecionada do solo, seria desejável utilizar a  $ET$  acumulada, no entanto, dado que estes resultados apenas serão analisados posteriormente (vd. V.1), far-se-á em V.2 uma abordagem mais detalhada deste assunto. A  $ET_o$  reflecte a evolução das condições em que decorreu o ciclo, tendo sido, por esse motivo, utilizada nesta fase do trabalho. No final do ciclo (dia 200), a  $ET_o$  acumulada era de cerca de 55 mm.

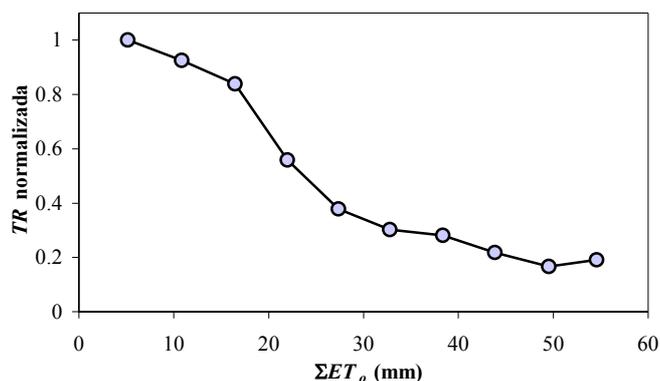


Figura IV.89 – Evolução da transpiração relativa normalizada, obtida com o método do balanço de calor, com a  $ET_o$ , durante o 2º ciclo de *stress* hídrico em 1998.

#### IV.6.5. Análise da evolução conjunta de indicadores do estado hídrico

##### IV.6.5.1. Condutância estomática vs. potencial hídrico foliar de base

A Figura IV.90 apresenta a relação entre os valores absolutos para a variação da condutância estomática, medida após o meio-dia solar, e o potencial hídrico foliar de base<sup>12</sup>, em plantas submetidas a défice hídrico, em 1998 (a) e 1999 (1º ciclo e 2º ciclo) (b) - médias das medições para cada árvore. A Figura IV.91 apresenta um conjunto idêntico de informação para os 3 ciclos de défice hídrico, nos dois anos de trabalho experimental.

Para o 2º ciclo de *stress* hídrico, em 1999 (Figura IV.92 (b)), alguns valores de  $g_s$  apresentam-se um pouco mais elevados do que no ciclo anterior. Durante este ciclo (202-210), ocorreram condições ambientais diferentes, verificando-se alguma nebulosidade (entre os dias 204 e 208), tendência para o aparecimento de valores de  $VPD$  mais baixos (vd. Figura III.13 (b)) e alguma precipitação na noite entre o dia 207 e o dia 208. Em consequência, é natural a ocorrência de um fecho estomático menos acentuado, do que o que seria de esperar em condições de céu limpo e de ambiente mais seco.

A Figura IV.92 apresenta a relação entre  $g_s$  relativa (razão entre a condutância de plantas submetidas a défice hídrico e a condutância de plantas em conforto hídrico) e  $\Psi_b$ . Utiliza-se  $g_s$  relativa para eliminar o efeito em  $g_s$  da variabilidade das condições ambientais, entre diferentes dias, mas os valores aqui ainda não estão normalizados.

<sup>12</sup> Os valores de  $\Psi_b$  para o dia do ano 197, em 1998, (16 de Julho) foram obtidos por interpolação.

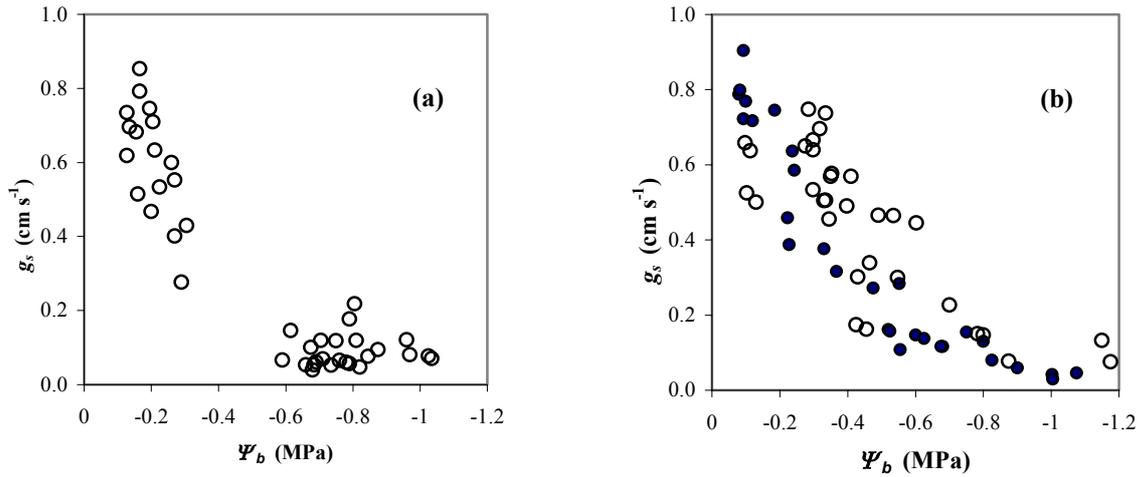


Figura IV.90 – Relação entre a condutância estomática ( $g_s$ ) medida após o meio-dia solar e o potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ); (a) 1998, (b) 1999: ● = 1º ciclo de stress, ○ = 2º ciclo de stress.

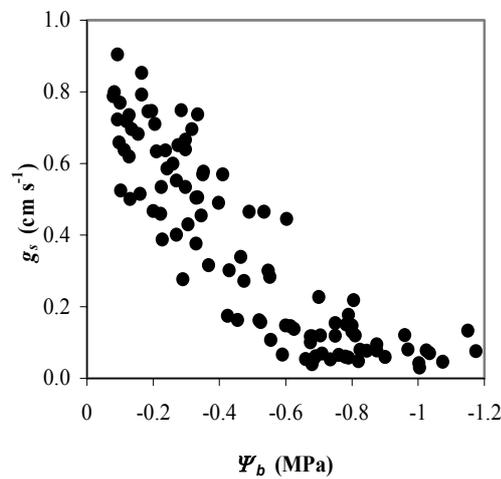


Figura IV.91 – Condutância estomática ( $g_s$ ) medida após o meio-dia solar e potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ); conjunto das observações efectuadas durante 3 ciclos de déficit hídrico, nos dois anos de trabalho experimental.

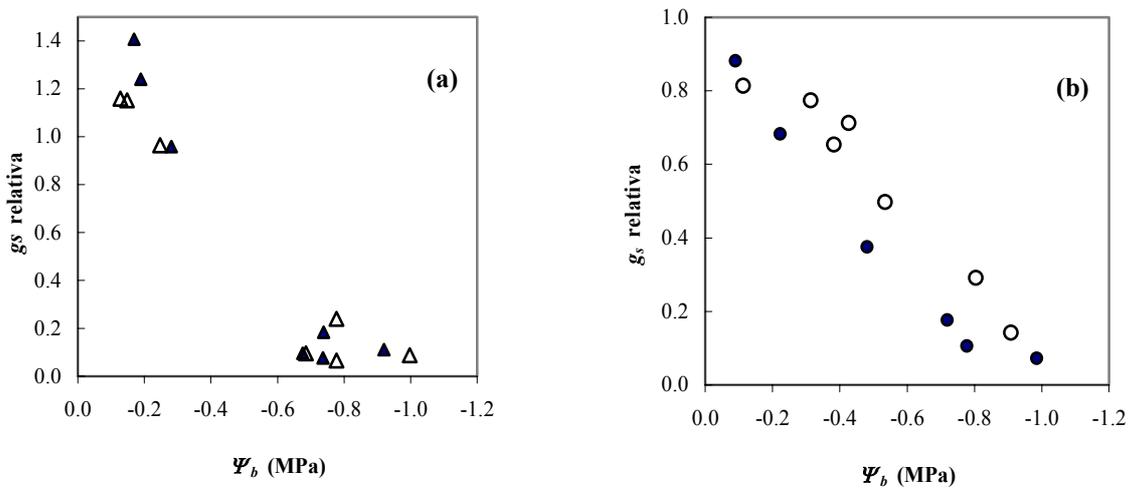


Figura IV.92 – Relação entre a condutância estomática relativa e o potencial hídrico foliar de base; (a) 1998,  $\Delta$  =  $g_s$  relativa de plantas submetidas a 1 ciclo de stress,  $\blacktriangle$  =  $g_s$  relativa de plantas submetidas a 2 ciclos de stress, (b) 1999 ● = 1º ciclo de stress, ○ = 2º ciclo de stress.

Os limiares críticos identificados anteriormente em pessegueiro para  $\Psi_b$  e  $g_s$  relativa (Ferreira, 1996a; Ferreira *et al.*, 1996, 1997b),  $\Psi_b = -0.45$  MPa e  $g_s$  relativa = 0.5, são concordantes com os que poderão ser identificados nas Figuras IV.90 (b) e IV.92 (b), por exemplo.

Para poder comparar os diferentes ciclos, foi feita uma normalização (Figura IV.93), uma vez que a amostragem efectuada em 1998 levou a que, antes de se efectuar o corte da rega, existisse já uma certa disparidade entre  $g_s$ . A relação linear entre  $g_s$  relativa normalizada e  $\Psi_b$  para um aumento progressivo do défice hídrico (Figura IV.93), aproxima-se.

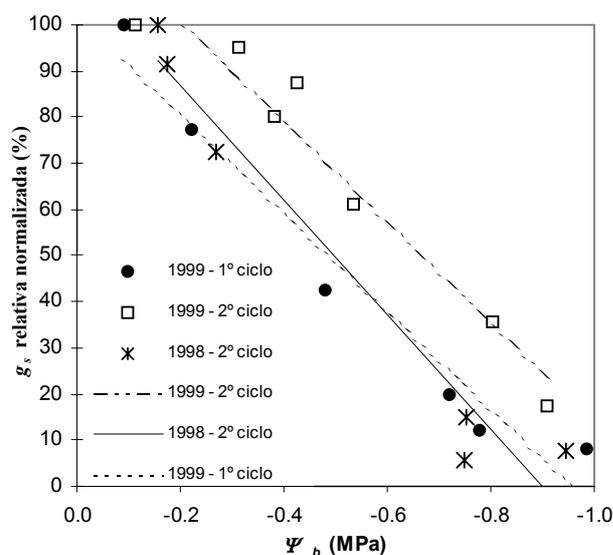


Figura IV.93 – Relação entre a condutância estomática relativa normalizada e o potencial hídrico foliar de base, durante o aumento progressivo do défice hídrico, em 3 ciclos de *stress* hídrico; as equações das rectas de regressão representadas são as seguintes: 1998, 2º ciclo,  $y = 123.9 x + 111.6$  ( $r^2 = 0.95$ ); 1999, 1º ciclo,  $y = 107.1 x + 101.8$  ( $r^2 = 0.95$ ); 1999, 2º ciclo,  $y = 109.9 x + 122.8$  ( $r^2 = 0.94$ ).

A relação encontrada entre a condutância estomática relativa (medida após o meio-dia solar) e o potencial hídrico foliar de base foi comparada com relações do mesmo tipo anteriormente estabelecidas em pessegueiro. A Figura IV.94 ilustra a comparação dos resultados obtidos nos ensaios conduzidos na Atalaia, Montijo, com os obtidos em ensaios realizados em Águas de Moura, Setúbal, em 1994 (Ferreira *et al.*, 1996; 1997b) e em Lérida (Catalunha, em 1997; dados não publicados), também em pessegueiro.

As evoluções observadas em 1994 e em 1998 e 1999, na Figura IV.94, são semelhantes, demarcando-se, no entanto, da encontrada em Lérida. Embora nesta última situação tenha sido feito um número reduzido de medições, os dados parecem sugerir um diferente comportamento das plantas, que tendem aparentemente a manter uma maior abertura relativa dos estomas para os valores de  $\Psi_b$  mais baixos (zona assinalada na figura). Uma das razões que pode contribuir para explicar este comportamento relaciona-se com as diferentes características do pomar de Lérida. Os pomares em Águas de Moura e na Atalaia

apresentavam características semelhantes no que diz respeito à textura do solo (arenosa), ao clima, ao espaçamento entre linhas e entre árvores (5 x 2 m) e ao facto de se tratarem de nectarinas. No pomar de Lérida, o solo era argiloso, o espaçamento entre linhas era menor (4 x 2 m) e a zona entre linhas, relvada. Tal pode ter contribuído para a manutenção de uma atmosfera mais húmida no interior do pomar, conducente a um maior grau de abertura estomática em situação de igual disponibilidade hídrica. Por outro lado, trata-se de variedades diferentes e, no caso de Lérida, de uma variedade de pêsego, enquanto que nas outras situações se estudaram variedades de nectarina, como referido. De acordo com o sugerido por Valancogne (1995), o comportamento hídrico em árvores de fruto não é generalizável para a espécie. Note-se também que, em Lérida, o menor fecho estomático parece promover a descida do grau de hidratação das plantas a níveis mais baixos do que em todas as outras situações (mais anisohídrica).

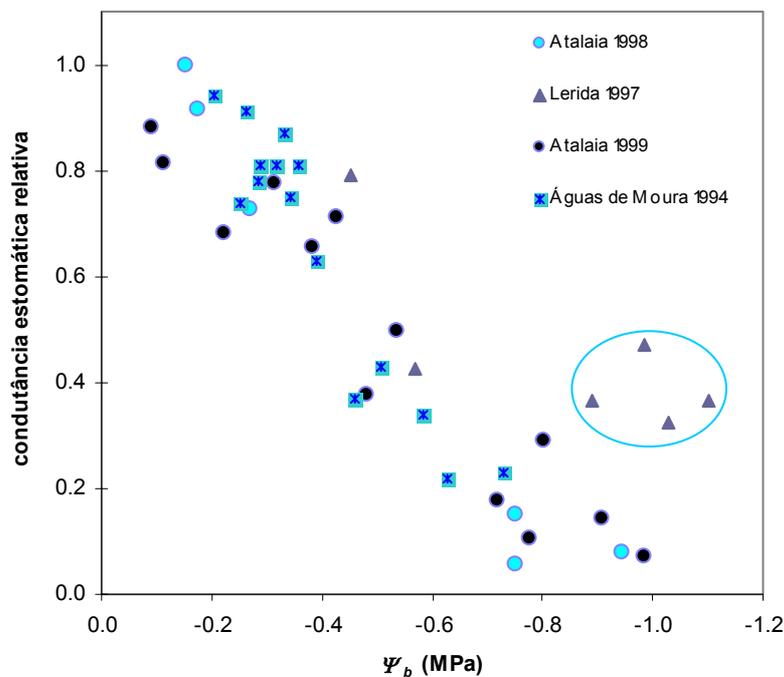


Figura IV.94 – Relação entre a condutância estomática relativa e o potencial hídrico foliar de base, obtida para pessegueiro em diferentes locais; os pontos destacados (representados na figura por triângulos) dizem respeito a um pomar em condições edafo-climáticas e de coberto distintas.

Note-se que, nas duas situações semelhantes (Atalaia e Águas de Moura), existiam diferenças em relação ao sistema de rega utilizado, sendo a rega diária e por gota-a-gota na Atalaia e por aspersão a cada 3 ou 4 dias, em Águas de Moura. A rega gota-a-gota, diária, poderá ter proporcionado o desenvolvimento de um sistema radicular mais superficial, levando à ocorrência mais precoce de potenciais mais negativos.

As observações realizadas em Lérída conduziram a um conjunto reduzido de informação, que dificultou a detecção de limiares críticos de  $\Psi_b$  e  $g_s$  relativa, mas que não contradiz os encontrados para as restantes situações.

#### IV.6.5.2. Transpiração relativa vs. potencial hídrico foliar de base

A informação sobre a forma como se relacionam a transpiração relativa e o potencial hídrico foliar afigura-se interessante, no contexto da procura de relações adequadas entre variáveis automatizáveis e não automatizáveis, passíveis de serem utilizadas na programação da rega. A Figura IV.95 (a) apresenta os resultados obtidos para a evolução da transpiração relativa com o potencial hídrico foliar de base, durante o 2º ciclo de *stress*, em 1998.

Ferreira *et al.* (1996) estudaram esta relação em pessegueiro, na zona de Águas de Moura (Setúbal). Estes autores identificaram uma mudança clara no comportamento de árvores de pessegueiro, quando  $\Psi_b$  atingia o valor de -0.45 MPa, que correspondia a uma transpiração relativa de 0.65. O limiar  $\Psi_b = -0.45$  MPa foi confirmado também neste trabalho (vd. IV.6.5.1) e é possível identificar um valor correspondente de  $TR$ , utilizando a equação de regressão da Figura IV.95 (a), que seria igual a 0.5, ou que, numa estimativa visual, se aproximaria de 0.6.

A relação entre  $TR$  e  $\Psi_b$  foi estudada em diversas espécies por Valancogne *et al.* (1997), nomeadamente em pessegueiro, tendo sido observado que entre  $TR$  e  $\Psi_b$  existe uma forte correlação, embora com diferentes coeficientes de regressão para as diferentes espécies; concluíram que  $TR = a e^{b\Psi_b}$  era a melhor relação encontrada para o conjunto das espécies que estudaram, sendo  $a$  e  $b$  coeficientes, que relacionaram com o potencial hídrico foliar de base máximo (média de valores de  $\Psi_b$  obtidos em condições de conforto hídrico –  $\Psi_{b\ max}$ ). Concluíram que tanto  $a$  como  $b$  se correlacionavam com  $\Psi_{b\ max}$ , da seguinte forma:

$$a = -0.62 \Psi_{b\ max} + 1.13 \quad (r^2 = 0.43) \quad (IV.8)$$

$$b = 3.43 \Psi_{b\ max} + 2.16 \quad (r^2 = 0.95) \quad (IV.9)$$

tendo considerado para  $a$  um valor médio igual a 1.28.

Analisou-se a adaptação de uma função do tipo  $TR = a e^{b\Psi_b}$  aos resultados obtidos na Atalaia, Montijo (Figura IV.95 (a)), tendo-se verificado a obtenção de uma regressão de elevado coeficiente de determinação, em que os coeficientes  $a$  e  $b$  assumem os valores 1.60 e 2.54, respectivamente. A Tabela IV.11 indica os valores determinados experimentalmente para  $a$  e  $b$  em pomar de pessegueiro, na zona de Águas de Moura, Setúbal (Ferreira *et al.*, 1997b; Valancogne *et al.*, 1997), para a variedade *Maybelle*. Quando se compara a função aqui obtida com aqueles resultados prévios em pessegueiro (Figura IV.95 (b)), verifica-se que, para valores mais baixos de  $\Psi_b$  e de  $TR$ , a curva obtida para a Atalaia, Montijo tende a

afastar-se mais das restantes, do que para valores elevados, indicando uma evolução ligeiramente diferente da relação entre variáveis.

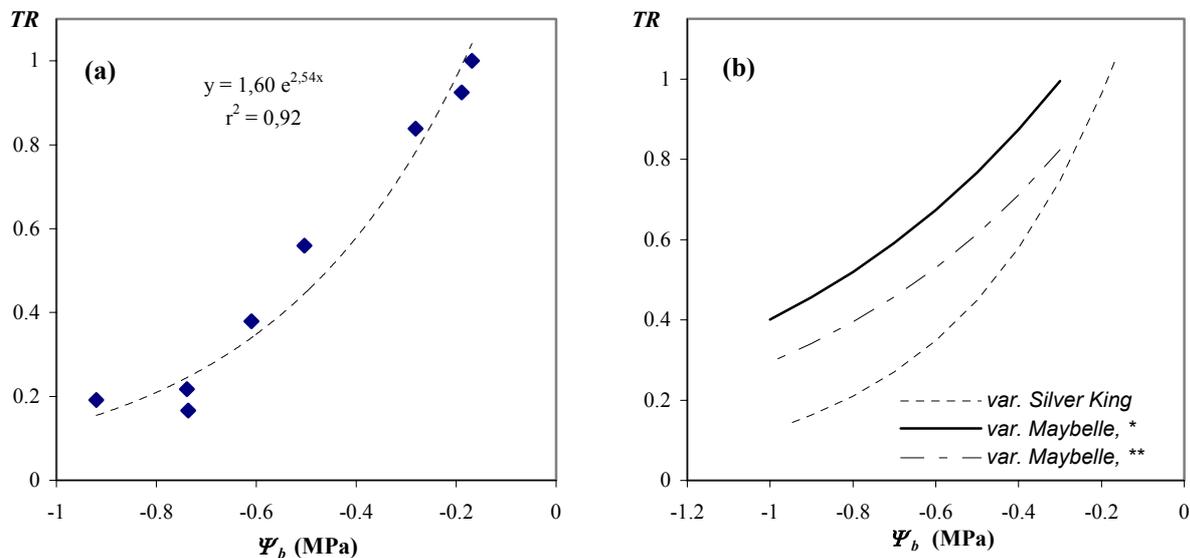


Figura IV.95 – Relação entre a transpiração relativa ( $TR$ ) e o potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ), utilizando uma função do tipo  $TR = a e^{b\Psi_b}$  para (a) a variedade *Silver King* – Atalaia, Montijo, 1998, (b) comparação entre as diferentes curvas do tipo  $TR = a e^{b\Psi_b}$  ajustadas para a variedade *Maybelle* – Águas de Moura, Setúbal (\* Valancogne *et al.*, 1997; \*\* Ferreira *et al.*, 1997b).

Tabela IV.11 – Coeficientes  $a$  e  $b$  obtidos experimentalmente para a função  $TR = a e^{b\Psi_b}$  e valores de  $\Psi_{b\ max}$  para a situação correspondente - média de valores de  $\Psi_b$  obtidos em condições de conforto hídrico.

