

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

**Desenvolvimento de um Sistema Inteligente de  
Determinação das Necessidades Hídricas para Culturas  
Lenhosas Anisotrópicas**

**Rodolfo Miranda Pedrosa da Silva**

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

**JÚRI:**

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

**Vogais:**

Doutor Ricardo Paulo Serralheiro, professor catedrático da Universidade de Évora;

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 de Almeida Silva, professora associada da Universidade de Évora;

Doutor Rui Marçal Campos Fernando, professor associado do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor António Marcelino Palma de Borja Serafim, professor auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutora Teresa Maria Santana Barreto Soares David, investigadora auxiliar do Instituto Nacional de Recursos Biológicos, I.P., na qualidade de especialista.

**DOUTORAMENTO EM ENGENHARIA AGRONÓMICA**

**Lisboa, 2009**



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

**Desenvolvimento de um Sistema Inteligente de  
Determinação das Necessidades Hídricas para Culturas  
Lenhosas Anisotrópicas**

**Rodolfo Miranda Pedrosa da Silva**

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

**JÚRI:**

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

**Vogais:**

Doutor Ricardo Paulo Serralheiro, professor catedrático da Universidade de Évora;

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 de Almeida Silva, professora associada da Universidade de Évora;

Doutor Rui Marçal Campos Fernando, professor associado do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutor António Marcelino Palma de Borja Serafim, professor auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade Técnica de Lisboa;

Doutora Teresa Maria Santana Barreto Soares David, investigadora auxiliar do Instituto Nacional de Recursos Biológicos, I.P., na qualidade de especialista.

**DOUTORAMENTO EM ENGENHARIA AGRONÓMICA**

Tese apresentada neste Instituto para obtenção do grau de Doutor

**Lisboa, 2009**



Este trabalho foi financiado por uma bolsa de estudos concedida pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (SFRH / BD / 12917 /2003)



**Aos meus pais e irmãos**



## RESUMO

Este trabalho apresenta uma nova abordagem para a determinação das necessidades hídricas das culturas no âmbito da gestão da rega em culturas lenhosas anisotrópicas. Tirando partido de tecnologias actualmente disponíveis, do actual conhecimento científico sobre o funcionamento hídrico das plantas e de previsões numéricas do tempo, foi possível desenvolver um sistema que permitiu determinar a transpiração e o estado hídrico de um coberto lenhoso de *Actinidia deliciosa* – caso estudo utilizado. O sistema integra um modelo SPAC que simula a extracção radicular e a regulação estomática para prever à escala horária a evolução da transpiração e correspondente estado hídrico da cultura, com base no conhecimento do estado actual da cultura e previsão da evapotranspiração de referência, usando as potencialidades da previsão numérica do tempo. Para alcançar este objectivo, foi desenvolvido um subsistema de monitorização vegetal que quantifica a transpiração através de medições do fluxo de seiva e o estado hídrico da cultura, com recurso a um novo índice microdendrométrico que, calibrado localmente, permitiu a quantificação do estado hídrico das plantas. O sistema foi desenvolvido com base em experiências em condições controladas e em condições naturais (pomar comercial), de 2003 a 2006 e foi testado em relação a resultados experimentais fiáveis.

**Palavras-chave:** evapotranspiração, monitorização vegetal, previsão numérica do tempo, modelo SPAC, gestão da rega, *Actinidia deliciosa*.



## **ABSTRACT**

This work presents a new approach to quantify crop water requirements for irrigation scheduling in woody crops. Based in widely available technologies, in the scientific knowledge about plant water relations and on weather prediction, a system was developed to quantify transpiration and water status of a kiwifruit orchard – the case study used. Based on the observed actual crop conditions and in the forecasted reference evapotranspiration, the SPAC model (system component) simulates root water uptake and stomatal control to predict hourly crop transpiration and water status evolution at short/medium term. To achieve this goal, a plant monitoring subsystem was developed quantifying plant transpiration by means of sap flow measurements and quantifying actual crop water status using a new microdendrometric index, locally calibrated. The experimental work that allowed the development and testing of this system, was developed between 2003 and 2006, in controlled and natural conditions, at ISA experimental facilities and in commercial orchards in northwest Portugal.

**Key-words:** evapotranspiration, crop monitoring, numerical weather prediction, SPAC model, irrigation scheduling, *Actinidia deliciosa*.