Variedade	Localização do pomar	$a$	$b$	$\Psi_{b\ max}$ (MPa)
<i>Silver King</i> 98 2º ciclo	Atalaia (Montijo)	1.60	2.54	-0.17
<i>Maybelle</i> (2 ciclos) (Ferreira <i>et al.</i> , 1997b)	Águas de Moura (Setúbal)	1.28	1.47	-0.20
<i>Maybelle</i> (2 ciclos) (Valancogne <i>et al.</i> , 1997)	Águas de Moura (Setúbal)	1.47	1.30	-0.30

Na Figura IV.96, os coeficientes  $a$  e  $b$  determinados experimentalmente para a Atalaia (Montijo) são representados em conjunto com as funções IV.8 e IV.9. Enquanto que, para o coeficiente  $a$ , os valores obtidos experimentalmente são próximos do valor médio proposto em Valancogne *et al.* (1997), os obtidos para o coeficiente  $b$  afastam-se bastante, dado os valores de  $\Psi_{b\ max}$  observados serem mais elevados que os encontrados por Valancogne *et al.* (1997) (vd. Tabela IV.11).

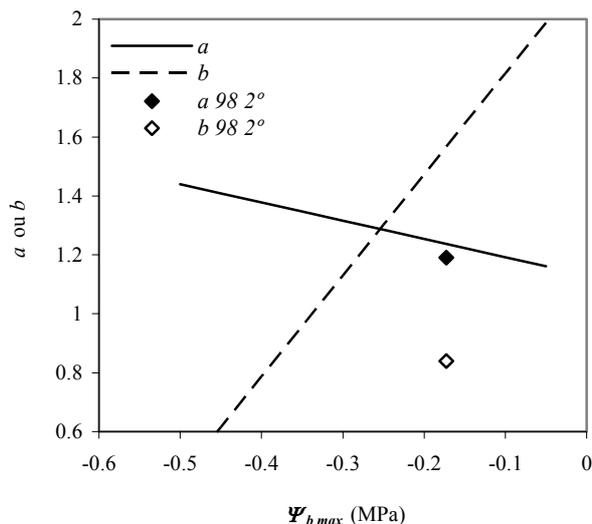


Figura IV.96 – As rectas a e b representam as funções definidas em Valancogne *et al.* (1997) ( $a = -0.62 \Psi_{b \max} + 1.13$  e  $b = 3.43 \Psi_{b \max} + 2.16$ ), os pontos representam os coeficientes a e b obtidos experimentalmente no âmbito deste estudo.

Seguindo o procedimento descrito em Valancogne *et al.* (1997), ou seja, utilizando  $\Psi_{b \max}$  como factor de normalização e a função única

$$TR = 1.28 e^{(3.43 \Psi_{b \max} + 2.16) \Psi_b} \quad (IV.10)$$

obtém-se para a Atalaia, Montijo a curva a tracejado representada na Figura IV.97, em que  $\Psi_{b \max} = -0.17$  MPa (vd. Tabela IV.11). Também na Figura IV.97 é representada a função do tipo  $TR = a e^{b \Psi_b}$ , determinada experimentalmente (Figura IV.95 (a)). Observando então a Figura IV.97 é possível verificar que as duas curvas representadas se afastam para valores baixos de  $\Psi_b$  e de TR, cruzando-se para um valor de TR de cerca de 0.9.

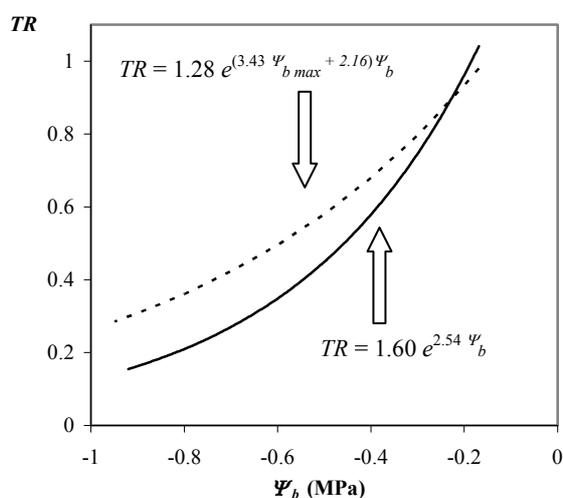


Figura IV.97 – Comparação entre TR estimada a partir de  $\Psi_{b \max}$  (de acordo com Valancogne *et al.*, 1997) e TR obtida por análise de regressão dos dados recolhidos na Atalaia, Montijo (2º ciclo de stress hídrico, 1998).

Para o valor limiar de  $\Psi_b$  (-0.45 MPa) determinado para pessegueiro por Ferreira *et al.* (1996) e confirmado para este estudo, a função IV.10 fornece uma estimativa de  $TR$  igual a 0.63.

Na Figura IV.98, encontram-se representadas as curvas obtidas para as três diferentes situações analisadas (vd. Identificação na Tabela IV.11), mediante a utilização da equação IV.10. As duas curvas obtidas, respectivamente, para a variedade *Maybelle* (Ferreira *et al.*, 1997b) e para a variedade *Silver King* apresentam-se quase sobrepostas, dado que o valor de  $\Psi_b \text{ max}$  é idêntico para as duas situações (vd. Tabela IV.11). A segunda curva obtida para a variedade *Maybelle* (Valancogne *et al.*, 1997) apresenta um decréscimo menos acentuado da  $TR$  com  $\Psi_b$ , dado  $\Psi_b \text{ max}$  ser mais baixo que os determinados para as situações anteriores.

As medições de  $\Psi_b$ , para a variedade *Maybelle*, decorreram no mesmo pomar, para as situações descritas em Ferreira *et al.* (1997b) e Valancogne *et al.* (1997), e não seria expectável encontrar diferentes valores de  $\Psi_b$ , para idênticas condições hídricas das plantas. Esta diferença decorre de formas de execução distintas da técnica de medição de  $\Psi_f$  por parte dos operadores, influenciando o resultado e fornece uma estimativa de  $TR$  cerca de 1/10 menor quando  $\Psi_b$  se aproxima de -1 MPa. Tendo em conta a possibilidade destas pequenas divergências, a solução proposta por Valancogne *et al.* (1997) poderá ser útil para a estimativa da  $TR$  em pomar de pessegueiro, num contexto de programação da rega, dado que a diferença entre a  $TR$  estimada pela equação IV.10 e a  $TR$  estimada pela equação obtida experimentalmente poderá não ser relevante, como mostrado na Figura IV.96. Sobretudo em situação de défice hídrico moderado, as duas estimativas são próximas, sendo este procedimento passível de ser utilizado para a estimativa de  $TR$  nas condições do pomar em estudo, com a margem de erro identificada.

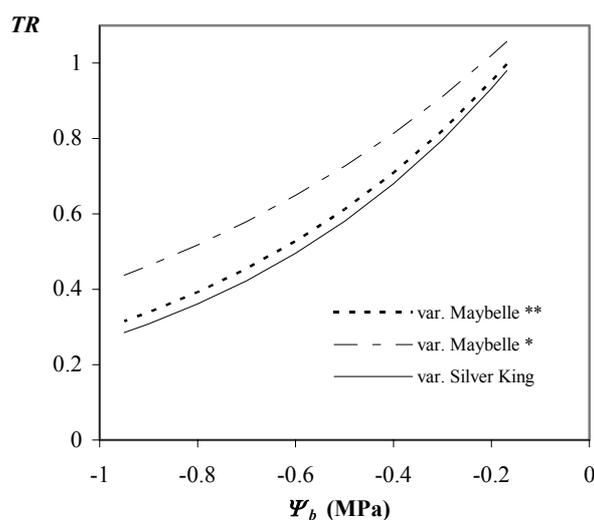


Figura IV.98 – Utilização da equação IV.10 para representar a relação entre o potencial de base ( $\Psi_b$ ) e a transpiração relativa ( $TR$ ), utilizando  $\Psi_b \text{ max}$  (Valancogne *et al.*, 1997), para a variedade *Silver King* – Atalaia, Montijo, 1998 e a variedade *Maybelle* – Águas de Moura, Setúbal (\* Valancogne *et al.*, 1997; \*\* Ferreira *et al.*, 1997b).

### IV.6.5.3. Relação entre a transpiração relativa, a condutância estomática relativa e o potencial hídrico foliar de base.

A Figura IV.99 apresenta a relação entre o potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ) e  $g_s$  relativa (a) e a relação entre  $\Psi_b$  e a transpiração relativa (b), já analisadas em IV.6.5.1. e IV.6.5.2, durante um ciclo de défice hídrico (2º ciclo de 1998). Combinando matematicamente as duas equações representadas na Figura IV.99 (a) e (b), é possível obter uma equação, patente na Figura IV.99 (c), que relaciona a  $TR$  e a  $g_s$  relativa:

$$TR = e^{0.7 (\ln g_{s,relativa}) - 0.09} \quad (IV.11)$$

A equação IV.11 mostra uma boa concordância com as medições de  $TR$  e de  $g_s$  relativa obtidas no pomar (Figura IV.99 (c)), indicando uma variação coordenada das três variáveis ( $TR$ ,  $g_s$  relativa e  $\Psi_b$ ) com o aumento do défice hídrico.  $g_s$  relativa e  $\Psi_b$  mostraram-se indicadores sensíveis e com uma resposta comparável, para a detecção do défice hídrico das plantas, no âmbito deste trabalho. Poderá então concluir-se que é possível estimar de forma fiável  $TR$ , a partir das equações patentes nas Figuras IV.99 (a) e (b), de forma a permitir identificar um valor crítico para esta variável, com aplicabilidade na programação da rega.

Como abordado em IV.6.5.1, os valores  $\Psi_b = -0.45$  MPa e  $g_s$  relativa = 0.5, determinados por Ferreira *et al.* (1996), confirmam-se para este estudo, como limiares críticos reveladores de uma alteração do comportamento da planta. O valor correspondente de  $TR$  é de 0.5 a 0.6 (vd. IV.6.5.2). Analisando a Figura IV.100, pode constatar-se que  $TR = 0.5$  corresponde a um teor de água disponível no solo, em relação à reserva útil, inferior a 20%<sup>13</sup>. Ferreira *et al.* (1997b) detectaram, para idênticos limiares de  $g_s$  relativa e  $\Psi_b$ , um valor de  $TR$  igual a 0.65, a que correspondia cerca de 10% da reserva útil do solo. Estes autores salientaram o facto de, nesta fase ou situação, as plantas se encontrarem a usar água de camadas mais profundas, não consideradas para a estimativa da reserva útil do solo, através de algumas raras raízes profundantes, mantendo a  $TR$  relativamente elevada quando a água disponível no solo era já tão reduzida (processo não alheio ao facto de não ter sido possível quantificar a  $ET$  com fiabilidade pelo método do balanço hídrico). No âmbito deste estudo, este processo não é tão acentuado. No entanto, assiste-se ao aparecimento de valores de  $TR$  de cerca de 20%, no fim do ciclo de défice hídrico, quando o teor de água disponível no solo é nulo.

<sup>13</sup> Para informação adicional sobre os perfis hídricos do solo, ver Anexo II.

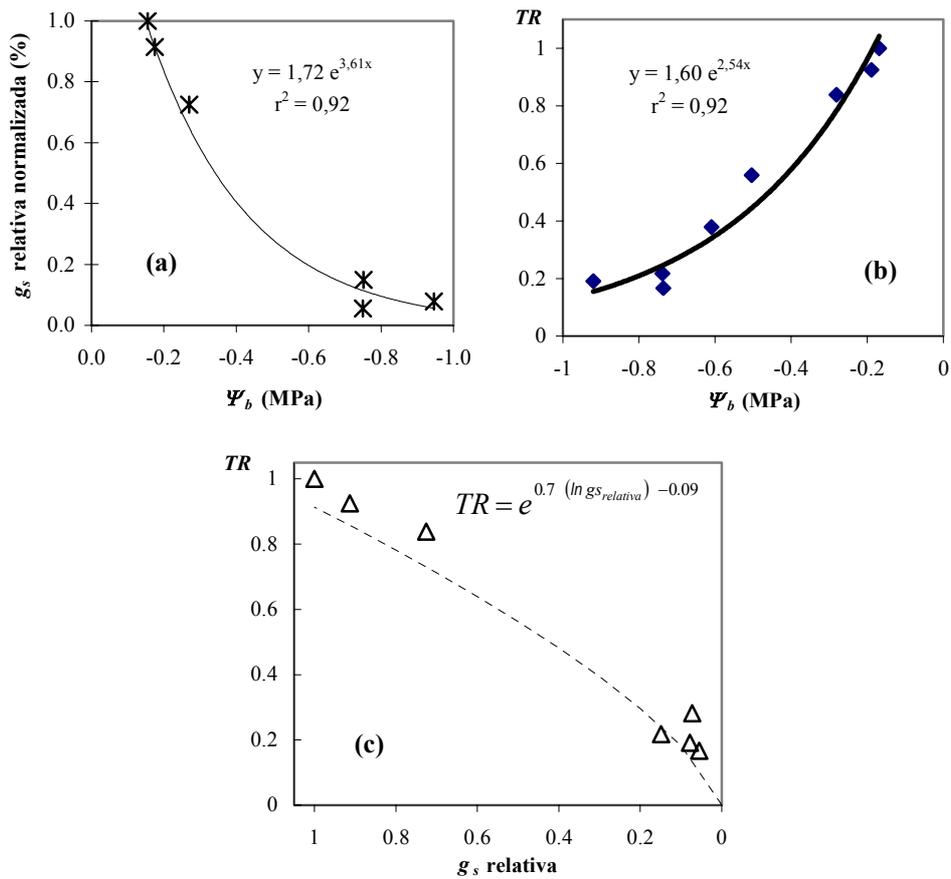


Figura IV.99 – Dedução da relação matemática entre a transpiração relativa ( $TR$ ) normalizada e a condutância estomática ( $g_s$ ) relativa e comparação com valores medidos ( $\Delta$ ); (a) relação entre  $g_s$  relativa e  $\Psi_b$ , (b) relação entre  $TR$  e  $\Psi_b$ , (c) equação resultante da conjugação matemática das equações estabelecidas em (a) e (b) (Atalaia, Montijo, 1998).

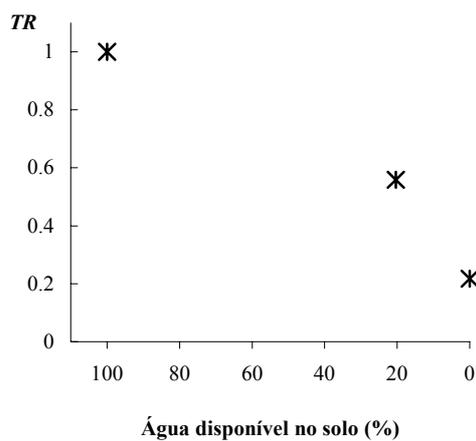


Figura IV.100 – Relação entre a transpiração relativa ( $TR$ ) e a água disponível no solo (% da reserva útil entre 0 e 1.1 m de profundidade) na parcela submetida a déficit hídrico, durante o 2º ciclo de dessecação em 1998.



«Roughly speaking, a model is a peculiar blend of fact and fantasy, of truth, of half-truth and falsehood. In some ways a model may be reliable, in other ways only helpful and at times and in some respects thoroughly misleading. The fashionable dogma that hypothetical schemes can be tested in their totality in some absolute sense, is hardly conducive to creative thinking. It is indeed, just as great a mistake to take the imperfections of our models too seriously as it is to ignore them altogether.»

*Skellam, 1973*

## V. PROGRAMAÇÃO DA REGA

### V.1. Modelação da evapotranspiração na programação da rega

No capítulo IV (secção 3), foram apresentados os resultados da medição da evaporação do solo e discutiu-se a utilização de alguns modelos de estimativa para as condições vigentes no pomar em estudo. Em IV.3 foram propostos dois modelos de estimativa de  $E_s$  específicos (designados por A e B, nas Figuras IV.33 e IV.34, respectivamente), cujos resultados se utilizam no presente capítulo.

A Figura V.1 mostra a relação entre a evapotranspiração e a transpiração, medidas pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}$ ) e pelo método de *Granier* ( $T_G$ ), respectivamente, durante o primeiro ano de trabalho experimental. Subtraiu-se  $E_s$ , estimada de acordo com o referido no parágrafo anterior, a  $ET_{ec}$ , obtendo-se desta forma a transpiração ( $ET_{ec}-E_s$ ). Em 1999, os valores de transpiração obtidos (a partir da medição de  $ET_{ec}$  e da estimativa de  $E_s$ ) eram de cerca de 2 mm/dia ou superiores a este valor (Figura V.2). Ou seja, comparando com a gama de valores da Figura V.1, em 1999 apenas se encontram valores de  $ET_{ec}-E_s$  elevados, observando-se uma certa dispersão.

O ajustamento da equação de regressão foi realizado de forma a permitir que a estimativa de  $ET_{ec}-E_s$ , para valores acima de cerca de 2 mm, represente aproximadamente um valor médio em relação à gama de valores de  $T_G$  observados, dado que nesta zona existe uma certa dispersão (tal como analisado em IV.5.3). Os dados referentes ao dia do ano 248 foram excluídos, dado ter-se revelado uma observação discrepante. Obteve-se assim uma função do tipo  $ET_{ec} - E_s = f(T_G)$ , que se utilizou como modelo de estimativa da transpiração para o pomar de pessegueiro em estudo, durante o período experimental decorrido em 1998:

$$ET_{ec} - E_s = 1/(-2.19 + 3.77e^{-T_G}) \quad (V.1)$$

Idêntico procedimento foi seguido para estimar a  $ET$  durante o segundo ano de trabalho experimental, tendo-se estabelecido a função:

$$ET_{ec} - E_s = 0.75/(-1.69 + 3.38 e^{-(T_G+0.08)}) \quad (V.2)$$

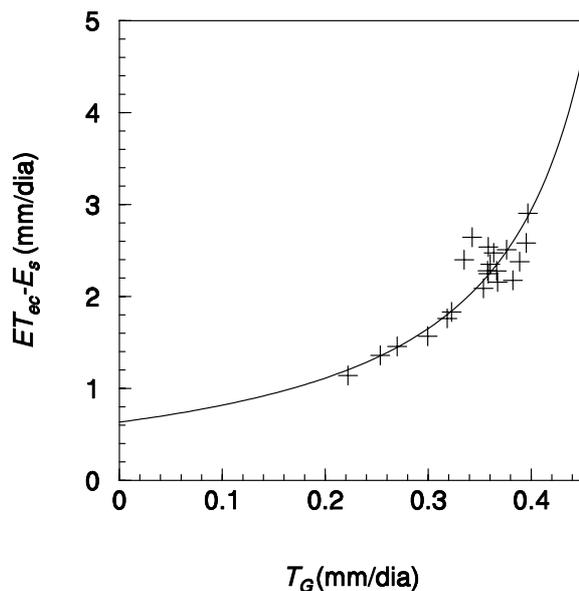


Figura V.1 – Equação de estimativa da transpiração em função da medição pelo método de *Granier*, em 1998:  
 $ET_{ec} - E_s = 1/(-2.19 + 3.77 e^{-T_G})$  ( $r^2 = 0.89$ ).

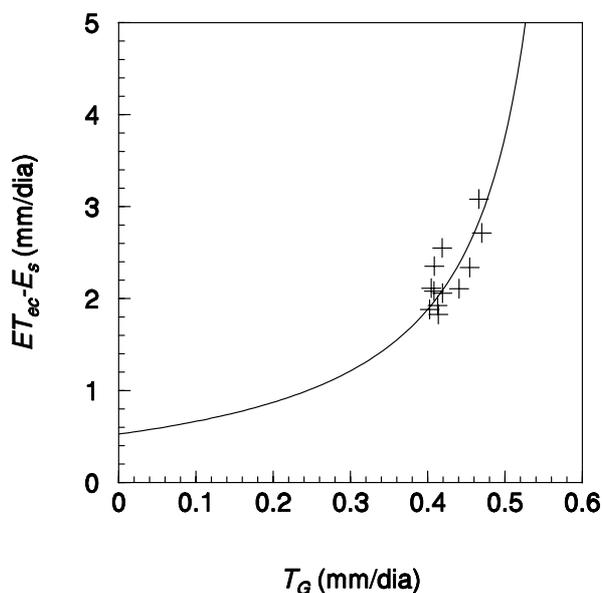


Figura V.2 - Equação de estimativa da transpiração em função da medição pelo método de *Granier*, em 1999:  
 $ET_{ec} - E_s = 0.75/(-1.69 + 3.38 e^{-(T_G+0.08)})$  ( $r^2 = 0.95$ ).

Utilizou-se a equação V.2 para estimar a transpiração aproximadamente para um período idêntico ao utilizado no ano anterior com a equação V.1. A Figura V.3 (a) apresenta os valores estimados e medidos de  $ET_{ec}-E_s$  para 1998, verificando-se uma boa concordância. O conjunto de valores medidos de  $ET_{ec}-E_s$ , representados na Figura V.3, foi o conjunto de dados utilizado para o estabelecimento da regressão, tendo-se procedido desta forma não para

mostrar a adequação da relação em termos gerais, mas para alongar a série de dados, cálculo necessário no âmbito do trabalho, e para evidenciar que a gama de valores é semelhante. Para o período de medições considerado, a diferença entre a transpiração estimada e medida é em média de 7%. Utilizando a equação V.2 e as estimativas de  $E_s$  obtidas em IV.3, obtém-se a transpiração estimada para o período experimental, em 1999 (Figura V.3 (b)). Nesse ano, a diferença entre  $ET_{ec}-E_s$  estimado desta forma e estimado a partir das medições de  $ET_{ec}$  e da estimativa de  $E_s$  é, em média, cerca de 9%.

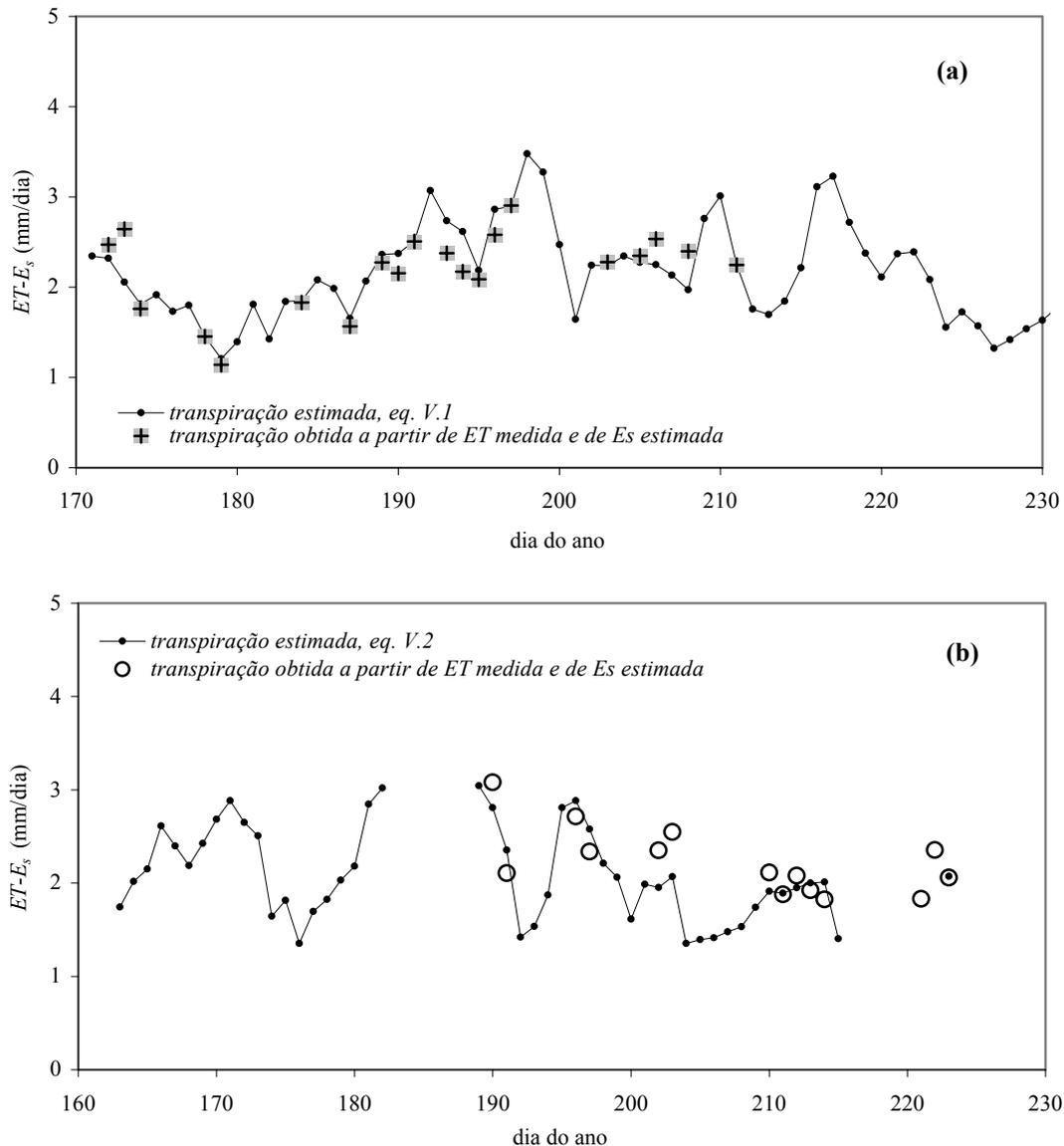


Figura V.3 – Transpiração diária ( $ET_{ec}-E_s$ ) estimada a partir das medições de fluxo de seiva pelo método de Granier e obtida a partir da medição de  $ET$  e estimativa de  $E_s$  (equações V.1 e V.2), respectivamente para 1998 (a) e 1999 (b).

A Figura V.4 mostra a  $ET$  estimada para as condições do pomar estudado, a partir dos modelos propostos para a estimativa da transpiração (equações V.1 e V.2, propostas na secção

V.1) e da evaporação do solo (secção IV.3). A *ET* média estimada foi igual a 2.26 mm/dia, em 1998 e 1.89 mm/dia em 1999, para os períodos considerados na Figura V.4. Adiante (secção V.4) apresentam-se os coeficientes culturais diários obtidos a partir da *ET* estimada por este processo.

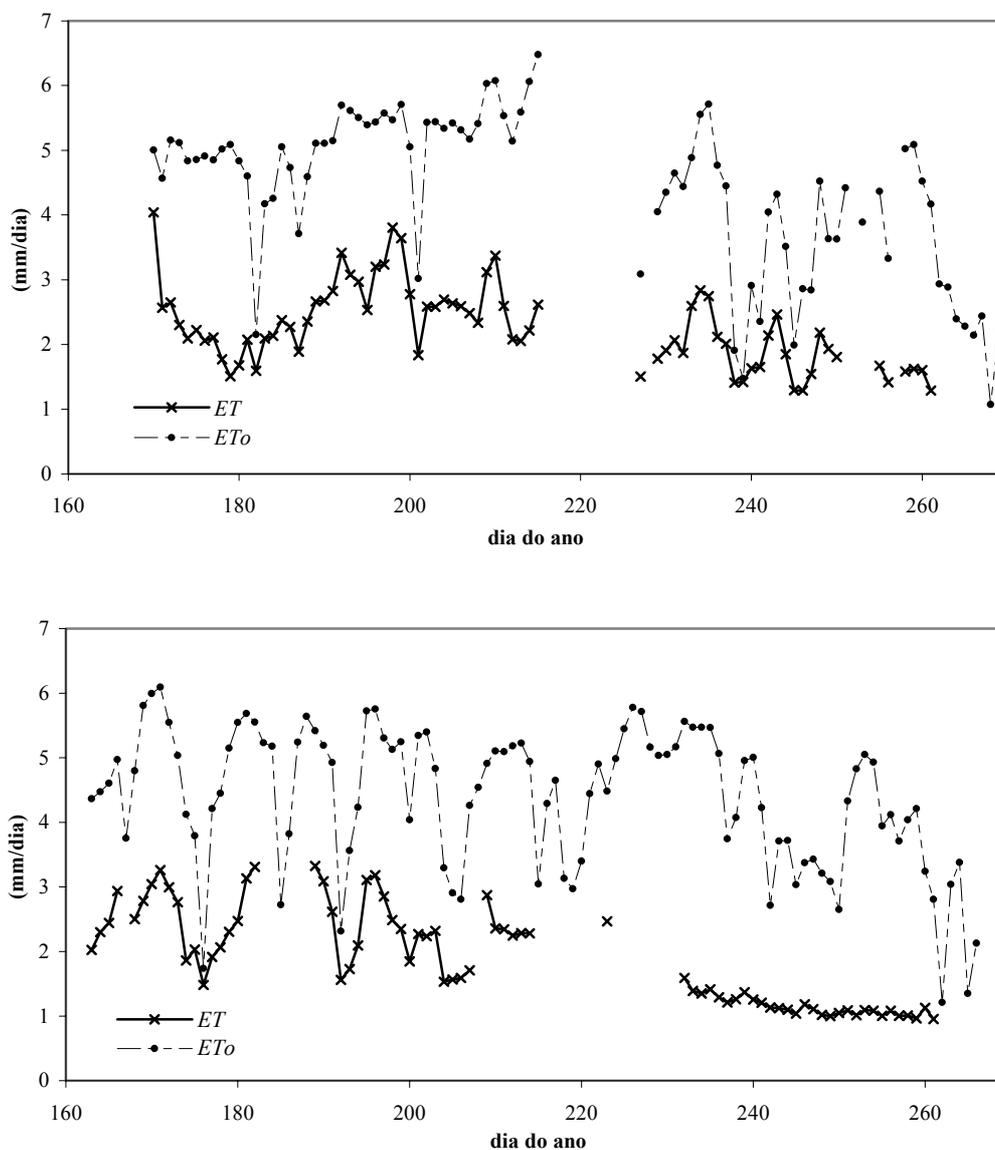


Figura V.4 – Estimativa da evapotranspiração a partir da medição de fluxo de seiva pelo método de *Granier*, pelos modelos propostos e evapotranspiração de referência, (a) 1998, (b) 1999.

## V.2. Relação entre a *ET* relativa e a *ET* acumulada desde a última rega

A razão entre a *ET* real e a *ET* máxima (ou *ET* relativa) de uma cultura regada fornece um coeficiente designado por coeficiente de secura ( $K_s$ ). Este coeficiente pode ser aplicado em situações de défice hídrico, para conhecer a *ET* da cultura (conhecidos  $ET_o$  e  $K_c$ ), por

exemplo, quando se pretende utilizar uma rega deficitária intencionalmente (*RDI* – ver II.1). Se um valor crítico de  $K_s$  fôr conhecido para uma situação concreta, é possível saber qual a quantidade de água a aplicar, inferior à que seria necessária se a *ET* fosse máxima, permitindo assim poupar alguns recursos. Este tipo de relação foi proposto e estudado por Ferreira-Gama (1987), Ferreira *et al.*, 1989 e por Ferreira e Valancogne (1997), neste último caso para a mesma espécie e em condições idênticas às do presente estudo, exceptuando o sistema de rega e a frequência da mesma (rega por aspersão com intervalos de três a quatro dias). Ferreira e Valancogne (1997) demonstraram a utilidade de um modelo simples de programação da rega, utilizando um  $K_s$  determinado para as condições experimentais do estudo que desenvolveram em pomar de pessegueiro, em que a cadência das regas impunha um défice hídrico moderado. Um dia após a rega existia já uma redução de 5% na *ET*, realizando-se a rega seguinte apenas quando esse decréscimo atingia cerca de 20%. Nas condições da Atalaia, Montijo, a rega diária e a quantidade de água aplicada mantiveram durante grande parte do tempo a cultura em condições de conforto hídrico. No entanto, observou-se que a indução deliberada de défice hídrico foi praticada pelo proprietário no fim do Verão, em 1999, como forma de controlo do crescimento vegetativo. Sendo a relação entre a depleção de água do solo e  $K_s$  útil no âmbito da gestão dos recursos hídricos, nesta ou noutras situações, optou-se por apresentar alguns elementos que permitem ajudar a caracterizá-la, a partir da análise das reacções ao *stress* hídrico, no sistema estudado.

$K_s$  pode ser calculado como a razão entre a *ET* de uma parcela submetida a *stress* hídrico e a de uma parcela em conforto hídrico. Neste caso, a *ET* das plantas nas diferentes condições hídricas foi obtida a partir dos resultados de transpiração (realizadas com o método do balanço de calor) adicionados aos da evaporação do solo estimada de acordo com os modelos propostos em IV.3. Dado que, durante o início do ciclo de *stress* utilizado para esta análise (o 2º ciclo realizado em 1998) se verificou uma falha do sistema de rega<sup>14</sup>, ocorreu uma diminuição simultânea da *ET* em ambas as parcelas. Por este motivo, utilizou-se uma referência climática ( $ET_o$ ) para corrigir os resultados, de acordo com Ferreira-Gama (1987), Ferreira *et al.* (1989) e Ferreira e Valancogne (1997).

A Figura V.5 (a) apresenta a evolução de  $K_s$  com a *ET* acumulada ( $\Sigma ET$ ), a partir do último dia de rega, durante o 2º ciclo de défice hídrico de 1998. Utilizou-se a equação V.1 para o cálculo da *ET* acumulada e considerou-se que o valor máximo de  $K_s$  corresponde à *ET* relativa do dia anterior ao início do ciclo de défice hídrico (dia do ano 191, 1998). A relação encontrada entre  $K_s$  e  $\Sigma ET$ , representada na Figura V.5 (a), é a seguinte:

$$K_s = -0.06 \Sigma ET + 1.30 \quad (V.3)$$

A Figura V.5 (b) apresenta uma comparação da equação V.3 com uma função obtida para a estimativa de  $K_s$ , em pomar de pessegueiro, por Ferreira e Valancogne (1997).

---

<sup>14</sup> A rega não ocorreu nos dias 192 e 193, tendo sido retomada no dia 194 de manhã.

Comparativamente ao estudo descrito em Ferreira e Valancogne (1997), verifica-se que, nas condições da Atalaia, Montijo,  $K_s$  decresce de forma mais rápida à medida que aumenta a depleção de água do solo: para idênticos valores de  $K_s$  observa-se uma menor depleção de água do solo (calculada como referido). Ou seja, para idênticos valores de  $\Sigma ET$ , o valor de  $K_s$  é muito inferior nesta última experiência, o que poderá estar relacionado com o facto de, neste caso, as plantas não terem desenvolvido qualquer adaptação a *stress* hídrico, mesmo moderado. Na situação experimental descrita em Ferreira e Valancogne (1997) o intervalo entre regas (3 a 4 dias) induzia nas plantas um *stress* hídrico moderado e, simultaneamente, a disposição espaçada dos aspersores<sup>15</sup> terá provavelmente originado um desenvolvimento radicular menos localizado junto à árvore, do que no caso do pomar em estudo.

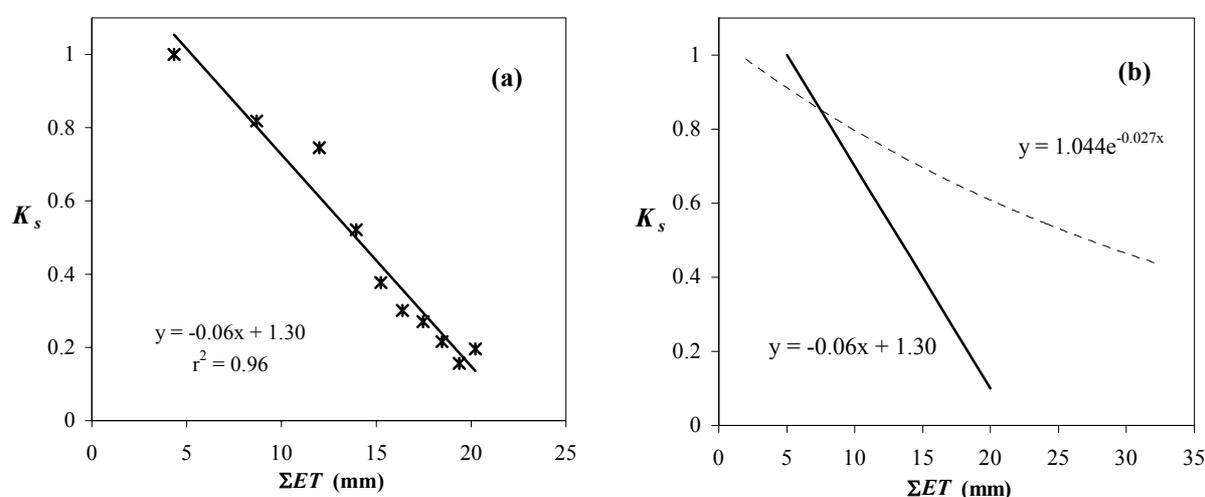


Figura V.5 – (a) Evolução de  $K_s$  com a  $ET$  acumulada ao longo do 2º ciclo de défice hídrico em 1998; (b) comparação da estimativa de  $K_s$  no dispositivo experimental de Atalaia, Montijo, durante o 2º ciclo de défice hídrico realizado em 1998, com a estimativa para pomar de pessegueiro na região de Águas de Moura, Setúbal (linha mais tênue) (Ferreira e Valancogne, 1997).

Como referido anteriormente, nas condições do pomar em estudo, constatou-se que a indução deliberada de *stress* hídrico constituía uma prática utilizada por vezes, para limitar o crescimento vegetativo no final do Verão. Quer neste contexto, quer no de uma eventual indução de *stress* hídrico moderado ao longo de todo o ciclo, a estimativa de  $K_s$ , utilizando a equação V.3, afigura-se útil para a estimativa da  $ET$  do pomar e o cálculo otimizado das necessidades de rega.

### V.3. Limiares operacionais para a programação da rega

A utilização de limiares operacionais de determinados indicadores de *stress* hídrico poderá permitir uma programação da rega otimizada em situação de défice hídrico

<sup>15</sup> Os aspersores encontravam-se colocados na linha com um afastamento entre si de cerca de 4 m e aproximadamente a 1m de distância da árvore mais próxima (Ferreira, informação pessoal).

permitindo, simultaneamente, uma simplificação do cálculo das necessidades hídricas das plantas. Da análise efectuada no capítulo IV (vd. IV.6.5) ao comportamento de alguns indicadores de défice hídrico ( $g_s$  relativa e  $\Psi_b$ , nomeadamente), foi possível detectar valores limiares desses indicadores para os quais se identifica uma alteração do comportamento das plantas e que poderão ser utilizados na programação da rega, permitindo a estimativa da  $TR$ . Como analisado no capítulo anterior, o limiar para o potencial hídrico foliar de base ( $\Psi_b$ ) foi detectado quando  $\Psi_b$  atingiu o valor de  $-0.45$  MPa, a que corresponde uma condutância estomática relativa igual a  $0.5$  (vd. IV.6.5.1).

Em condições distintas daquelas em que foi conduzido este estudo, será necessário estabelecer relações que permitam a estimativa de  $TR$  a partir de  $\Psi_b$  e  $g_s$  relativa. A  $TR$  pode ser determinada utilizando métodos de medição de fluxo de seiva, como realizado no presente estudo (vd. IV.6.4), em que se utilizou o método do balanço de calor para o efeito, dado que o método de *Granier* forneceu medições de  $TR$  menos precisas. Noutros estudos em pessegueiro (Ferreira *et al.*, 1997b; Ferreira *et al.*, 1996), o método de *Granier* tem-se revelado, no entanto, adequado para o cálculo de  $TR$ , sendo preferível a sua utilização, dada a maior simplicidade e o menor custo (como referido em II.4.2).

A determinação experimental da  $TR$ , apresenta-se como um processo mais simples que a determinação da  $ET$  relativa (ou  $K_s$ ), evitando a medição da  $E_s$  e permitindo um processo de cálculo mais expedito. No âmbito deste estudo, observou-se que  $E_s$  representava cerca de 10% da  $ET$  medida (vd. IV.3) em condições de rega diária. Para analisar a utilização de limiares operacionais no contexto deste estudo e para simplificar a determinação de  $K_s$ , considerou-se que  $TR$  corresponde de forma aproximada à  $ET$  relativa, dado que  $E_s$  assume uma fracção reduzida da  $ET$ .

Utilizando o valor limiar encontrado para  $\Psi_b$  ( $-0.45$  MPa) e a equação representada na Figura IV.93 (a) obtém-se  $TR$  de cerca de  $0.5$ . Tomando então, como exemplo,  $K_s = 0.5$ , é possível determinar pela equação V.3 uma  $ET$  acumulada, desde o início do défice hídrico, de cerca de  $13$  mm. Nestas condições, seria necessário fornecer à cultura uma rega equivalente a  $13$  mm, no momento em que  $K_s$  se iguala a  $0.5$ , se fosse escolhido o limiar  $\Psi_b = -0.45$  MPa para o desencadeamento da rega.

A utilização da equação IV.10 para estimar  $TR$ , de acordo com o procedimento proposto por Valancogne *et al.* (1997), permitiria ainda reduzir o número de medições de  $\Psi_b$  necessárias numa situação prática, dado apenas ser necessário determinar um valor para  $\Psi_{b\ max}$ , em vez de realizar medições continuadas. Neste caso, a  $TR$  estimada para o limiar  $\Psi_b = -0.45$  MPa seria cerca de  $0.6$  (valor um pouco mais elevado que o valor de  $TR$  obtido pela equação referida no parágrafo anterior,  $TR = 0.5$ ). Pela equação V.3, para  $TR = 0.6$  obtém-se uma  $ET$  acumulada igual a cerca de  $12$  mm.

#### V.4. Medição e estimativa de coeficientes culturais

Os coeficientes culturais diários, obtidos a partir das medições efectuadas com o método das flutuações instantâneas ( $K_{c\ ec}$ ), são os apresentados na Figura V.6. Os valores mínimos encontrados foram semelhantes nos dois anos, enquanto que os máximos registaram uma maior diferença: em 1998,  $K_{c\ ec}$  variou entre 0.43 e 0.58 e, em 1999, entre 0.42 e 0.66. O  $K_{c\ ec}$  médio em 1998 foi igual a 0.51 e em 1999 igual a 0.52.

A determinação de coeficientes culturais realizada num pomar da mesma região (Águas de Moura), em 1994 (Ferreira *et al.*, 1996, 1997b), forneceu valores entre 0.4 e 0.6, ou seja, numa gama muito semelhante, apesar de o método de medição da  $ET$  ser diferente (medição da transpiração pelo método do balanço de calor e medição da evaporação do solo com microlisímetros, com a obtenção de valores da  $ET$  total muito próximos da  $ET$  medida pelo método das flutuações instantâneas, durante um período curto).

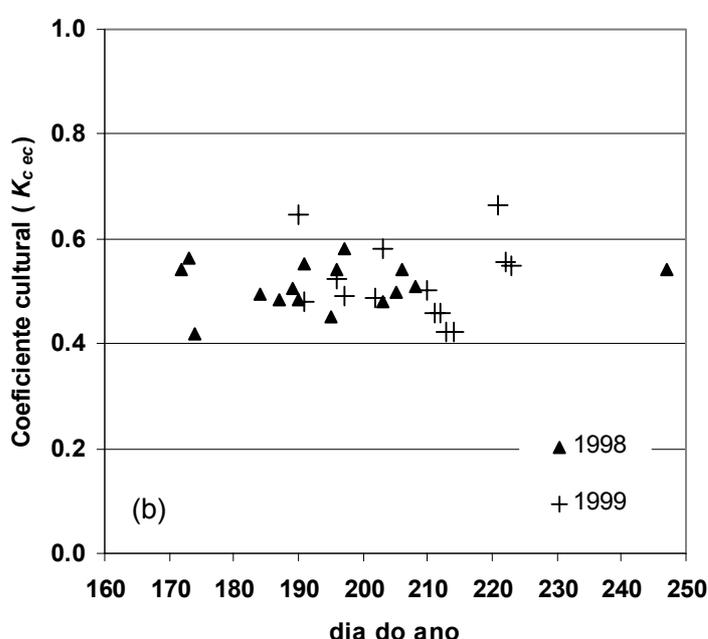


Figura V.6 – Coeficientes culturais obtidos a partir das medições de  $ET$  com o método das flutuações instantâneas ( $K_{c\ ec}$ ).