#### NOTAS E CONVENÇÕES:

Neste documento foi usado como separador decimal o ponto e adoptou-se preferencialmente nas siglas e símbolos a literatura anglo-saxónica



# ÍNDICE GERAL



I ÍNDICE

II LISTA DE TABELAS

III LISTA DE FIGURAS

IV LISTA DE SÍMBOLOS



# I ÍNDICE

1	Enquadramento, Objectivo e Organização da Tese .....	2
1.1	Enquadramento e objectivo do estudo .....	2
1.2	Âmbito de aplicação do estudo.....	4
1.3	Organização do documento.....	5
2	Caracterização conceptual do meio a modelar .....	8
2.1	Relações hídricas das plantas – conceito SPAC .....	8
2.1.1	Solo – planta: absorção.....	10
2.1.1.1	Modelação da extracção radicular .....	12
2.1.2	Fluxos na planta .....	15
2.1.2.1	Fluxo xilémico .....	15
2.1.2.2	Translocação no floema.....	16
2.1.2.3	Capacitância hídrica dos tecidos .....	17
2.1.3	Planta – atmosfera: transpiração.....	18
2.1.3.1	Modelação do controlo estomático .....	20
2.1.3.2	Modelação da transpiração.....	22
2.2	Cobertos lenhosos anisotrópicos regados.....	23
2.3	Balanço hídrico e energético dos cobertos.....	25
3	Novo paradigma para a determinação das necessidades hídricas das culturas.....	28
3.1	Necessidades hídricas das culturas .....	28
3.2	Áreas científicas de suporte .....	33
3.2.1	Monitorização vegetal .....	33
3.2.1.1	Fitomonitores .....	35
3.2.2	Previsão numérica do tempo.....	41
3.2.2.1	Classificação dos modelos.....	43
3.2.2.2	Modelos de mesoscala .....	45
3.2.2.3	Modelos globais .....	46
3.2.2.4	Métodos de avaliação das previsões .....	47
3.3	Imperativos actuais da gestão da rega .....	47
3.4	ISIS – Integrated System for Irrigation Scheduling .....	51
3.4.1	Pré-requisitos do sistema .....	51
3.4.2	Modelo do processo .....	53
3.4.3	Formulação do sistema ISIS .....	54
4	Materiais e métodos.....	60
4.1	Caracterização dos meios experimentais .....	60
4.1.1	Pomar de Briteiros.....	60
4.1.2	Lisímetro .....	62
4.2	Monitorização e medição.....	64
4.2.1	Estado hídrico do solo.....	64
4.2.2	Estado hídrico da planta.....	65
4.2.2.1	Potencial hídrico .....	65
4.2.2.2	Condutância estomática.....	68

4.2.2.3. Microdendrometria .....	68
4.2.3 Fluxo de seiva .....	70
4.2.4 Componentes do balanço de energia do coberto.....	73
4.2.4.1. Medição de LE e H – método das flutuações instantâneas .....	73
4.2.4.2. Radiação líquida .....	78
4.2.4.3. Fluxo de calor à superfície do solo .....	78
4.2.5 Evapotranspiração do estrato inferior.....	80
4.3 Fontes de dados externas .....	80
4.3.1 Climatologia .....	80
4.3.2 Meteorologia .....	82
4.3.3 Previsões numéricas do estado do tempo .....	82
4.4 Dispositivos e protocolos experimentais utilizados.....	83
4.4.1 Dispositivo I (pomar - 2003 a 2006) .....	83
4.4.2 Dispositivo II (lisímetro - 2005).....	86
4.4.3 Dispositivo III (pomar - 2006) .....	88
5 Tratamento dos dados e análise dos resultados.....	94
5.1 Análise climatológica .....	94
5.1.1 Caracterização climática da região .....	94
5.1.2 Resumo climático dos anos de 2003 a 2006.....	96
5.2 Dispositivo II (lisímetro – 2005) .....	99
5.2.1 Calibração do sistema de pesagem .....	99
5.2.2 Balanço hídrico .....	101
5.2.3 Transpiração – método de Granier.....	102
5.2.3.1. Análise dos GTN.....	102
5.2.3.2. Determinação de $\Delta T_x$ .....	104
5.2.3.3. Verificação e calibração do método .....	106
5.2.3.4. Resultados de um ensaio preliminar em lisímetro .....	111
5.2.4 Condutância estomática e potencial hídrico da planta .....	112
5.2.5 Microdendrometria para a determinação do estado hídrico da planta.....	114
5.3 Dispositivo I (pomar - 2003 a 2006).....	119
5.3.1 Observação do estado hídrico das plantas .....	119
5.3.2 Balanço energético do coberto.....	120
5.3.2.1. Processamento dos dados micrometeorológicos.....	120
5.3.2.2. Fluxos de energia .....	125
5.3.3 Método de Granier para a quantificação da transpiração.....	126
5.3.3.1. Observação dos GTN .....	127
5.3.3.2. Determinação de $\Delta T_m$ .....	127
5.3.3.3. Integração das medições pontuais para o nível do coberto .....	127
5.3.3.4. Verificação e calibração do método .....	128
5.3.4 Componentes do balanço hídrico do coberto.....	130
5.3.4.1. Transpiração cultural .....	130
5.3.4.2. Evapotranspiração do estrato inferior .....	132
5.3.4.3. Estimativa da evapotranspiração cultural.....	135
5.3.4.4. Necessidades hídricas.....	135
5.4 Dispositivo III (pomar – 2006).....	137
5.4.1 Regime e estado hídrico do solo.....	137