As estimativas de  $ET$  ao longo do ciclo vegetativo, obtidas para o pomar em estudo, a partir dos modelos empíricos estabelecidos em V.1 para a transpiração (equações V.1 e V.2) e em IV.3 para a  $E_s$  (Figura IV.33 e IV.34) foram utilizadas para o cálculo diário de coeficientes culturais (Figura V.7). Os coeficientes culturais oscilaram entre 0.3 e 1, para os períodos entre o dia do ano 170 e 261 em 1998 e 163 e 223 em 1999, com um valor médio de cerca de 0.5. Para o mês de Julho,  $K_c$  variaria aproximadamente entre 0.4 e 0.7, sendo, em média, próximo de 0.5, em ambos os anos.

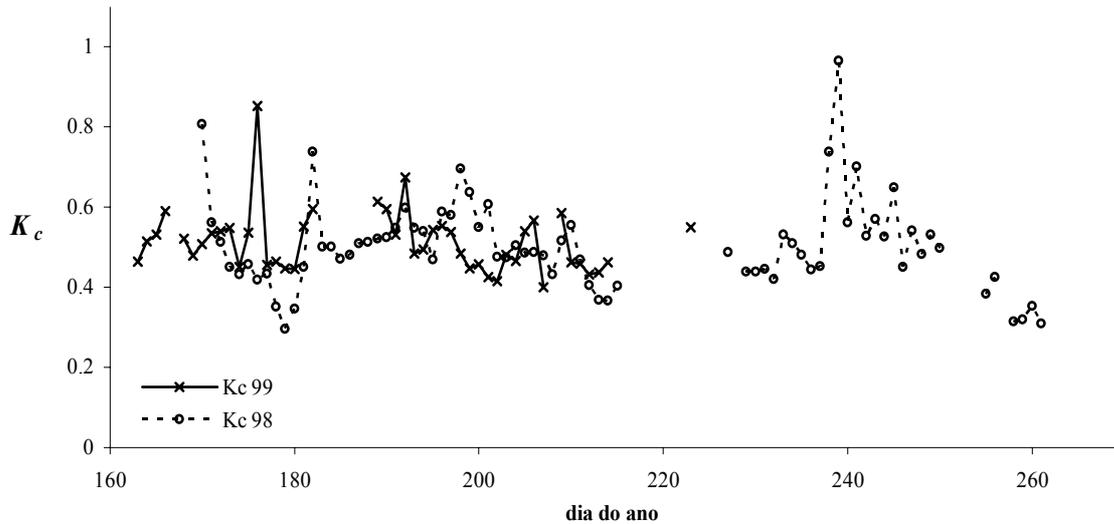


Figura V.7 – Coeficientes culturais estimados a partir dos modelos empíricos de estimativa da transpiração e da evaporação do solo, desenvolvidos para o pomar em estudo (vd. V.1, equações V.1 e V.2, e IV.3, Figuras IV.33 e IV.34).

Procedeu-se também à estimativa da  $ET$  do pomar utilizando o cálculo da evapotranspiração de referência e de coeficientes culturais, de acordo com Allen *et al.* (1998), método vulgarmente conhecido por FAO 56 (vd. II.5.1). No âmbito desta metodologia, o processo usado para estimar a evapotranspiração cultural ( $ET_c$ ) diferiu do processo geral, dado o pomar na Atalaia ter algumas características particulares, que levam a que seja classificado como uma cultura esparsa (vd. III.11). O coeficiente cultural basal ( $K_{cb}$ ) foi então estimado a partir do grau de cobertura do solo (obtendo-se um  $K_{cb}$  ajustado –  $K_{cb\ adj}$ ), em vez de ser usado um valor tabelado. Foi estimado um  $K_{cb\ adj}$  de cerca de 0.66 (0.67 e 0.65 para os períodos considerados em 1998 e 1999, respectivamente). O componente do  $K_c$  relativo à evaporação do solo ( $K_e$ ) foi em média 0.056 e a evaporação do solo ( $E_i$ ) média, estimada como  $E_i = K_e ET_o$ , foi de cerca de 0.28 mm/dia nos dois anos. O coeficiente cultural ( $K_c$ ) médio estimado para a cultura foi de cerca de 0.72 (Figura V.8). Os coeficientes culturais diários estimados pela metodologia FAO 56 foram, em média, cerca de 44% superiores aos medidos pelo método das flutuações instantâneas.

A correlação entre  $ET_c$  e  $ET_{ec}$  (Figura V.9) apresentou a forma  $ET_{ec} = 0.71 ET_c^{1.01}$  ( $r^2 = 0.73$ ), dizendo respeito à informação obtida para 1998 e 1999 (neste último ano consideraram-se as medições até ao dia 203).

Apesar de os coeficientes culturais determinados pelas duas vias referidas ( $K_{c\ ec}$  e  $K_c$ ) não serem coincidentes, encontram-se mais próximos do que quando a estimativa é obtida a partir dos valores tabelados em Doorenbos e Pruitt (1977). Nestas tabelas, o  $K_c$  aconselhado é próximo de 0.9 e aplica-se a pomares com um grau de cobertura do solo de cerca de 70%. Em Doorenbos e Pruitt (1977) é feita uma referência a outras condições culturais, tais como o caso de pomares jovens, com um grau de cobertura do solo reduzido, em que, para uma cobertura mínima (20%) a máxima redução no  $K_c$  (35%) leva à obtenção de um valor final de  $K_c$  igual a 0.75, que é ainda elevado quando consideramos o  $K_c$  medido nas condições do

presente trabalho. No que diz respeito à rega gota-a-gota, também em pomares jovens, mas para solos arenosos com cerca de 30% de cobertura do solo, é referida uma possível redução na  $ET_c$  até 60%. As condições na Atalaia apresentam algumas semelhanças com esta última situação. No entanto, as árvores encontravam-se já em estado de plena maturação, não se prevendo qualquer aumento do grau de cobertura do solo.

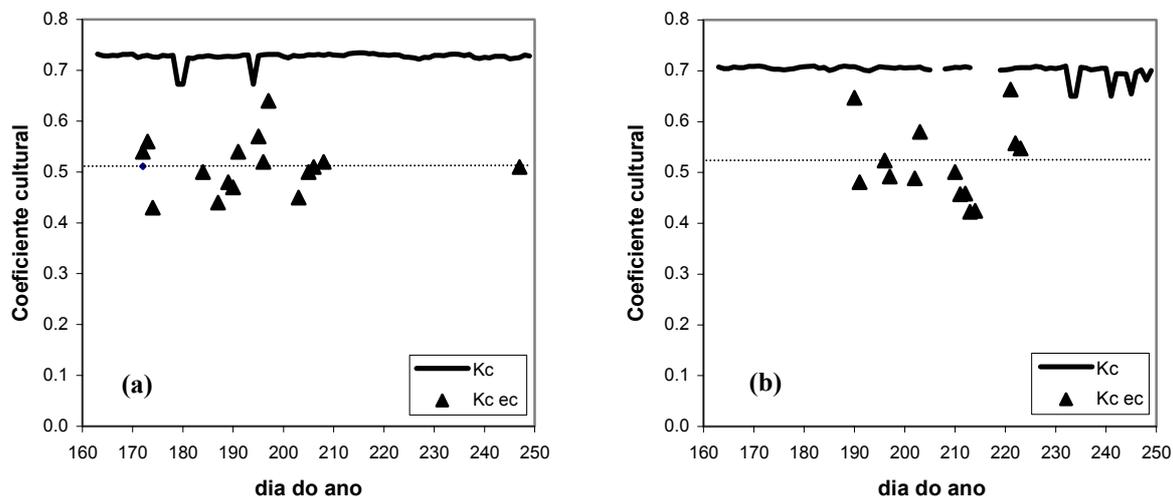


Figura V.8 – Coeficientes culturais: medição no pomar em estudo, utilizando o método das flutuações instantâneas ( $K_{c\ ec}$ ) e estimativa utilizando a metodologia FAO 56 (Allen *et al.*, 1998); as linhas ponteadas representam a média de  $K_{c\ ec}$ ; (a) 1998; (b) 1999.

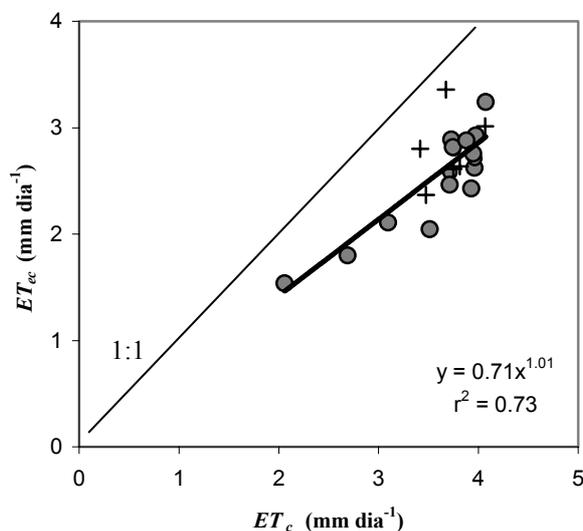


Figura V.9 – Comparação entre a evapotranspiração cultural estimada de acordo com a metodologia FAO 56 ( $ET_c$ ) e medida pelo método das flutuações instantâneas ( $ET_{ec}$ ); ● 1998, + 1999.

A evaporação do solo, estimada pela abordagem FAO 56,  $E_i$ , mostra uma razoável concordância com os resultados obtidos a partir das medições realizadas com microlisímetros (Figura V.10). Não foram considerados dias a seguir à ocorrência de chuva.

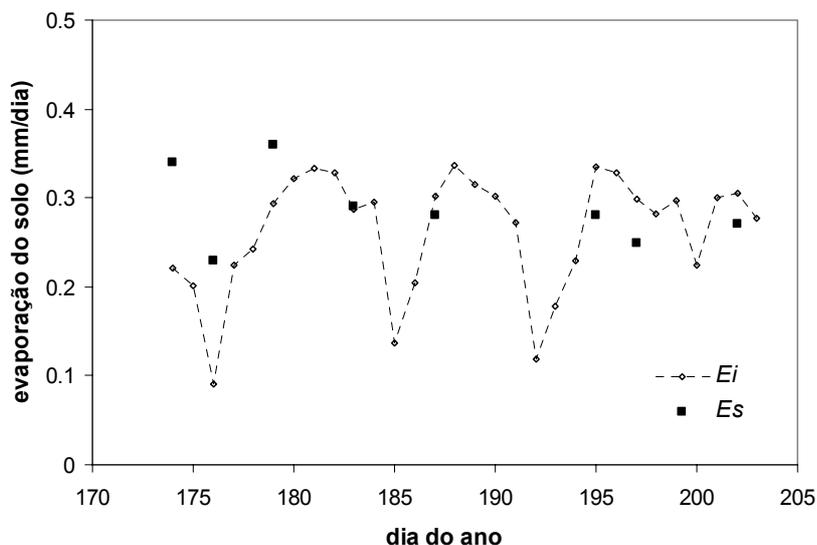


Figura V.10 – Evaporação do solo medida ( $E_s$ ) e estimada de acordo com Allen *et al.* (1998) ( $E_i$ ).

Se a estimativa de  $E_s$  é adequada, a sobrestimativa observada para o  $K_c$  é provavelmente explicada por um componente demasiado elevado associado à transpiração. Medições diárias simultâneas de  $E_s$  com microlisímetros e de  $ET_{ec}$  mostraram que a evaporação do solo representa cerca de 10% da  $ET_{ec}$  (vd. IV.3). Tal indica que o valor médio de  $K_{cb}$  deveria situar-se provavelmente perto de 0.45, dado que o  $K_{c\ ec}$  médio é próximo de 0.5. Propõe-se assim considerar uma redução de  $K_{cb\ adj}$ , revendo o cálculo do ajustamento (equação III.7). Uma forma de reduzir  $K_{cb\ adj}$  será reduzir o valor a considerar para  $K_{cb\ full}$ . A forma de cálculo proposta em Allen *et al.* (1998) usa um valor estimado de  $K_{cb}$  máximo como  $K_{cb\ full}$ . Sugere-se assim a utilização de um valor de  $K_{cb\ full}$  próximo do valor máximo de  $K_{cb}$  medido no local para as nossas condições. O  $K_{cb}$  obtido a partir de  $ET_{ec}$  (considerando que o componente da evaporação do solo no  $K_{c\ ec}$  é próximo de 10% de  $ET_{ec}$ ) varia entre 0.38 e 0.59, para o período de medições considerado em 1998 e 1999. Se considerarmos o valor máximo (0.59) para  $K_{cb\ full}$ ,  $K_{cb\ adj}$  será então 0.48, produzindo estimativas de  $ET_c$  que mostram uma melhor concordância com  $ET_{ec}$  (Figura V.11), dado que o  $K_c$  estimado (cerca de 0.54) se aproxima então dos valores medidos.

A estimativa da  $ET$  para períodos alargados, baseada nos coeficientes culturais obtidos utilizando a metodologia FAO 56 originou, em média, valores totais cerca de 35% superiores às necessidades hídricas médias do pomar em estudo, determinadas pela medição da  $ET$  pelo método das flutuações instantâneas. A modificação do processo de cálculo sugerida (para a utilização da metodologia FAO 56 nas condições do pomar de pessegueiro em estudo), permite reduzir esta diferença em ambos os anos considerados, verificando-se, neste caso, um erro médio de cerca de 9% (relativamente aos dias em que  $ET_{ec}$  foi medida).

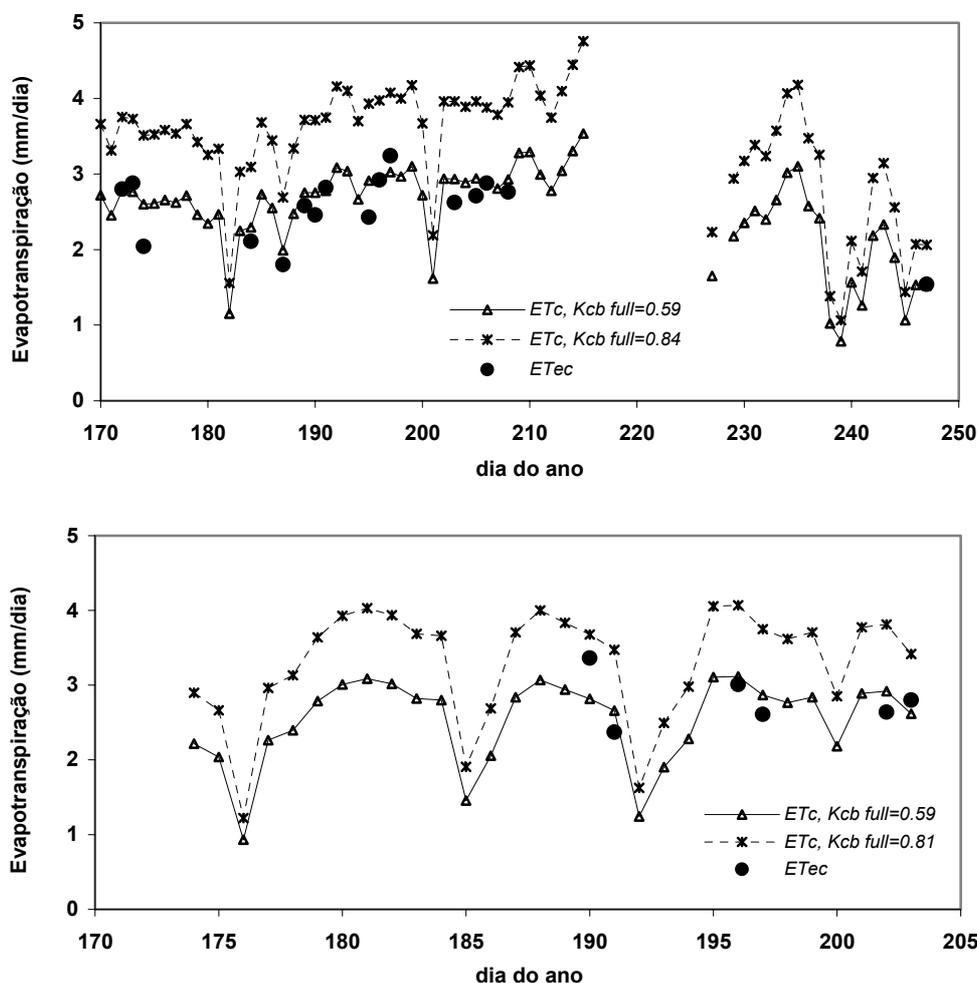


Figura V.11 – Evapotranspiração da cultura medida ( $ET_{ec}$ ), estimada por Allen *et al.* (1998) ( $ET_c$  com  $K_{c\ full}=0.84$  para 1998 e 0.81 para 1999) e estimada pela mesma metodologia com um valor de  $K_{cb\ full}$  ajustado à cultura ( $ET_c$  com  $K_{c\ full}=0.59$ ); (a) 1998, (b) 1999.

## V.5. Optimização das técnicas de programação da rega face aos resultados encontrados

### V.5.1. Utilização de coeficientes culturais e da evapotranspiração de referência

Como se mostrou na secção anterior, se a programação da rega for feita com base no procedimento clássico que utiliza um coeficiente cultural e o cálculo da  $ET_o$  (de acordo com Allen *et al.*, 1998) verifica-se uma sobrestimativa das necessidades de rega de cerca de 35%, em relação à  $ET$  medida. O consumo adicional de água, utilizando este tipo de estimativa, equivaleria, em média, a cerca de 1500 m<sup>3</sup>/ha/ano (no caso concreto da exploração agrícola em estudo, com cerca de 60 ha, a cerca de 9 x 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/ano no total).

Como forma de melhorar as estimativas produzidas por esta metodologia, em condições idênticas às do pomar estudado, propõe-se uma alteração no cálculo do coeficiente

cultural basal,  $K_{cb}$ , tendo por base os valores obtidos localmente. Esta alteração permite uma adequação muito razoável da  $ET$  estimada à medida localmente (secção V.4), tornando o método de estimativa mais preciso.

Em síntese, poderá salientar-se que, para realizar a estimativa da  $ET$  para o pomar em estudo, se obtida a partir do conhecimento da  $ET_o$  e de coeficientes culturais, se poderá utilizar um  $K_c$  médio igual a 0.5 (meio do ciclo vegetativo), conforme determinado experimentalmente. Para a estimativa da  $ET$  utilizando a metodologia desenvolvida por Allen *et al.* (1998), sugere-se a introdução de uma correcção no cálculo, descrita anteriormente nesta secção, de forma a aproximar a  $ET_c$  da  $ET$  real.

### V.5.2. Utilização dos modelos empíricos propostos

Os modelos estabelecidos para a estimativa da  $ET$  do pomar, tendo por base a medição do fluxo de seiva (vd. V.1 - equações V.1 e V.2 - e IV.3 - Figura IV.33 e IV.34) permitiram obter os resultados apresentados em V.1 (Figura V.4). De acordo com estas estimativas, o consumo hídrico das plantas no mês de ponta, considerado o mês de Julho, foi igual a 824 m<sup>3</sup>/ha em 1998 e a 732 m<sup>3</sup>/ha no ano seguinte. As necessidades hídricas orientativas, indicadas para esta cultura pelo Instituto de Desenvolvimento Rural e Hidráulica, para a mesma cultura, resumem-se na Tabela V.1. As zonas referidas são as que se encontram geograficamente mais próximas da região onde decorreu o trabalho experimental – Atalaia, Montijo - e para as quais existem dados disponíveis.

Tabela V.1 – Necessidades úteis de água para rega em pessegueiro (fonte: IDRHa, 2002; URL: <http://www.idrha.min-agricultura.pt>).

Região	Necessidades anuais (m <sup>3</sup> /ha)	Necessidades no mês de ponta (Julho) (m <sup>3</sup> /ha)
Ribatejo e Oeste	4600	1300
Alentejo*	8700	2200

\*indicado para prunóideas em geral.

Considerando para a Atalaia, Montijo, necessidades hídricas médias durante o mês de ponta iguais a 800 m<sup>3</sup>/ha, é possível constatar uma sobrestimativa nos valores indicados na Tabela V.1. Na Atalaia, a quantidade de água necessária para cobrir as necessidades hídricas das plantas durante esse mês corresponde a cerca de 60% e 40% do aconselhado para as regiões do Ribatejo e Oeste e do Alentejo, respectivamente.

Mediante as estimativas de  $ET$ , obtidas pelas equações propostas (equações V.1 e V.2 e Figuras IV.33 e IV.34), é possível verificar que a eficiência da rega, obtida por comparação das necessidades hídricas das plantas (Figura V.4) e da quantidade de água aplicada pela rega, foi, em média, 72% e 54%, considerando os períodos em que decorreram os ensaios experimentais, em 1998 e 1999, respectivamente. Considerando apenas o mês de ponta, Julho,

verifica-se que a eficiência da rega durante este mês foi igual a 69% em 1998 e a 48% no ano seguinte. De acordo com Raposo (1996), a eficiência de um sistema de rega gota-a-gota relativamente bem concebido e a funcionar em boas condições é, em média, de 90%, valor que não é atingido, em geral, nas condições deste pomar. Tal poderá resultar de uma avaliação pouco precisa das necessidades hídricas da cultura, a par de perdas por percolação importantes, dada a natureza arenosa do solo.

A Figura V.12 apresenta uma comparação entre a quantidade de água aplicada na rega e a utilizada na evapotranspiração. Ao observar a Figura V.12 será de salientar que, em 1999, a partir do dia 216 (4 de Agosto) e comparativamente ao ano anterior, a rega foi bastante reduzida, sendo as dotações aplicadas inferiores à *ET*. Esta redução foi introduzida com o objectivo de limitar o crescimento vegetativo das árvores e em função das condições ambientais. Significou que, em média, durante este período, foi fornecida pela rega uma quantidade de água equivalente a cerca de 64% da *ET* do período correspondente, o que implica o recurso à água armazenada no solo no fim da Primavera.

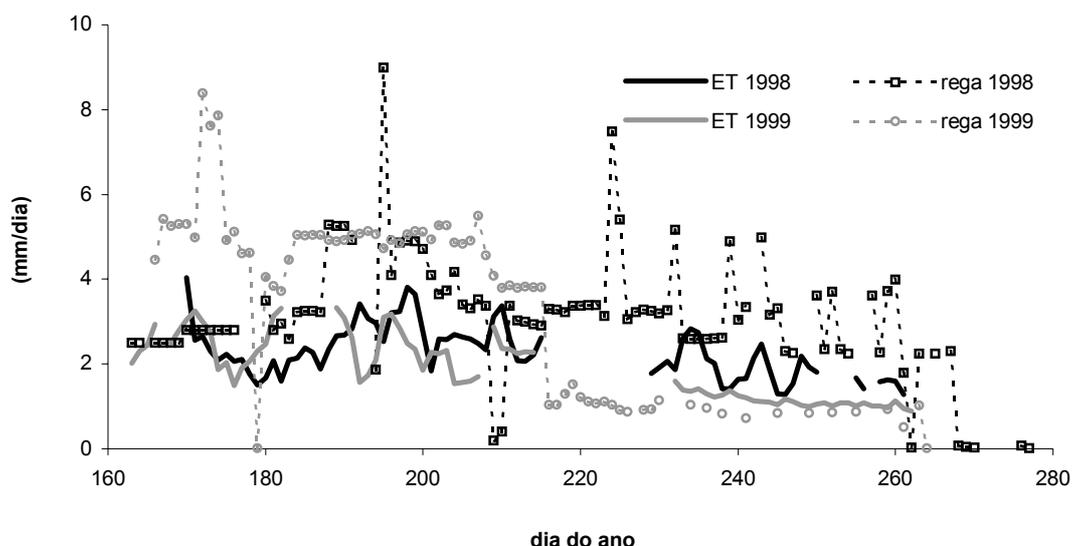


Figura V.12 – Recursos hídricos mobilizados para a rega e para a evapotranspiração do pomar.

A estimativa da transpiração mediante a utilização dos modelos propostos pressupõe a realização de medições locais de fluxo de seiva pelo método de *Granier*, o conhecimento do perfil de distribuição da densidade de fluxo de seiva e o conhecimento da equação de regressão com a *ET* medida (equações V.1 e V.2). A estimativa da evaporação do solo, também de acordo com os modelos propostos (modelos A e B, Figuras IV.33 e IV.34), requer o cálculo da  $ET_o$  e o conhecimento do factor de ajustamento em função da energia disponível à superfície do solo. A estimativa de  $E_s$  poderá ser simplificada optando pela equação II.19, adequando-a às condições do pomar (vd. IV.3), sendo necessário apenas o cálculo de  $ET_o$ .

Este procedimento de estimativa da *ET* afigura-se passível de ser melhorado e simplificado, se se ultrapassarem as dificuldades relativas à calibração do método de *Granier*

na realização de medições de fluxo de seiva. Ultrapassada esta questão, seria possível a construção e validação de um modelo de estimativa que evitasse posteriormente a realização de medições de *ET* pelo método das flutuações instantâneas, sendo apenas necessário o recurso a medições de fluxo de seiva. Actualmente as técnicas de medição de fluxo de seiva apresentam alguma tendência para se generalizarem, existindo iniciativas a nível da comercialização com potencial interesse. Esta poderá ser uma alternativa plausível para a estimativa da *ET* neste tipo de coberto descontínuo. A metodologia utilizada apresenta também interesse para justificar o alargamento do campo de experimentação a outros cobertos arbóreos e a outras condições edafo-climáticas.



## VI. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objectivos principais a quantificação do consumo hídrico do pomar durante períodos prolongados, a monitorização do uso da água e de indicadores de carência hídrica da cultura e a análise da adaptabilidade das técnicas envolvidas, tendo em vista otimizar a programação da rega.

O método de medição de fluxo de seiva de *Granier* revelou-se útil para a aquisição de informação sobre a transpiração durante períodos de tempo prolongados, dados que serviram de base à concepção, à calibração e à utilização de modelos empíricos de estimativa da evapotranspiração. Para a obtenção dos modelos, utilizou-se como referência a medição da evapotranspiração, pelo método das flutuações instantâneas. O método das flutuações instantâneas, dado o grau de conhecimentos que a sua utilização requer e dada a sofisticação dos sensores, não se adequa a um uso de rotina no âmbito das actividades agrícolas, da extensão rural ou mesmo do planeamento. No entanto, permite a medição directa dos fluxos de vapor de água provenientes do coberto com bastante precisão, se forem respeitadas as condições de aplicação do método e se se realizar uma cuidada selecção e validação dos dados. Utilizando as potencialidades complementares do método das flutuações instantâneas e do método de *Granier*, ou seja, a precisão do primeiro, aliada à facilidade de utilização, ao relativo baixo custo e à capacidade de automatização do segundo, foi possível realizar estimativas da evapotranspiração para o pomar em estudo, durante períodos longos.

A medição directa da transpiração pelo método de *Granier* utilizando a equação de calibração original mostrou uma subestimativa importante, pelo que as medições realizadas com este método não foram utilizadas em valor absoluto para a determinação directa da evapotranspiração, nem para a obtenção da transpiração relativa. Aplicou-se uma técnica inovadora de determinação do fluxo de transpiração, recorrendo ao conhecimento do perfil radial de distribuição de fluxo de seiva o que acentuou ligeiramente a subestimativa. Parece assim existirem outras razões, além da localização do sensor, para as discrepâncias observadas. Tal poderá estar relacionado com a disrupção dos tecidos no ponto de inserção, provocando alguma descontinuidade no fluxo e afectando o processo de convecção (transporte de calor), com o necrosamento dos tecidos na zona envolvente das sondas, com uma condução de calor de forma não homogénea ou outra razão não compreendida. No que diz respeito à calibração do método, esta tem sido considerada independente da espécie em estudo. Porém, actualmente, existem estudos que questionam este aspecto. Constatou-se que, quer a partir destes resultados, quer numa análise crítica da bibliografia em geral, aparentemente, nenhum dos métodos de medição de fluxo de seiva pode ser utilizado independentemente de uma comparação com um método de referência, sendo a subestimativa para valores elevados de transpiração uma situação frequente.

Mediante a utilização dos modelos de estimativa da evapotranspiração, desenvolvidos no âmbito deste estudo, a determinação das necessidades hídricas das plantas para o mês de ponta, considerado o mês de Julho, foi, em média, de cerca de 800 m<sup>3</sup>/ha. Durante o mesmo

período, o coeficiente cultural foi, em média, cerca de 0.5. Os valores de  $K_c$  medidos confirmam os encontrados anteriormente, em condições semelhantes, numa região próxima. Para os períodos em que decorreram os ensaios experimentais a evapotranspiração média diária, estimada pelos modelos propostos, foi de cerca de 2 mm/dia.

A estimativa da evapotranspiração por um processo clássico, utilizando a evapotranspiração de referência e os coeficientes culturais calculados como sugerido pelo *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*, apresentou valores mais elevados (cerca de 35%, em média, para um período de medições alargado) que os obtidos em medições no campo. A componente do coeficiente cultural que contabiliza a evaporação do solo, estimada e medida, era similar, o que indica uma provável discrepância na componente do coeficiente cultural correspondente à planta. Embora a abordagem usada (estimativa do coeficiente cultural basal para uma situação de vegetação esparsa), pareça ser adequada para as condições da cultura, foram encontradas melhores estimativas considerando uma alteração dos parâmetros usados, baseada em medições obtidas no pomar.

O balanço de energia da superfície mostrou que o fluxo de calor sensível para o solo assumia uma fracção importante do balanço da radiação no período analisado (em Junho e Julho, cerca de 1/20 para períodos de 24 horas, cerca de 1/5 para períodos diurnos e cerca de 1/3 a meio do dia), não podendo ser desprezado neste contexto. Com efeito, uma quantidade significativa de energia atingia a superfície do solo que apresentava uma área exposta apreciável (71%). A importância destas condições na evaporação do solo foi, no entanto, atenuada pela localização das áreas humedecidas pela rega numa zona restrita e sombreada. A evaporação do solo, durante os períodos considerados, aproximou-se de 0.3 mm/dia, correspondendo em média a 15 % da  $ET$  e 9 % da  $ET_o$  estimadas.

Face à indução de *stress* hídrico, as plantas apresentaram um comportamento anisohídrico, embora não muito pronunciado, pelo que o potencial hídrico foliar mínimo se revelou um indicador difícil de utilizar, não permitindo uma distinção muito clara entre o comportamento de plantas em conforto hídrico e o de plantas submetidas a défice hídrico. Os limiares críticos dos melhores indicadores de défice hídrico analisados (condutância estomática e potencial hídrico foliar de base) mostraram-se concordantes com os observados em estudos anteriores para a mesma espécie. A condutância estomática relativa e o potencial hídrico foliar de base mostraram-se não só indicadores sensíveis, como também tendo uma resposta comparável. O comportamento destes indicadores, observado em conjunto com a transpiração relativa, mostrou uma variação coordenada. Para as condições deste estudo, a estimativa da transpiração relativa a partir da medição do potencial hídrico foliar de base, revelou-se uma opção interessante para a programação da rega, sobretudo em contexto de rega deficitária.

Em conclusão, quantificou-se a evapotranspiração e respectivas componentes, tendo-se analisado a relação com a  $ET_o$  e determinado os coeficientes culturais. Selecionaram-se as melhores variáveis indicadoras de *stress* hídrico e analisaram-se os limiares críticos a elas associados. Sobretudo, realizou-se uma análise crítica dos procedimentos usados, referindo

dificuldades e limitações e sugerindo vias para os ultrapassar, aspectos que complementam a obtenção de valores fundamentais (*ET*) para a gestão prática da água em agricultura regada.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo (1973). Potencial del agua en hojas de durazneros (*Prunus persica*, Batsch) como criterio para determinar frecuencia de riego. *Agricultura Técnica*, 33, 94-99.
- Allen, L.H. (1968). Turbulence and wind speed spectra within a Japanese larch plantation. *Journal of Applied Meteorology*, 7, 73-78 (citado por Valente, 1999).
- Allen, R.G. (1985). A Penman for all seasons. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112, 348-378.
- Allen, R.G. (2000). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*, 229, 27-41.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, 300 p.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., Businger, J.A., Jensen, L.J. & Quinn, F.H. (1996). Evaporation and transpiration. In: American Society of Civil Engineers New York (ed.), *Hydrology Handbook*, New York, p. 125-252.
- Améglio, T. & Cruiziat, P. (1992). Daily variations of stem and branch diameter: short overview from a developed example. In: Karalis, V. (ed.), *Mechanics of Swelling*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, p. 193-204 (citado em Améglio *et al.*, 2001).
- Améglio, T., Archer, P., Cruiziat, P., Daudet, F.A., Cohen, M., Valancogne, C. & Dayau, S. (1997). A limit in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Acta Horticulturae*, 2, 431-437.
- Améglio, T., Cochard, H. & Ewers, F.W. (2001). Stem diameter variations and cold hardiness in walnut trees. *Journal of Experimental Botany*, 52, 2135-2142.
- Améglio, T., Daudet, F., Archer, P. & Ferreira, I. (1993). Comparaison de 3 méthodes de mesure de la transpiration de jeunes arbres. *Agronomie*, 13, 751-759.
- Anderson, D.E., Verma, S.B., Clement, R.J., Baldocchi, D.D. & Matt, D.R. (1986). Turbulence spectra of CO<sub>2</sub>, water vapour, temperature and velocity over a deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81-99.
- Arya, S.P. (1988). *Introduction to Micrometeorology*. Academic Press, Inc., San Diego, California, 307 p.
- Baker & Niber (1989). An analysis of the steady-state heat balance method for measuring sap flow in plants. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48, 93-109.
- Balding, F.R., Cunninham, G.L. & Plummer, R.F. (1973). An inexpensive self-contained system for field measurements of gas exchange. *Photosynthetica*, 7, 382-386.

- Baldocchi, D.D. & Vogel, C.A. (1996). Energy and CO<sub>2</sub> flux densities above and below a temperate broad-leaved forest and a boreal pine forest. *Tree Physiology*, 16, 5-16.
- Baldocchi, D.D., Hicks, B.B. & Meyers, T.P. (1988). Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 69, 1331-1340.
- Behboudian, M.H. & Mills, T.M. (1997). Deficit irrigation in deciduous orchards. *Horticultural Reviews*, 21, 105-131.
- Berbigier, P., Bonnefond, J.M., Loustau, D., Ferreira, M.I., David, J.S. & Pereira, J.S. (1996). Transpiration of a 64 -year old maritime pine stand in Portugal. 2. evaporation and canopy stomatal conduction by an eddy covariance technique. *Oecologia*, 107, 43-52.
- Black, T.A., Gardner, W.R. & Thurtell, G.W. (1969). The prediction of evaporation, drainage and soil water storage for a bare soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, 33, 655-660 (citado em Ritchie, 1972).
- Boast, C.W. & Robertson, T.M. (1982). A "micro-lysimeter" method for determining evaporation from bare soil: description and laboratory evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 46, 689-696.
- Boesten, J.J.T.I. & Stroosnijder, L. (1986). Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 34, 75-90.
- Boland, A.M., Mitchell, P.D., Jerie, P.H. & Goodwin, I. (1993). The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach. *Journal of Horticultural Science*, 68, 261-274.
- Bonachela, S., Orgaz, F., Villalobos, F.J. & Fereres, E. (1999). Measurement and simulation of evaporation from soil olive orchards. *Irrigation Science*, 18, 205-211.
- Bond, J.J. & Willis, W.O. (1970). Soil water evaporation: first stage drying as influenced by surface residue and evaporation potential. *Soil Science Society of America Journal*, 34, 924-928.
- Braun, P. & Schmid, J. (1999). Sap flow measurements in grapevines (*Vitis vinifera* L.). 1. Stem morphology and use of the heat balance method. *Plant and Soil*, 215, 39-45.
- Braun, P., Maurer, B. & Heinermann, G. (2000). Scaling transpiration in apple orchards - meteorological versus plant based physiological measurements. *Acta Horticulturae*, 537, 45-51.
- Brown, D. & Rothery, P. (1993). *Models in biology*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England, 688 p..
- Brunel, J.P. (1989). Estimation of sensible heat flux from measurements of surface radiative temperature and air temperature at two meters: application to determine actual evaporation rate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 46, 179-191.

- Brunet, Y. (1997). La mesure des flux de vapeur d'eau. *In: Riou, C. (ed.), L'eau dans l'espace rural: la production végétale*, INRA Editions, Paris, p. 171-181.
- Brunet, Y., Laville, P., Flura, D. & Baculat, B. (1995a). La mesure des flux turbulents. *In: Actes de l'École Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Tome 1: de la plante au couvert végétale*. Département de Bioclimatologie, INRA, p. 441-459.
- Brunet, Y., Pradel, E. & Camenen, L. (1995b). Introduction aux transferts turbulents. *In: Actes de l'École Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Tome 1: de la plante au couvert végétale*. Département de Bioclimatologie INRA, p. 405-423.
- Brutsaert, W. (1982). *Evaporation into the atmosphere*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 299 p..
- Burman, R.D., Nixon, P.R., Kimberly, I.D. & Pruitt, W.O. (1980). Water requirements. *In: Jensen, M.E. (ed.), Design and operation of farm irrigation systems*, ASAE Monogr. 3, p. 189-232.
- Burrows, F.J. & Milthorpe, F.L. (1976). Stomatal conductance in the control of gas exchange. *In: Kozlowski, T.T. (ed.), Soil Water Measurement, Plant Responses, and Breeding for Drought Resistance*, Academic Press, Inc., New York, p. 103-152.
- Bussi, C., Huguet, J.G., Besset, J. & Girard, T. (1999). irrigation scheduling of an early maturing peach cultivar using tensiometers and diurnal changes in stem diameter. *Fruits-Paris*, 54, 57-66.
- Cabibel, B. & Do, F. (1991). Mesures thermiques des flux de sève dans les troncs et les racines et fonctionnement hydrique des arbres. I. analyse théorique des erreurs sur la mesure des flux et validation des mesures en présence de gradients thermiques extérieures. *Agronomie*, 11, 669-678.
- Campbell Scientific, Inc. (1993). Making eddy correlation measurements with Campbell Scientific equipment. Technical Note 4-93MP. Campbell Scientific, Logan, UT, USA, 7 p..
- Campbell Scientific, Inc. (1998). Eddy covariance system operator's manual CA27 and KH20. Revision 7/98. Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA, 28 p..
- Campbell Scientific, Ltd. (1995). KH20 Krypton Hygrometer. User Guide. Campbell Scientific Ltd., Leicestershire, UK, 6 p..
- Casa, R., Russell, G. & Lo Cascio, B. (2000). Estimation of evapotranspiration from a field of linseed in central Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104, 289-301.
- Caspari, H.W., Green, S.R. & Edwards, W.R.N. (1993). Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse, and estimated by a Penmann-Monteith model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67, 1-12.
- Cellier, P. & Brunet, Y. (1992). Flux-gradient relationships above tall plant canopies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58, 93-117.

- Cerejeira, M.J., Viana, P., Batista, S., Pereira, T., Silva, E., Valério, M. J., Silva, A., Ferreira, M. & Silva-Fernandes, A. M. (2003). Pesticides in Portuguese surface and ground waters. *Water Research*, 37, 1055-1063.
- Cermák, J. & Nadezhdina, N. (1998a). Brief review of present techniques for sap flow measurements in intact plants. *4th International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants, Zidlochovice, República Checa, 3 a 5 de Outubro de 1998*, p. 4-11.
- Cermák, J. & Nadezhdina, N. (1998b). Sapwood as the scaling parameter defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? *Annales des Sciences Forestières*, 55, 509-521.
- Cermák, J., Nadezhdina, N., Raschi, A. & Tognetti, R. (1998). Sap flow in *Quercus pubescens* and *Q. cerris* stands in Italy. *4th International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants, Zidlochovice, República Checa, 3 a 5 de Outubro de 1998*, p. 134-141.
- Chalmers, D.J. & Wilson, I.B. (1978). Productivity of peach trees: tree growth and water stress in relation to fruit growth and assimilate demand. *Annals of Botany (London) [N.S.]*, 42, 285-294 (citado em Chalmers *et al.*, 1983).
- Chalmers, D.J., Mitchell, P.D. & van Heek, L. (1981). Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density, and summer pruning. *Journal of American Society of Horticulture Science*, 106, 307-312.
- Chalmers, D.J., Olsson, K.A. & Jones, T.R. (1983). Water relations of peach trees and orchards. In: Kozlowski, T.T. (ed.), *Water deficits and plant growth*, vol.VII, Academic Press, Inc., New York, p. 197-232.
- Chanzy, A., Bertuzzi, P., Bruckler, L. & Gaudu, J.-C. (1997). Mesure de la teneur en eau et du potentiel hydrique dans le sol. In: Riou, C., Bonhomme, R., Chassin, P., Neveu, A. & Papy, F. (ed.), *L'Eau dans l'Espace Rural*, INRA, Paris, p. 143-152.
- Choudhury, B.J., Idso, S.B. & Reginato, R.J. (1987). Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 39, 283-297.
- Clearwater, M.J., Meinzer, F.C., Andrade, J.L., Goldstein, G. & Holbrook, N.M. (1999). Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, 19, 681-687.
- Cohen, M., Valancogne, C., Dayau, S., Améglio, T., ruiziat, P. & Archer, P. (1997). Yield and physiological responses of walnut trees in semiarid conditions: applications to irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 449, 273-280.
- Cohen, Y. (1994). Thermoelectric methods for measurement of sap flow in plants. In: Stanhill, G. (ed.), *Advances in Bioclimatology*, p. 63-89.
- Cohen, Y., Fuchs, M. & Green, G.C. (1981). Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant, Cell and Environment*, 4, 391-397.

- Cohen, Y., Kelliher, F.M. & Black, T.A. (1985). Determination of sap flow in Douglas-fir trees using the heat pulse technique. *Canadian Journal of Forest Research*, 15, 422-428.
- Cohen, Y., Takeuchi, S., Nozaka, J. & Yano, T. (1993). Accuracy of sap flow measurement using heat balance and heat pulse methods. *Agronomy Journal*, 85, 1080-1086.
- Conceição, N. M. S. (2001). *Evaporação directa em solo arenoso num pomar de pessegueiros com rega gota-a-gota diária*. Relatório do trabalho final de curso. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 104 p..
- Correia, M. J. C. B. (1993). *Envolvimento do ácido abscísico na regulação da abertura estomática em condições de défice hídrico*. Tese de doutoramento. Universidade do Algarve, Unidade de Ciências e Tecnologias Agrárias, Faro, 225 p..
- Correia, M.J., Rodrigues, M.L., Ferreira, M.I. & Pereira, J.S. (1997). Diurnal change in the relationship between stomatal conductance and abscisic acid in the xylem sap of field-grown peach trees. *Journal of Experimental Botany*, 48, 1727-1736.
- Daamen, C.C. & McNaughton, K.G. (2000). Modeling energy fluxes from sparse canopies and understories. *Agronomy Journal*, 92, 837-847.
- Daamen, C.C. & Simmonds, L.P. (1996). Measurement of evaporation from bare soil and its estimation using surface resistance. *Water Resources Research*, 32, 1393-1402.
- Daamen, C.C. (1997). Two source model of surface fluxes for millet fields in Niger. *Agricultural and Forest Meteorology*, 83, 205-230.
- Daamen, C.C., Dugas, W.A., Prendergast, P.T., Judd, M.J. & McNaughton, K.G. (1999). Energy flux measurements in a sheltered lemon orchard. *Agricultural and Forest Meteorology*, 93, 171-183.
- Daamen, C.C., Simmonds, J.S., Wallace, J.S., Laryea, K.B. & Sivakumar, M.V.K. (1993). Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils. *Agriculture and Forest Meteorology*, 65, 159-173.
- Daniel, C. & Wood, F.S. (1971). *Fitting equations to data*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 324 p..
- Daudet, F.-A. (1987). Un système simple pour la mesure *in situ* des échanges gazeux de couverts végétaux de quelques mètres carrés de surface foliaire. *Agronomie*, 7, 133-139.
- Daudet, F.-A., Silvestre, J., Ferreira, M.I., Valancogne, C. & Pradelle, F. (1998). Leaf boundary layer conductance in a vineyard in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89, 255-267.
- Daudet, F.-A. (1999). Use of a 3D plant/canopy structure-based model to assess the water requirements of trees and orchards. In: Ferreira, M. I. and Valancogne, C. (ed.), *Seminário Transferências Hídricas em Cobertos Vegetais Descontínuos*, 17-20 Maio 1999, Oeiras, Portugal.

- David, T. M. S. B. S. (2000). *Intercepção da precipitação e transpiração em árvores isoladas de Quercus rotundifolia Lam.*. Tese de doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 155 p..
- David, T. M. S. B. S. (1995). *Transpiração num povoamento adulto de Eucalyptus globulus Labill.* Tese de mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 152 p..
- David, T.S., Ferreira, M.I., David, J.S. & Pereira, J.S. (1997). Transpiration of an adult *Eucalyptus globulus* plantation during a spring-summer period, in central Portugal. *Oecologia*, 110, 153-159.
- Davies, W.J., Metcalfe, J., Lodge, T.A. & da Costa, A.R. (1986). Plant growth substances and the regulation of growth under drought. *Australian Journal of Plant Physiology*, 13, 105-125.
- De Lorenzi, F. & Rana, G. (2000). Sap flow transpiration measurements in a table grape vineyard growing in southern Italy. *Acta Horticulturae*, 537, 69-75.
- Decroix, M. & Puech, J. (1985). Le pilotage de l'irrigation à la parcelle. In: *Les besoins en eau des cultures*, INRA, Paris, p. 693-724.
- Denmead, O.T. & Shaw, R.H. (1962). Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agronomy Journal*, 54, 385-390.
- Denmead, O.T. (1984). Plant physiological methods for studying evapotranspiration: problems of telling the forest from the trees. *Agricultural Water Management*, 8, 167-189.
- Do, F. & Rocheteau, A. (2002). Influence of natural temperature gradients on measurements of xylem sap flow with thermal dissipation probes. 1. Field observations and possible remedies. *Tree Physiology*, 22, 641-648.
- Doorenbos, J. & Pruitt, W.O. (1977). *Crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Roma, Itália, 144 p..
- Edwards, W.R.N. & Warwick, N.W.M. (1984). Transpiration from a kiwifruit vine as estimated by the heat pulse technique and the Penman-Monteith equation. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 27, 537-543.
- Ehrler, W.L., Idso, S.B., Jackson, R.D. & Reginato, R.J. (1978). Wheat canopy temperature: relation to plant water potential. *Agronomy Journal*, 70, 251-256.
- Fabry, C. (1942). *Propagation de la chaleur*. Armand Colin, Paris (citado por Hénin, 1977).
- FAO, ISSS & ISRIC (1998). *World Reference Base for Soil Resources: Introduction*. In: Deckers, J.A.; Nachtergaele, F.O.; Spaargaren, O.C. (ed.), Acco, Leuven, 109 p..
- Fereres, E. & Goldhamer, D.A. (1990). Deciduous fruit and nut trees. In: Stewart, B.A. & Nielsen, D.R. (ed.), *Irrigation of agricultural crops*, American Society of Agronomy, Agronomy Monograph nº 30, p. 987-1017.

- Ferreira, M.I. & Katerji, N. (1992). Is stomatal conductance in a tomato crop controlled by soil or atmosphere? *Oecologia*, 92, 104-107.
- Ferreira, M.I. & Valancogne, C. (1997). Experimental study of a stress coefficient: application on a simple model for irrigation scheduling and daily evapotranspiration estimation. In: (Farkas, I., Ed.) *Proc. 2nd Intern. Symp. on Mathematical Modelling and Simulation in Agricultural and Bio-Industries*, (Maio 1997, Budapeste, Hungria).
- Ferreira, M.I. & Zitscher, H. (1996). Measurements performed with Granier method in short trunks near the soil. *3rd workshop on measuring sap flow in intact plants*, Sitges, Barcelona, Outubro 1996.
- Ferreira, M.I. (1996a). Evapotranspiração e *stress* hídrico em cobertos arbóreo-arbustivos numa perspectiva de gestão da água em região mediterrânica. *Anais do Instituto Superior de Agronomia*, 45, 343-385.
- Ferreira, M.I. (1996b). Experimental techniques for evaluation of irrigation requirements in woody crops. *Third International Carob Symposium*, Maio 1996, Tavira (Portugal).
- Ferreira, M.I., David, T.S., Pereira, J.S., David, J.S., Valancogne, C., Berbigier, P. & Loustau, D. (1997a). Evapotranspiration in several woody species of central Portugal. In: Hocevar, A. (ed.), *Proceed. 14th International Congress of Biometeorology*, Ljubljana, Slovenia, 1-8 Setembro 1996, p. 53-60.
- Ferreira, M.I., Itier, B. & Katerji, N. (1989). Estudo experimental da evolução do coeficiente de secura entre regas sucessivas. Aplicação na estimação diária da evapotranspiração real. In: *4º Simpósio Luso-brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos (SILUSB)*, p. 109-120.
- Ferreira, M.I., Pacheco, C.A., Valancogne, C., Michaelsen, J., Ameglio, T. & Daudet, F.-A. (1997b). Evapotranspiration, water stress indicators and soil water balance in a *Prunus persica* orchard, in central Portugal. *Acta Horticulturae*, 449, 379-384.
- Ferreira, M.I., Paço, T.A., Cohen, M. & Oncins, J.A. (1998). Should the radial distribution of sap flow density be considered on the calculation of total sap flow, when using Granier sensors? In: *4th International Workshop on Field Techniques for Environmental Physiology*. Almeria, Espanha, 30 Março – 5 Abril 1998 (apresentação de poster).
- Ferreira, M.I., Valancogne, C., Daudet, F., Ameglio, T., Pacheco, C.A. & Michaelsen, J. (1996). Evapotranspiration and crop-water relations in a peach orchard. In: Camp, C.R., Sadler, E.J. & Yoder, R.E. (ed.), *Proc. International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, November 3-6 1996, San Antonio, Texas, p. 61-68.
- Ferreira-Gama, M. I. F. R. (1987). *Evapotranspiração real. Estudo realizado na cultura do tomate em região de clima mediterrânico*. Tese de doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 168 p..
- Gallardo, M., Snyder, R.L., Schulbach, K. & Jackson, L.E. (1996). Crop growth and water use model for lettuce. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122, 354-359.

- Garcia, A., André, R.G.B., Ferreira, M.I. & Paço, T. (2000). Diurnal and seasonal variations of CWSI and non-water stressed baseline with nectarine trees. *Acta Horticulturae*, 537, 415-421.
- Garnier, E. & Berger, A. (1985). Testing water potential in peach trees as an indicator of water stress. *Journal of Horticultural Science*, 60, 47-56.
- Garnier, E. & Berger, A. (1986). Effect of water stress on stem diameter changes of peach trees growing in the field. *Journal of Applied Ecology*, 23, 193-209.
- Garnier, E. & Berger, A. (1987). The influence of drought on stomatal conductance and water potential of peach trees growing in the field. *Scientia Horticulturae*, 32, 249-263.
- Gash, J.H.C. (1986). A note on estimating the effect of a limited fetch on micrometeorological evaporation measurements. *Boundary Layer Meteorology*, 35, 409-413.
- Génard, M. & Huguet, J.-G. (1996). Modeling the response of peach fruit growth to water stress. *Tree Physiology*, 16, 407-415.
- Giovannini, D. & Monastra, F. (1998). Tipologie d'impianto e forme di allevamento per la peschicoltura meridionale. In: Sansavini, S. & Errani, A. (ed.), *Frutticoltura ad alta densità. Impianti, forme di allevamento e tecniche di potatura*, Edagricole, Bologna, Italia, p. 217-235.
- Girona, J., Mata, M., Fereres, E., Goldhamer, D.A. & Cohen, M. (2002). Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. *Agricultural Water Management*, 54, 107-122.
- Girona, J., Mata, M., Goldhamer, D.A., Johnson, R.S. & DeJong, T.M. (1993). Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regulated deficit irrigation scheduling in peach. *Journal of American Society of Horticulture Science*, 118, 580-586.
- Glenn, D.M., Worthington, J.W., Welker, W.V. & McFarland, M.J. (1989). Estimation of peach tree water use using infrared thermometry. *Journal of American Society of Horticulture Science*, 114, 737-741.
- Goldhamer, D.A. & Fereres, E. (2001). Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*, 20, 115-125.
- Goldhamer, D.A., Fereres, E., Mata, M., Girona, J. & Cohen, M. (1999). Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation. *Journal of American Society of Horticulture Science*, 124, 437-444.
- Gollan, T., Turner, N.C. & Schulze, E.-D. (1985). The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. *Oecologia*, 65, 356-362.
- Goulden, M.L. & Field, C.B. (1994). Three methods for monitoring the gas exchange of individual tree canopies: ventilated-chamber, sap-flow and Penman-Monteith measurements on evergreen oaks. *Functional Ecology*, 8, 125-135.

- Granier, A. & Bréda, N. (1996). Modelling canopy conductance and stand transpiration of an oak forest from sap flow measurements. *Annales des Sciences Forestières*, 53, 537-546.
- Granier, A. & Loustau, D. (1994). Measuring and modelling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71, 61-81.
- Granier, A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 42, 193-200.
- Granier, A. (1987a). Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3, 309-320.
- Granier, A. (1987b). Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Annales des Sciences Forestières*, 44, 1-14.
- Granier, A., Anfodillo, T., Sabatti, M., Cochard, H., Dreyer, E., Tomasi, M., Valentini, R. & Bréda, N. (1994). Axial and radial water flow in the trunks of oak trees: a quantitative and qualitative analysis. *Tree Physiology*, 14, 1383-1396.
- Granier, A., Bobay, V., Gash, J.H.C., Gelpe, J., Saugier, B. & Shuttleworth, W.J. (1990). Vapour flux density and transpiration rate comparisons in a stand of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Les Landes forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51, 309-319.
- Green, S.R. & Clothier, B.E. (1988). Water use of kiwifruit vines and apple trees. *Journal of Experimental Botany*, 39, 115-123.
- Green, S.R., McNaughton, K.G. & Clothier, B.E. (1989). Observations of night-time water use in kiwifruit vines and apple trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 48, 251-261.
- Greenwood, E.A.N. & Beresford, J.D. (1979). Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated chamber technique. 1. Comparative transpiration from juvenile *Eucalyptus* above saline ground-water seeps. *Journal of Hydrology*, 42, 369-382.
- Greenwood, E.A.N. & Beresford, J.D. (1980). Evaporation from vegetation in landscapes developing secondary salinity using the ventilated chamber technique. 2. Evaporation from atriplex plantations over a shallow water table. *Journal of Hydrology*, 45, 313-319.
- Gutiérrez, M.V. & Meinzer, F.C. (1994). Energy balance and latent heat flux partitioning in coffee hedgerows at different stages of canopy development. *Agricultural and Forest Meteorology*, 68, 173-186.
- Guyot, G. (1998). *Physics of the environment and climate*. Praxis Publishing, Londres, 632 p.
- Hanks, R.J. & Ashcroft, G.L. (1980). *Applied Soil Physics*. Springer-Verlag, Berlin, 159 p.
- Hatton, T.J., Catchpole, E.A. & Vertessy, R.A. (1990). Integration of sapflow velocity to estimate plant water use. *Tree Physiology*, 6, 201-209.

- Hénin, S. (1977). *Cours de Physique du Sol*. ORSTOM, Paris, 222 p.
- Horst, T.W. & Weil, J.C. (1992). Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 59, 279-296.
- Hsiao, T.C. (1990). Measurements of plant water status. In: Stewart, B.A. & Nilsen, D.R. (ed.), *Irrigation of agricultural crops*, American Society of Agronomy, Agronomy Monograph n° 30, p. 243-279.
- Huber, B. (1932). Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftstromen. *Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft*, 50, 89-109 (citado em Swanson e Whitfield, 1981).
- Huguet, J.-G., Lorendeau, J.-Y. & Pelloux, G. (1992a). Specific micromorphometric reactions of fruit trees to water stress and irrigation scheduling automation. *Journal of Horticultural Science*, 67, 631-640.
- Huguet, J.-G., Pelloux, G. & Lorendeau, J.-Y. (1992b). PEPISTA: Programmeur d'irrigation par les microvariations de diamètre de la plante. In: *Proceedings of the Workshop on Real Time Sensing and Control of Automated Irrigation Systems. ICID, 16th European Regional Conference, Budapest (Hungary), 26 June 1992* (citado em Itier et al., 1996).
- Idso, S.B. (1982). Non-water stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27, 59-70.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J. & Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55.
- INMG (1991). *Normais climatológicas da região de Ribatejo e Oeste, correspondentes a 1951-1980*. Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, Lisboa, 99 p..
- Instituto da Água (2001). *Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água. Versão preliminar*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, Lisboa, 210 p..
- Isbérie, C. (1985). Le sol: facteur primordial pour la conduite de la micro-irrigation de complément sur culture pérenne. Exemples. In: Perrier, A. & Riou, C. (ed.), *Les besoins en eau des cultures*, Conférence Internationale, Paris 11-14 Sept., INRA, Paris, p. 853-871.
- Isbérie, C. (1994). Stress hydrique et flux de sève sur cérisiers micro-irrigués ou non. In : *Séminaire L'eau dans la Vie de l'Arbre, INRA, Centre de Recherches de Clermont-FD-Theix, Avril 1994*, p. 189-209.
- Itier, B. & Brunet, Y. (1996). Recent developments and present trends in evaporation research: a partial survey. In: Camp, C.R., Sadler, E.J. & Yoder, R.E. (ed.) *International Conference on evapotranspiration and irrigation scheduling*, 3-6 Nov. 1996, San Antonio, Texas, p. 1-20.

- Itier, B., Flura, D., Belabbes, K., Kosuth, P., Rana, G. & Figueiredo, L. (1992). Relations between relative evapotranspiration and predawn leaf water potential in soybean grown in several locations. *Irrigation Science*, 13, 109-114.
- Itier, B., Katerji, N., Flura, D. & Ferreira, I. (1990). Predawn leaf water potential - application to tomato crop. *Acta Horticulturae*, 278, 101-111.
- Itier, B., Maraux, F., Ruelle, P. & Deumier, J.M. (1996). Applicability and limitations of irrigation scheduling methods and techniques. In: Smith, M., Pereira, L.S., Berengena, J., Itier, B., Goussard, J., Ragab, R., Tollefson, L. & van Hofwegen, P. (ed.), *Irrigation Scheduling: from Theory to Practice*, FAO, Rome, p. 19-32.
- Jackson, R.D., Reginato, R.J. & Idso, S.B. (1977). Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13, 651-656.
- Jagtap, S.S. & Jones, J.W. (1989). Sensitivity of crop coefficients to climate and irrigation management. *Irrigation Science*, 10, 231-244.
- Jarvis, P.G. (1985). Transpiration and assimilation of tree and agricultural crops: 'the omega factor'. In: Cannel, M.G.R. & Jackson, J.E. (ed.), *Trees as crop plants*, Institute of Terrestrial Ecology, Scotland, p. 460-480.
- Jarvis, P.G., James, G.B. & Landsberg, J.J. (1976). Coniferous forest. In: Monteith, J.L. (ed.), *Vegetation and the Atmosphere - Case studies*, Academic Press, London, p. 171-240.
- Jarvis, P.G. & McNaughton, K.G. (1986). Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. In: Macfadyen, A. & Ford, E.D. (ed.), *Advances in Ecological Research*, vol. 15, Academic Press, London, p. 1-49.
- Jimenez, M.S., Nadezhdina, N., Cermák, J. & Morales, D. (2000). Radial variation in sap flow in five laurel forest tree species in Tenerife, Canary islands. *Tree Physiology*, 20, 1149-1156.
- Johnson, R.S., Ayars, J., Trout, T., Mead, R. & Phene, C. (2000). Crop coefficients for mature peach trees are well correlated with midday canopy light interception. *Acta Horticulturae*, 537, 455-469.
- Johnson, R.S., Handley, D.F. & DeJong, T.M. (1992). Long-term response of early maturing peach trees to postharvest water deficits. *Journal of American Society of Horticulture Science*, 117, 881-886.
- Jones, H.G. (1990). Plant water relations and implications for irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 278, 67-76.
- Jones, H.G. (1992). *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. Cambridge University Press, Cambridge, 428 p.
- Jones, H.G., Hamer, P.J.C. & Higgs, K.H. (1988). Evaluations of various heat-pulse methods for estimation of sap flow in orchard trees: comparison with micrometeorological estimates of evaporation. *Trees: Structure and Function*, 2, 250-260.

- Jury, W.A., Gardner, W.R. & Gardner, W.H. (1991). *Soil Physics*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 343 p.
- Kaimal, J.C. & Finnigan, J.J. (1994). *Atmospheric Boundary Layer Flows. Their Structure and Measurement*. Oxford University Press, New York, 289 p.
- Kaimal, J.C. (1975). Sensors and techniques for direct measurement of turbulent fluxes and profiles in the atmospheric surface layer. *Atmospheric Technology*, 7, 7-14.
- Kaimal, J.C., Wyngaard, J.C., Izumi, Y. & Coté, O.R. (1972). Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 98, 563-589.
- Kalma, J.D. & Fuchs, M. (1976). Citrus orchards. In: Monteith, J.L. (ed.), *Vegetation and the Atmosphere - Case studies*, Academic Press, London, p. 309-328.
- Kanemasu, E. T., Steiner, J. L., Rasmussen, V. P., and Bagley, J. (1979). Estimating water requirements for corn with a programmable calculator. Bull.15 (revised October 1979), Agricult.experim.station, Kansas State University, Manhattan, U.S.A.
- Katerji, N. (1997). Les indicateurs de l'état hydrique de la plante. In: Riou, C., Bonhomme, R., Chassin, P., Neveu, A. & Papy, F. (ed.), *L'Eau dans l'Espace Rural*, INRA, Paris, p. 169-177.
- Katerji, N. (1982). *Étude et modélisation des transferts hydriques dans le système sol-plante-atmosphère*. Thèse Doc. en Sciences Naturelles, Université de Paris, Paris, 199 p.
- Katerji, N., Ferreira, M.I., Mastroiilli, M. & Losavio, N. (1990). A simple equation to calculate crop evapotranspiration: results of several years of experimentation. *Acta Horticulturae*, 278, 477-489.
- Katerji, N., Itier, B. & Ferreira, I. (1988). Étude de quelques critères indicateurs de l'état hydrique d'une culture de tomate en région semi-aride. *Agronomie*, 8, 425-433.
- Kelliher, F.M., Köstner, B., Hollinger, D.Y., Byers, J.N., Hunt, J.E., McSeveny, T.M., Meserth, R., Weir, P.L. & Schulze, E.-D. (1992). Evaporation, xylem sap flow, and tree transpiration in a New Zealand broad-leaved forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 62, 53-73.
- Khan, A.A.H. & Ong, C.K. (1995). Correction of systematic errors in estimates of transpiration obtained using a constant temperature heat balance technique. *Experimental Agriculture*, 31, 461-472.
- Kizer, M.A. & Elliot, R.L. (1991). Eddy correlation systems for measuring evapotranspiration. *Transactions of the ASAE*, 34, 387-392.
- Klepper, B., Browning, V.D. & Taylor, H.M. (1971). Stem diameter in relation to plant water status. *Plant Physiology*, 48, 683-685.
- Köstner, B., Falge, E.M., Alsheimer, M., Geyer, R. & Tenhunen, J.D. (1998a). Estimating tree canopy water use via xylem sapflow in an old Norway spruce forest and a

- comparison with simulation-based canopy transpiration estimates. *Annales des Sciences Forestières*, 55, 125-139.
- Köstner, B., Granier, A. & Cermák, J. (1998b). Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties. *Annales des Sciences Forestières*, 55, 13-27.
- Köstner, B., Schulze, E., Kelliher, F.M., Hollinger, D.Y., Byers, J.N., Hunt, J.E., McSeveny, T.M., Meserth, R. & Weir, P.L. (1992). Transpiration and canopy conductance in a pristine broad-leaved forest of *Nothofagus*: an analysis of xylem sap flow and eddy correlation measurements. *Oecologia*, 91, 350-359.
- Kucera, J., Cermák, J. & Penka, M. (1977). Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. *Biologia Plantarum*, 19, 413-420.
- Kuppers, M. (1984). Carbon relations and competition between woody species in a central European hedgerow. II. Stomatal responses, water use, and hydraulic conductivity in the root/leaf pathway. *Oecologia*, 64, 344-354.
- Kustas, W.P., Daughtry, C.S.T. & van Oevelen, P.J. (1993). Analytical treatment of the relationships between soil heat flux/net radiation ratio and vegetation indices. *Remote Sensing Environment*, 46, 319-330.
- Kustas, W.P., Moran, M.S., Jackson, R.D., Gay, L.W., Duell, L.F.W., Kunkel, K.E. & Matthias, A.D. (1990). Instantaneous and daily values of the surface energy balance over agricultural fields using remote sensing and a reference field in an arid environment. *Remote Sensing Environment*, 32, 125-141.
- Kustas, W.P., Prueger, J.H., Humes, K.S. & Starks, P.J. (1999). Estimation of surface heat fluxes at field scale using surface layer versus mixed-layer atmospheric variables with radiometric temperature observations. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 224-238.
- Lamaud, E., Ogée, J., Brunet, Y. & Berbigier, P. (2001). Validation of eddy flux measurements above the understorey of a pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 187-203.
- Lascano, R.J. (2000). A general system to measure and calculate daily crop water use. *Agronomy Journal*, 92, 821-832.
- Lascano, R.J., Bavel, C.H.M.v., Hatfield, J.L. & Upchurch, D.R. (1987). Energy and water balance of a sparse crop: simulated and measured soil and crop evaporation. *Soil Science Society of America Journal*, 51, 1113-1121.
- Laubach, J., Raschendorfer, M., Kreilein, H. & Gravenhorst, G. (1994). Determination of heat and water vapour fluxes above a spruce forest by eddy correlation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71, 373-401.
- Leclerc, M.Y. & Thurtell, G.W. (1990). Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis. *Boundary-Layer Meteorology*, 52, 247-258.
- Lee, X. & Black, T.A. (1993). Atmospheric turbulence within and above a douglas-fir stand. Part II: eddy fluxes of sensible heat and water vapour. *Boundary-Layer Meteorology*, 64, 369-389.

- Leung, J. & Giraudat, J. (1998). Abscisic acid signal transduction. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 49, 199-222.
- Lhomme, J.P. (1988a). Extension of Penman's formulae to multi-layer models. *Boundary-Layer Meteorology*, 42, 281-291.
- Lhomme, J.P. (1988b). A generalized combination equation derived from a multi-layer micrometeorological model. *Boundary-Layer Meteorology*, 45, 103-115.
- Loustau, D. & Cochard, H. (1991). Utilisation d'une chambre de transpiration portable pour l'estimation de l'évapotranspiration d'un sous-bois de pin maritime à molinie (*Molinia coerulea* (L) Moench). *Annales des Sciences Forestières*, 48, 29-45.
- Loustau, D., Berbigier, P., Roumagnac, P., Arruda-Pacheco, C., David, J.S., Ferreira, M.I., Pereira, J.S. & Tavares, R. (1996). Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. *Oecologia*, 107, 33-42.
- Loustau, D., Granier, A. & El Hadj Moussa, F. (1990). Evolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de pins maritimes. *Annales des Sciences Forestières*, 21, 599-618.
- Lu, P., Woo, K.-C. & Liu, Z.-T. (2002). Estimation of whole-plant transpiration of bananas using sap flow measurements. *Journal of Experimental Botany*, 53, 1771-1779.
- Lundblad, M., Lagergren, F. & Lindroth, A. (2001). Evaluation of heat balance method and heat dissipation methods for sapflow measurements in pine and spruce. *Annales des Sciences Forestières*, 58, 625-638.
- Marsal, J., Gelly, M., Mata, M., Arbonés, A., Rufat, J. & Girona, J. (2002). Phenology and draft affects the relationship between daily trunk shrinkage and midday stem water potential of peach trees. *Journal of Horticultural Science & biotechnology*, 77, 411-417.
- Marshall (1958). Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*, 33, 385-396.
- Massee, T.W. & Cary, J.W. (1978). Potential for reducing evaporation during summer fallow. *Journal of Soil Water Conservation*, 33, 126-129.
- Mayocchi, C.L. & Bristow, K.L. (1995). Soil surface heat flux: some general questions and comments on measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 75, 43-50.
- McCutchan, H. & Shackel, K.A. (1992). Stem-water potential as a sensitive indicator of water stress in prune trees (*Prunus domestica* L. cv. French). *Journal of American Society of Horticulture Science*, 117, 607-611.
- McMillen, R.T. (1988). An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 43, 231-245.
- McNaughton, K.G. & Jarvis, P.G. (1983). Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: Kozlowski, T.T. (ed.), *Water deficits and plant growth*, vol. VII, Academic Press, Inc., New York, p. 1-47.

- Mitchell, P.D. & Chalmers, D.J. (1982). The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. *Journal of American Society of Horticulture Science*, 107, 853-856.
- Moncrieff, J.B. (1989). The measurement of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes by eddy correlation. *In: Workshop Field instrumentation for Environmental Physiology*, University of Algarve, Faro, Portugal (12-18 Abril, 1989).
- Monteith, J.L. & Unsworth, M.H. (1990). *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, Londres, 291 p..
- Monteith, J.L. (1965). Evaporation and Environment. *Symposia, Society of Experimental Biology*, 19, 205-234.
- Monteith, J.L. (1985). Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. *ASAE Publication*, 14-85, 4-12.
- Moore, C.J. (1976). Eddy flux measurements above a pine forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 102, 913-918.
- Moriana, A. & Fereres, E. (2002). Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees. *Irrigation Science*, 21, 83-90.
- Munro, D.S. & Oke, T.R. (1975). Aerodynamic boundary-layer adjustment over a crop in neutral stability. *Boundary-Layer Meteorology*, 9, 53-61.
- Nadezhdina, N. & Cermák, J. (1999, 2000). *The technique and instrumentation for estimation of the sap flow rate in plants*. Patent No.286438, A 01G 7/00 (PV-1587-98; US Patent and Trademark Rec.No.69055, 1997), Vestnik 19/1999 and 4/2000, 47p.
- Nadezhdina, N., Cermák, J. & Nadezhdin, V. (1998). The heat field deformation method for sap flow measurement. *In: 4th International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants*, Zidlochovice, República Checa, 3 a 5 de Outubro de 1998, p. 72-92.
- Nadezhdina, N., Cermák, J. & Tributsch, H. (2003). Infra-red images of sap flow in stems of lime trees under natural and experimental conditions. *Annals of Forest Science*, (submetido para publicação).
- Naor, A. (1998). Relations between leaf and stem water potentials and stomatal conductance in three field-grown woody species. *Journal of Horticultural Science & biotechnology*, 73, 431-436.
- Nobel, P.S., Forseth, I.N. & Long, S.P. (1993). Canopy structure and light interception. *In: Hall, D.O., Scurlock, J.M.O., Bolhar-Nordenkamp, H.R., Leegood, R.C. & Long, S.P., Photosynthesis and Production in a Changing Environment*, Chapman & Hall, Londres. p. 79-90.
- Norman, J.M. & Campbell, G.S. (1991). Canopy structure. *In: Pearcy, R.W., Ehleringer, J., Mooney, H.A. & Rundel, P.W., Plant Physiological Ecology*, Chapman and Hall, Londres, p. 301-325.
- Oke, T.R. (1990). *Boundary Layer Climates*. Rutledge, London, 435 p.

- Olsson, K. A. (1977). *Physical aspects of the water relations of an irrigated peach orchard*. Ph. D. thesis, Macquarie University, Sydney, Australia (citado por Chalmers *et al.*, 1983).
- Oren, R., Phillips, N., Katul, G., Ewers, B.E. & Pataki, D.E. (1998). Scaling xylem sap flux and soil water balance and calculating variance: a method for partitioning water flux in forests. *Annales des Sciences Forestières*, 55, 191-216.
- Paw U, K.T. & Brunet, Y. (1991). A surface renewal measure of sensible heat flux density. *In: Proc. of the 20th Conference on Agriculture and Forest Meteorology*, Salt Lake City, USA, p. 52-53.
- Paw U, K.T., Qiu, J., Su, H.B., Watanabe, T. & Brunet, Y. (1995). Surface renewal analysis: a new method to obtain scalar fluxes without velocity data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74, 119-137.
- Pearcy, R.W. & Schulze E.-D. Zimmermann, R. (1991). Measurement of transpiration and leaf conductance. *In: Pearcy, R.W., Ehleringer, J., Mooney, H.A. & Rundel, P.W. (ed.), Plant Physiological Ecology. Field Methods and Instrumentation*, Chapman and Hall, London, p. 137-160.
- Peixoto, J.P. (1987). *O Homem, o Clima e o Ambiente - I. O Sistema Climático e as Bases Físicas do Clima*. Ministério do Plano e da Administração do Território, Lisboa.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A, 120-145.
- Phene, C.J., Reginato, R.J., Itier, B. & Tanner, B.R. (1990). Sensing irrigation needs. *In: Hoffman, G.J., Howell, T.A. & Solomon, K.H. (ed.), Management of Farm Irrigation Systems*, ASAE, St. Joseph, MI., p. 205-261.
- Philip, J.R. (1957). Evaporation, and moisture and heat fields in the soil. *Journal of Meteorology*, 14, 354-366.
- Phillips, N., Oren, R. & Zimmerman, R. (1996). Radial patterns of xylem sap flow in non-, diffuse- and ring-porous tree species. *Plant, Cell and Environment*, 19, 983-990.
- Pieri, P., Tournebize, R. & Moreau, P. (1995). Le microclimat des couverts présentant des structures en rangs. *In: Actes de l'École Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Tome 1: de la plante au couvert végétal*, INRA, Paris, p. 475-487.
- Postel, S. (2001). Growing more food with less water. *Scientific American*, Feb., 34-37.
- Prueger, J.H., Hipps, L.E. & Cooper, D.I. (1996). Evaporation and the development of the local boundary layer over an irrigated surface in an arid region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78, 223-237.
- Raposo, J.R. (1994). *História da Rega em Portugal*. Instituto da Água, Ministério do Ambiente e Recursos Naturais, 272 p..
- Raposo, J.R. (1996). *A Rega - dos Primitivos Regadios às Modernas Técnicas de Rega*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 485 p..

- Rauner, J.L. (1976). Deciduous Forests. *In: Monteith, J.L. (ed.), Vegetation and the Atmosphere - Case studies*, Academic Press, London, p. 241-263.
- Rego, Z.C. (1987). *A Água. A Escassez na Abundância*. SEARN, Lisboa, 65 p.
- Reis, R.M.M. & Gonçalves, M.Z. (1981). *O clima de Portugal. Caracterização climática da região do Ribatejo e Oeste*. Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, Lisboa, 194 p..
- Ritchie, J.T. & Johnson, B.S. (1990). Soil and plant factors affecting evaporation. *In: Stewart, B.A. & Nilsen, D.R (ed.), Irrigation of agricultural crops*, American Society of Agronomy, Agronomy Monograph nº 30, p. 363-390.
- Ritchie, J.T. (1972). Model for predicting evaporation from a row with incomplete cover. *Water Resources Research*, 8, 1204-1213.
- Rodrigues, A.M. & Pita, G.P.A. (1999). Measurements of momentum, sensible and latent heat fluxes above a cork oak stand by aerodynamic and eddy correlation methods. *Revista de Ciências Agrárias*, XXII, 119-130.
- Rojas, J. S. D. R. (2003). *Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, como base para o manejo de irrigação*. Tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Piracicaba, Brasil, 110 p..
- Rosenberg, N.J., Blad, B.L. & Verma, S.B. (1983). *Microclimate: the biological environment*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 495 p.
- Sakuratani (1981). A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *Japanese Agricultural Meteorology*, 37, 9-17.
- Saugier, B., Granier, A., Pontailler, J.Y., Dufrêne, E. & Baldocchi, D. (1997). Transpiration of a boreal pine forest measured by branch bag, sap flow and micrometeorological methods. *Tree Physiology*, 17, 511-519.
- Schelde, K., Thomsen, A. & Jensen, N.O. (1999). Eddy covariance measurements of area integrated fluxes; a comparison of open and closed path systems. *In: Transactions*, vol.80, , AGU, Fall Meeting San Francisco, CA, Dec. 13-17, p. 362-370.
- Schmid, H.P. (2002). Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 159-183.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Branstreet, E.D. & Hemmingsen, E.A. (1965). A - Sap pressure in vascular plants. *Science N.Y.*, 148, 339-346 (citado em Ferreira-Gama, 1987).
- Schuepp, P.H., Leclerc, M.Y., MacPherson, J.I. & Desjardins, R.L. (1990). Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorology*, 50, 355-373.

- Scott, R.L., Watts, C., Payan, J.G., Edwards, E., Goodrich, D.C., Williams, D. & Shuttleworth, W.J. (2003). The understory and overstory partitioning of energy and water fluxes in an open canopy, semiarid woodland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 114, 127-139.
- Shackel, K.A., Gurusinghe, S., Kester, D. & Micke, W. (1998). Water stress responses of almond [*Prunus dulcis* (Mill) Webb.] under field conditions. *Acta Horticulturae*, 470, 309-316.
- Shackel, K.A., Johnson, R.S. & Medawar, C.K. (1992). Substantial errors in estimates of sap flow using the heat balance technique on woody stems under field conditions. *Journal of American Society of Horticulture Science*, 117, 351-356.
- Shackel, K.A., Lampinen, B., Sibett, S. & Olson, W. (2000). a The relations of midday stem water potential to the growth and physiology of fruit trees under water limited conditions. *Acta Horticulturae*, 537, 425-430.
- Shackel, K.A., Lampinen, B., Southwick, S., Olson, W., Sibett, S., Krueger, W. & Yeager, J. (2000). b Deficit irrigation in prunes: maintaining productivity with less water. *HortScience*, 35, 1063-1066.
- Sharma, M.L. (1985). Estimating evapotranspiration. In: Hillel, D. (ed.), *Advances in irrigation*, Academic Press, New York, p. 213-281.
- Shaw, R.H. & Pereira, A.R. (1982). Aerodynamic roughness of a plant canopy: a numerical experiment. *Agricultural Meteorology*, 26, 51-65.
- Shuttleworth, W.J. & Wallace, J.S. (1985). Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 111, 839-855.
- Shuttleworth, W.J. (1979). Below-canopy fluxes in a simplified one-dimensional theoretical description of the vegetation-atmosphere interaction. *Boundary-Layer Meteorology*, 17, 315-331.
- Silberstein, R., Held, A., Hatton, T., Viney, N. & Sivapalan, M. (2001). Energy balance of a natural jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest in Western Australia: measurements during spring and summer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109, 79-104.
- Silva, M.G., Souza, E.F., Bernardo, M. & Araújo, M.C. (2002). Calibração do medidor de densidade de fluxo de seiva para a cultura do café (*Coffea arabica* L.). In: *XXXI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2002*, Salvador - BA, 29 de Julho a 2 de Setembro de 2002.
- Silva, R. M. P. (2002). *Medição da transpiração em culturas lenhosas, análise de casos-estudo e verificação experimental em *Vitis vinifera**. Relatório do trabalho final de fim de curso, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 98 p..

- Silvestre, J. (2003). *Evapotranspiração e Funcionamento Hídrico em Vitis vinifera L.* Tese de doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 219 p. (em publicação).
- Silvestre, J. & Ferreira, M.I. (1995). Transpiração e resistências em fase gasosa em coberto de *Vitis vinifera*, casta Vital, conduzida em cordão bilateral baixo. *In: Comptes Rendues 8<sup>ème</sup> Journées JOURÉES*, Vairão, Portugal, 3 a 5 de Julho de 1995, p. 193-194.
- Silvestre, J. & Ferreira, M.I. (1998). Sap flow measurements with the *Granier* method on a vineyard, in central Portugal. *In: 4th International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants*, Zidlochovice, República Checa, 3 a 5 de Outubro de 1998, p. 127-131.
- Silvestre, J. & Ferreira, M.I. (2000). Effects of irrigation on transpiration and water relations of vineyards, in the Tejo valley (central Portugal). *Acta Horticulturae*, 537, 305-309.
- Silvestre, J., Ferreira, M.I. & Valancogne, C. (1999). Evapotranspiration and water relations from a vineyard in central Portugal during spring-summer periods. *Acta Horticulturae*, 493, 213-218.
- Simpson, I.J., Thurtell, G.W., Kidd, G.E., Lin, M., Demetriades-Shah, T.H., Flitcroft, I.D., Kanemasu, E.T., Nie, D., Bronson, K.F. & Neue, H.U. (1995). Tunable diode laser measurements of methane fluxes from an irrigated rice paddy field in the Philippines. *Journal of Geophysical Research*, 100, 7283-7290.
- Simpson, I.J., Thurtell, G.W., Neumann, H.N., Hartog, G.D. & Edwards, G.C. (1998). The validity of similarity theory in the roughness sublayer above forests. *Boundary-Layer Meteorology*, 87, 69-99.
- Skellam, J.G. (1973). The formulation and interpretation of mathematical models of diffusional processes in population biology. *In: Bartlett, M.S. & Hiorns, R.W. (ed.), The Mathematical Theory of the Dynamics of Biological Populations*, Academic Press, New York, p. 63-85 (citado por Brown & Rothery, 1993).
- Smith, D.M. & Allen, S.J. (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 47, 1833-1844.
- Smith, D.M., Jarvis, P.G. & Odongo, J.C.W. (1997). Energy budgets of windbreak canopies in the Sahel. *Agricultural and Forest Meteorology*, 86, 33-49.
- Snyder, R.L., Paw U, K.T., Duce, P., Spano, D., Ferreira, M.I. & do Paço, T.A. (2000). Measuring tree and vine ET with eddy covariance. *Acta Horticulturae*, 1, 53-60.
- Spano, D., Duce, P., Snyder, R.L., Paw U, K.T. & Ferreira, M.I. (2000). Estimating tree and vine evapotranspiration with emphasis on surface renewal. *Acta Horticulturae*, 1, 37-43.
- Splinter, W.E. (1969). Electronic micrometer continuously monitors plant stem diameter. *Agricultural Engineering*, 50, 220-221.

- Stewart, J.B. (1983). A discussion of the relationships between the principal forms of the combination equation for estimating crop evaporation. *Agricultural Meteorology*, 30, 111-127.
- Stroosnijder, L. (1987). Soil evaporation: test of a practical approach under semi-arid conditions. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 35, 417-426.
- Swanson, R.H. (1974). A thermal flowmeter for estimating the rate of xylem sap ascent in trees. In: Dowell, R.B. (ed.), *Flow - its measurement and control in science and industry*, Instrument Society of America, Pittsburgh p. 647-652, (citado em Edwards & Warwick, 1984).
- Swanson, R.H. (1994). Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72, 113-132.
- Swanson, R.H. & Whitfield, D.W.A. (1981). A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice. *Journal of Experimental Botany*, 32, 221-239.
- Swinbank, W.C. (1951). The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology*, 8, 135-145 (citado por Rosenberg, 1983).
- Tanner, B.D., Swiatek, E. & Greene, J.P. (1993). Density fluctuations and use of the krypton hygrometer in surface flux measurements. In: *Proceeding of the 1993 National Conference on Irrigation and Drainage Engineering*, Park City, Utah, 21-23 July 1993, Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers, 8 p..
- Tanner, B.D., Tanner, M.S., Dugas, W.A., Campbell, E.C. & Bland, B.L. (1988). Evaluation of an operational eddy correlation system for evapotranspiration measurements. In: *Eddy correlation instrumentation (Models KH20 and CA27)*, Collected papers, version 1 (1.88), Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA.
- Tanner, C.B. (1960). Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Soil Science Society Proceedings*, 24, 1-9.
- Tanner, C.B. & Jury, W.A. (1976). Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. *Agronomy Journal*, 68, 239-243.
- Tanner, C.B. & Sinclair, T.R. (1983). Efficient water use in crop production: research or re-search? In: Taylor, H.M., Jordan, W.R. & Sinclair, T.R. (ed.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*, American Society of Agronomy, p. 1-25.
- Tarara, J.M. & Ferguson, J.C. (2001). Device for simulating high rates of sap flow in grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 52, 260-265.
- Tavares, R. A. F. R. (1993). *Medição da transpiração e caracterização do estado hídrico em *Prunus persica**. Relatório do trabalho final de curso, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 76 p..
- Tavares, R. & Ferreira, M. I. (1994). Water relations of *Prunus persica* trees under soil drought in central Portugal. Stomatal conductance, water potential and transpiration.

- In: Borin, M. and Sattin, M. (ed.), *Proceedings of European Society for Agronomy III Congress*, Padova, Itália, Set. 1994: p. 422-423.
- Thompson, M.A., Campbell, D.I. & Spronken-Smith, R.A. (1999). Evaporation from natural and modified raised peat bogs in New Zealand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95, 85-98.
- Todd, R.W., Evett, S.R. & Howell, T.A. (1998). Latent heat flux of irrigated alfalfa measured by weighing lysimeter and Bowen ratio-energy balance. In: *ASAE Annual International Meeting*, Florida, USA, ASAE Paper n° 982119, 19 p..
- Todorovic, M. (1999). Single-layer evapotranspiration model with variable canopy resistances. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 125, 235-245.
- Tournebize, R., Sinoquet, H. & Bussi re, F. (1996). Modelling evapotranspiration partitioning in a shrub/grass alley crop. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81, 255-272.
- Turner, N.C., Schulze, E.-D. & Gollan, T. (1985). The responses of stomata and leaf gas exchange to vapour pressure deficits and soil water content. II. In the mesophytic herbaceous species *Helianthus annuus*. *Oecologia*, 65, 348-355.
- Twine, T.E., Kustas, W.P., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P.J. & Wesely, M.L. (2000). Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 279-300.
- Valancogne, C. & Granier, A. (1997). M sures de flux de sève brute. In: *L'eau dans l'espace rural; Production végétale et qualité de l'eau*, INRA, Paris, p. 153-160.
- Valancogne, C. & Nasr, Z. (1989). Une méthode de mesure du débit de sève brute dans de petits arbres par bilan de chaleur. *Agronomie*, 9, 609-617.
- Valancogne, C. & Nasr, Z. (1993). A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In: Borghetti, M., Grace, J. & Raschi, A. (ed.), *Water Transport in Plants Under Climatic Stress*, Cambridge University Press, UK, p. 166-173.
- Valancogne, C. (1995). Mode de régulation de la transpiration chez le prunier et le pommier: conséquences sur le choix d'indicateurs de l'état hydrique. In : *Séminaire L'eau dans la Vie de l'Arbre*, INRA, Centre de Recherches de Clermont-FD-Theix, Abril 1994, p. 167-187.
- Valancogne, C. and Granier, A. (1991). Intérêt des méthodes thermiques de m sure du flux de sève pour l'étude du bilan hydrique des savanes. *IAHS Publication*, N  199, 387-400.
- Valancogne, C., Dayau, S., Améglio, T., Archer, P., Daudet, F.-A., Ferreira-Gama, M.I. & Cohen, M. (1997). Relations between relative transpiration and predawn leaf water potential in different fruit tree species. *Acta Horticulturae*, 449, 423-429.
- Valente, F. M. R. T. (1999). *Intercep o da precipita o em povoamentos florestais esparsos. Modela o do processo e características aerodinâmicas dos cobertos molhados*. Tese de doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia, Lisboa, 172 p..

- Verma, S.B. (1990). Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. *Remote Sensing Reviews*, 5, 99-115.
- Villalobos, F.J. (1996). Surface renewal method of measuring evapotranspiration. In: Camp, C.R., Sadler, E.J. & Yoder, R.E., *Proc. International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, November 3-6 1996, San Antonio, Texas, p. 42-47.
- Villalobos, F.J. (1999). Modelling of the carbon and water balances of olive (*Olea europaea*, L.). *Revista de Ciências Agrárias*, XXII, 131-143.
- Villalobos, F.J., Orgaz, F., Testi, L. & Fereres, E. (2000). Measurement and modeling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *European Journal of Agronomy*, 13, 155-163.
- Warland, J.S., Dias, G.M. & Thurtell, G.W. (2001). A tunable diode laser system for ammonia flux measurements over multiple plots. *Environmental Pollution*, 114, 215-221.
- Webb, E.K., Pearman, G.I. & Leuning, R. (1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 106, 85-100.
- Weibel, F.P. & de Vos, J.A. (1994). Transpiration measurements on apple trees with an improved stem heat balance method. *Plant and Soil*, 166, 203-219.
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, A., Law, B.E., Kowalski, A., Meyers, T., Moncrieff, J., Monson, R., Oechel, Tenhunen, Valentini & Verma, S. (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223-243.
- Wilson, K., Hanson, P.J. & Baldocchi, D.D. (2000). Factors controlling evaporation and energy partitioning beneath a deciduous forest over an annual cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102, 83-103.
- Wilson, K.B., Hanson, P., Mulholland, P.J., Baldocchi, D.D. & Wullschlegel, S.D. (2001). A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance. *Agricultural and Forest Meteorology*, 106, 153-168.
- Winpenny, J. T. Managing water scarcity for water security. In: E-mail conference: *Water: Source of Food Security*. FAO Land and Water Development Division, 15 Set.-31 Out.2002, [http:// www.wca-infonet.org/id/83370](http://www.wca-infonet.org/id/83370). 2002.
- Wright, J.L. (1981). Crop coefficients for estimates of daily crop evapotranspiration. In: *Irrigation scheduling for water and energy conservation in the 80's*. Proc. ASCE Irrigation Scheduling Conf., Dez.1981, p. 18-26.
- Wright, J.L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108, 57-74.

- Wullschleger, S.D., Hanson, P.J. & Todd, D.E. (2001). Transpiration from a multi-species deciduous forest as estimated by xylem sap flow techniques. *Forest Ecology and Management*, 143, 205-213.
- Wullschleger, S.D., Wilson, K.B. & Hanson, P.J. (2000). Environmental control of whole-plant transpiration, canopy conductance and estimates of the decoupling coefficient for large red maple trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104, 157-168.
- Xiloyannis, C., Uriu, K. & Martin, G.C. (1980). Seasonal and diurnal variations in abscisic acid, water potential, and diffusive resistance in leaves from irrigated and non-irrigated peach trees. *Journal of American Society of Horticulture Science*, 105, 412-415.
- Zhang, J. & Davies, W.J. (1990). Changes in the concentration of ABA in xylem sap as a function of changing soil water status can account for changes in leaf conductance and growth. *Plant, Cell and Environment*, 13, 277-285.
- Zhang, J., Schurr, U. & Davies, W.J. (1987). Control of stomatal behaviour by abscisic acid which apparently originates in the roots. *Journal of Experimental Botany*, 38, 1174-1181.
- Zimmermann, M.H. & Brown, C.L. (1971). *Trees, structure and function*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.

## **ANEXO I**

# Simulation of heat field around sap-flow sensor

Ministry of Food, Agriculture and Fisheries  
Danish Institute of Agricultural Sciences

UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA  
Instituto Superior de Agronomia



Anton Thomsen, Danish Institute of Agricultural Sciences, Dept of Soil and Plant Sciences  
anton.thomsen@agrsci.dk

Maria Isabel Ferreira, Universidade Técnica de Lisboa, I. S. A., Dept. of Agric. Eng.,  
isabelferreira@isa.utl.pt



## Introduction

The water use of trees and other woody plants have been studied using a range of techniques including thermal methods (Kostner et al., 1998, Wullschlegel et al., 1998). Especially heat dissipation methods have been widely applied because of the relative simplicity of the instruments. Much literature is devoted to the discussion of measurement accuracy and correction. Instrument performance have been verified using other approaches to the estimation of water balance as lysimeters and eddy covariance (Ameglio et al., 1993, Ferreira et al., 1996, Berbigier et al., 1996, Saugier et al., 1997, Wilson et al., 1998, Lundblad et al., 2001) and recently also numerical modelling (Perämäki et al., 2001).

Although heat dissipation sensors are rather simple their application is not straightforward because of the complexities of sap flow in woody plants. Sap flow is usually estimated from sensor measurements using partly empirical equations because closed form solutions able to cope with varying boundary conditions and wood properties are generally not available.

The use of numerical models simulating the heat fields created by heat dissipation sensors is a promising supplement to experiments involving plants in natural or controlled environments. Models are attractive because wood properties, sensor geometry and boundary conditions can be freely specified and numerical experiments can be tailored to answer important questions related to sensor design and application. If models are able to reproduce the function of real systems realistically, modelling can lead to insight that would be difficult to obtain using traditional experimentation and algorithm development alone.

A finite difference simulation model was developed to simulate the heat field around a linear heater in order to:

- calculate and visualise the heat fields for varying wood properties and boundary conditions
- estimate sensitivity to varying wood thermal properties, heater power dissipation, etc.
- evaluate algorithms used in converting sensor measurement to sap flow estimates
- evaluate sensor geometry with respect to varying boundary conditions

The model was initially applied to one widely used heat dissipation method (Granier, 1985, 1987) and a comparison was made between specified sap flow rates and estimated flow rates using the algorithm proposed by Granier, for a narrow range of wood thermal properties.

## Simulation Model

Sophisticated simulation models can be developed using simulation software (Perämäki et al., 2001). The aim was to develop a rather simple model that was both easy to construct, verify and apply and we chose to develop the code using a standard computer language. The developed 2D finite difference model was based on a forward difference of explicit method (Campbell, 1985). The conductive heat flux is calculated from the temperatures at the beginning of the time step. Implicit methods calculate fluxes from weighted means of old and new temperatures. Implicit methods are numerically more stable than explicit methods and allow the use of longer time steps but involve more complex matrix algebra. The convective heat flux carried by the flowing sap is calculated analogous to the conductive heat flux in a separate iteration.

Temperature fields are calculated on a 120 by 120 element grid with 0.5 mm square grid elements. The line heater can be placed anywhere within this grid. The temperature of grid elements matching a particular sensor design can be output to file for analysis.

The model includes a user interface allowing the model to be run with user specified wood thermal properties, boundary conditions, time step etc. It is initiated after user input and iterates until steady state has been reached. Examples of steady state heat fields calculated for high, medium and low sap flow densities are shown below (figure 1).

## The heat dissipation sap flow method

The so-called Granier sensor includes two probes of 2 mm diameter and variable length, with thermocouples placed inside. The upper probe includes a line heater also and the temperature difference is recorded. The temperature difference between the two measuring points decreases with increasing flux. The flux density is calculated from a coefficient K' using an algorithm proposed by Granier (1987) and defined as:

$$K' = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} \quad \text{, where} \quad [1]$$

$\Delta T$  - temperature difference between heated and reference probe (K)  
 $\Delta T_{max}$  - temperature difference for zero convective flux density (K)

and flux density ( $m^3 s^{-1} m^{-2}$ ) calculated as:

$$u' = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} = \frac{1}{\alpha} K' \quad [2]$$

Granier (1985, 1987) found an empirical adjustment and a value of  $119.10$  for  $1/\alpha$ , proposing

$$u' = 119 \cdot 10^{-6} \cdot K'^{1.231} \quad [3]$$

## Results and Discussion

Figure 1 shows examples of heat fields calculated for high, medium and low sap flow densities and average wood thermal properties.

Figure 2 shows the values of modelled thermal gradient ( $\Delta T$ ) and the K' coefficient, as a function of sap flow density, for average wood thermal properties. The value of K' is calculated from the specified flux density using equation [1]. K' is almost proportional to the flux density, as expected from theory (Granier, 1985) and the relationship is in general agreement with the empirical adjustment proposed by the same author (Granier, 1985, 1987).

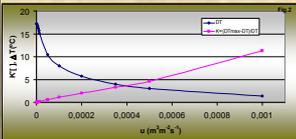
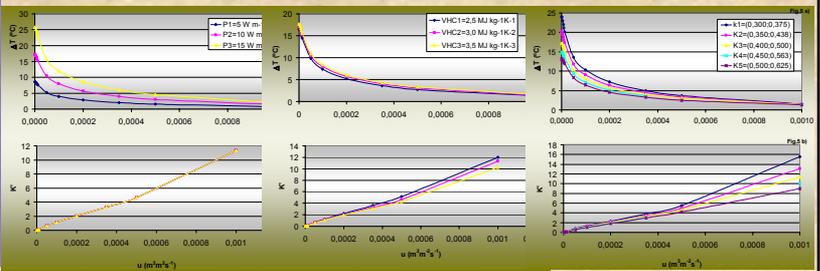
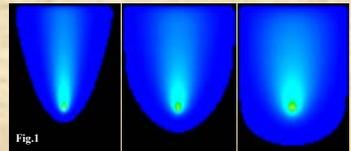


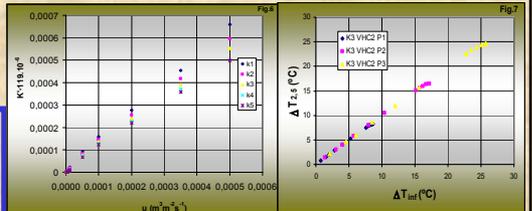
Figure 3 shows the influence of the amount of heat dissipated by the heater on modelled  $\Delta T$  and K'. Although  $\Delta T$  reflects the power applied (figure 3a), there is no apparent influence on the K values (figure 3b) and, thus, on the flux density.

Figures 4a and 4b show the effect of varying the volumetric heat capacity of the wood on modelled  $\Delta T$  and K'.

In figures 5a and 5b, the effect of changing wood thermal conductivity is presented.

Figure 6 presents the relationship between the flux density estimated from equation [2] using modelled temperature differences with a value of  $119.10 \cdot 10^{-6}$  for  $1/\alpha$  and the flux densities used as input. The calculations include the same values of thermal conductivity as used above (figure 5). The values are remarkably close to a 1:1 relationship.

The effect of changing the distance between the two probes was finally simulated. The values of  $\Delta T$  calculated for an infinite separation and a 2.5 cm separation were compared. For the 2.5 cm separation, it was found that the lower probe is within the heated volume for low flux densities (figure 7). For higher flows, the gradients are the same, irrespectively of the separation. According to the model this holds for all the parameter combinations presented here. This result suggests, for instance, that a separation of 2.5 cm is inadequate for an appropriate estimation of  $\Delta T_{max}$ .



## Conclusion

The results obtained from the initial application of the developed model are encouraging for the further use of the simple model for sensitivity analysis and further development of sensors and algorithms. For reliable results, the future work should be based on more realistic estimates of wood properties. Model extensions including saturation effects at very high flows should be developed to address this important phenomenon.

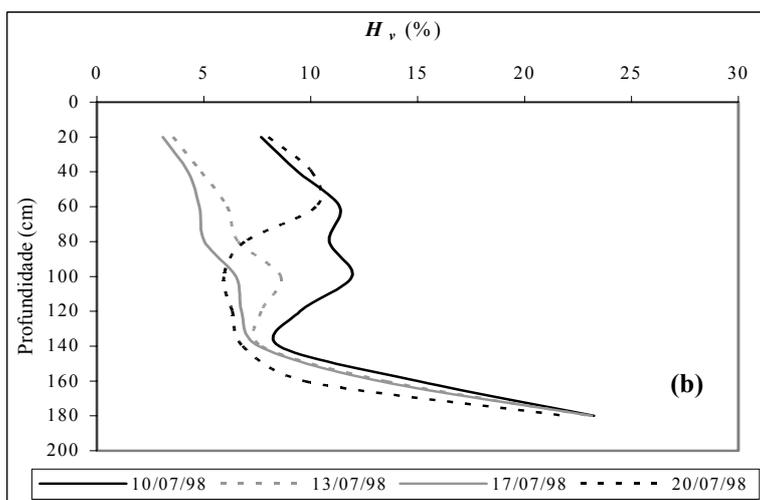
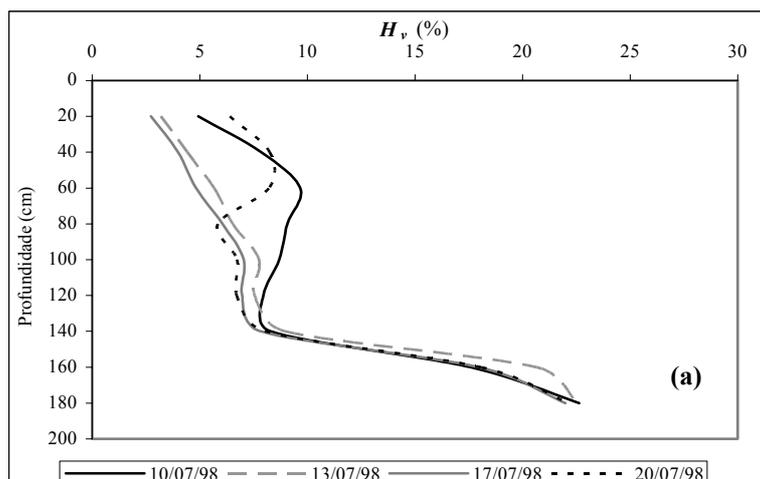
## References

Ameglio, T.; Archer, P.; Daudet, F.-A. and Ferreira, M.I. 1993. Comparison de trois méthodes de mesure de la transpiration de jeunes arbres. *Agronomie* 13:751-759.  
Berbigier, P.; Bonnefond, J.M.; Loustau, D.; Ferreira, M.I.; David, J.S.; Pacheco, C.A. and Pereira, J.S. 1996. Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal: 2. Evapotranspiration and canopy stomatal conductance measured by an eddy-covariance technique. *Oecologia* 107:43-52.  
Campbell, G.S. 1985. Soil physics with Basic. Transport models for soil-plant systems. *Developments in soil science* 14. Elsevier Science Publishers.  
Ferreira, M.I.; Valancogne, C.; Daudet, F.-A.; Ameglio, T.; Michaelsen, J. and Pacheco, C. A. 1996. Evapotranspiration and crop water relations in a peach orchard. In: (Camp, C.R.; Sadler, E.J. and Yoder, R.E., Eds.) *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling* (Nov-96, San Antonio, TX), ASA, pp 60-68.  
Granier, A. 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.*, 42: 193-200.  
Granier, A. 1987. Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Ann. Sci. For.*, 44: 1-14.

Lundblad, M.; Lagergren, F. and Lindroth, A. 2001. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sap flow measurements in pine and spruce. *Ann. For. Sci.* 58: 625-638.  
Perämäki, M.; Vesala, T. and Nikinmaa, E. 2001. Analysing the applicability of the heat balance method for estimating sap flow in boreal forest conditions. *Boreal Environment Research* 6: 29-43.  
Silvestre, J.; Ferreira, I. and Valancogne, C. 1999. Evapotranspiration and water relations from a vineyard in Central Portugal during spring-summer periods. Proc 1st ISHS Workshop on Water Relations of Grapevines (Eds E.H. Ruhl, J. Schemm). *Acta Hort.* 493: 213-218.  
Saugier, B.; Granier, A.; Pontailler, J. Y.; Dufréne, E. and Baldocchi, D.D. 1997. Transpiration of a boreal pine forest measured by branch bag, sap flow and micrometeorological methods. *Tree Physiology*, 17: 511-519.  
Wilson, K. B.; Hanson, P. J.; Mulholland, P. J.; Baldocchi, D. D. and Wullschlegel, S. D. 2001. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water scale. *Agricultural Forest Meteorology* 106:153-168.  
Wullschlegel, S.D.; Meinzer, F.C. and Vertessy, R.A. 1998. A review of whole-plant water studies in trees. *Tree Physiology* 18: 499-512.

## **ANEXO II**

Foram determinados os perfis hídricos do solo durante a indução de *stress* hídrico, por uma equipa do Departamento de Ciências do Ambiente do ISA – Secção de Ciência do Solo, sob orientação do Prof. Carlos Arruda Pacheco. Esta determinação realizou-se na zona da linha e as figuras abaixo referem-se ao 2º ciclo de *stress* hídrico, em 1998; (a) linha E, (b) linha D (vd. identificação na Figura III.5). A metodologia utilizada é descrita em III.1.3 e parte desta informação é utilizada em IV.6.5.3.



## **ANEXO III**

## Calendário

(as colunas sombreadas representam o dia do ano)

Janeiro		Fevereiro		Março		Abril		Maio		Junho		Julho		Agosto		Setembro		Outubro		Novembro		Dezembro	
1	1	1	32	1	60	1	91	1	121	1	152	1	182	1	213	1	244	1	274	1	305	1	335
2	2	2	33	2	61	2	92	2	122	2	153	2	183	2	214	2	245	2	275	2	306	2	336
3	3	3	34	3	62	3	93	3	123	3	154	3	184	3	215	3	246	3	276	3	307	3	337
4	4	4	35	4	63	4	94	4	124	4	155	4	185	4	216	4	247	4	277	4	308	4	338
5	5	5	36	5	64	5	95	5	125	5	156	5	186	5	217	5	248	5	278	5	309	5	339
6	6	6	37	6	65	6	96	6	126	6	157	6	187	6	218	6	249	6	279	6	310	6	340
7	7	7	38	7	66	7	97	7	127	7	158	7	188	7	219	7	250	7	280	7	311	7	341
8	8	8	39	8	67	8	98	8	128	8	159	8	189	8	220	8	251	8	281	8	312	8	342
9	9	9	40	9	68	9	99	9	129	9	160	9	190	9	221	9	252	9	282	9	313	9	343
10	10	10	41	10	69	10	100	10	130	10	161	10	191	10	222	10	253	10	283	10	314	10	344
11	11	11	42	11	70	11	101	11	131	11	162	11	192	11	223	11	254	11	284	11	315	11	345
12	12	12	43	12	71	12	102	12	132	12	163	12	193	12	224	12	255	12	285	12	316	12	346
13	13	13	44	13	72	13	103	13	133	13	164	13	194	13	225	13	256	13	286	13	317	13	347
14	14	14	45	14	73	14	104	14	134	14	165	14	195	14	226	14	257	14	287	14	318	14	348
15	15	15	46	15	74	15	105	15	135	15	166	15	196	15	227	15	258	15	288	15	319	15	349
16	16	16	47	16	75	16	106	16	136	16	167	16	197	16	228	16	259	16	289	16	320	16	350
17	17	17	48	17	76	17	107	17	137	17	168	17	198	17	229	17	260	17	290	17	321	17	351
18	18	18	49	18	77	18	108	18	138	18	169	18	199	18	230	18	261	18	291	18	322	18	352
19	19	19	50	19	78	19	109	19	139	19	170	19	200	19	231	19	262	19	292	19	323	19	353
20	20	20	51	20	79	20	110	20	140	20	171	20	201	20	232	20	263	20	293	20	324	20	354
21	21	21	52	21	80	21	111	21	141	21	172	21	202	21	233	21	264	21	294	21	325	21	355
22	22	22	53	22	81	22	112	22	142	22	173	22	203	22	234	22	265	22	295	22	326	22	356
23	23	23	54	23	82	23	113	23	143	23	174	23	204	23	235	23	266	23	296	23	327	23	357
24	24	24	55	24	83	24	114	24	144	24	175	24	205	24	236	24	267	24	297	24	328	24	358
25	25	25	56	25	84	25	115	25	145	25	176	25	206	25	237	25	268	25	298	25	329	25	359
26	26	26	57	26	85	26	116	26	146	26	177	26	207	26	238	26	269	26	299	26	330	26	360
27	27	27	58	27	86	27	117	27	147	27	178	27	208	27	239	27	270	27	300	27	331	27	361
28	28	28	59	28	87	28	118	28	148	28	179	28	209	28	240	28	271	28	301	28	332	28	362
29	29	29	60	29	88	29	119	29	149	29	180	29	210	29	241	29	272	29	302	29	333	29	363
30	30			30	89	30	120	30	150	30	181	30	211	30	242	30	273	30	303	30	334	30	364
31	31			31	90			31	151			31	212	31	243			31	304			31	365