5.4.2 Estado hídrico da planta.....	139
5.4.3 Medições do fluxo de seiva .....	142
5.4.3.1. Análise à amostragem realizada.....	142
5.4.3.2. Transpiração dos talhões T-III, T-IV e T-V .....	143
5.4.4 Microdendrometria para a determinação do estado hídrico da planta.....	144
5.4.5 Crescimento dos frutos .....	146
5.5 Previsões numéricas do estado do tempo.....	147
5.5.1 Avaliação dos nós da grelha sobre a região dos ensaios .....	147
5.5.2 Avaliação da previsão das variáveis meteorológicas .....	148
5.5.2.1. Temperatura .....	149
5.5.2.2. Radiação solar .....	151
5.5.2.3. Estado hídrico da atmosfera .....	153
5.5.2.4. Velocidade do vento .....	155
5.5.3 Previsão da evapotranspiração de referência .....	156
5.5.3.1. Discriminação horária .....	156
5.5.3.2. Discriminação diária.....	157
5.5.3.3. Análise de erro.....	158
5.5.3.4. Comparação com a normal climática .....	159
6 Sistema ISIS – Formalização e Avaliação .....	162
6.1 Previsão da evapotranspiração de referência .....	162
6.2 Subsistema de monitorização vegetal .....	165
6.3 Modelo SPAC .....	167
6.3.1 Formalização matemática do modelo SPAC.....	167
6.3.1.1. Extracção radicular .....	167
6.3.1.2. Fluxo de água e capacitância hídrica da planta .....	173
6.3.1.3. Transpiração e regulação .....	176
6.3.2 Implementação numérica do modelo .....	177
6.3.3 Parametrisação para os casos de estudo .....	178
6.3.3.1. Propriedades hidráulicas do solo .....	178
6.3.3.2. Sistema radicular: configuração e propriedades hidráulicas .....	179
6.3.3.3. Sistema vascular e capacitância hídrica .....	181
6.3.3.4. Controlo estomático e transpiração .....	184
6.3.4 Teste e avaliação nos casos de estudo .....	185
6.3.4.1. Extracção radicular com transpiração medida .....	185
6.3.4.2. Extracção radicular com transpiração modelada .....	195
6.4 Aplicação e avaliação do sistema ISIS nos casos de estudo .....	204
6.4.1 Lisímetro .....	205
6.4.2 Pomar.....	207
7 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros .....	212
7.1 Conclusões.....	212
7.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	214
8 Referências bibliográficas .....	215
9 Anexos.....	231
10 Agradecimentos .....	247



## II LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Lista dos principais centros que se dedicam à realização de previsões numéricas do tempo. ....	43
Tabela 4.1 - Listagem dos sensores utilizados na monitorização do estado hídrico do solo. ....	64
Tabela 4.2 – Lista de sensores usados em observações microdendrométricas. ....	69
Tabela 4.3 – Lista de sensores de Granier usados nos ensaios. ....	72
Tabela 4.4 – Fontes de erro inerentes ao método micrometeorológico das flutuações instantâneas (Burba e Anderson, 2007). ....	77
Tabela 4.5 – Lista de sensores usados nas observações com o método das flutuações instantâneas. ....	78
Tabela 4.6 - Lista de sensores usados na medição da radiação líquida do coberto. ....	78
Tabela 4.7 - Lista de sensores usados para quantificar o fluxo de calor à superfície do solo. ....	79
Tabela 4.8 – Estações meteorológicas da rede do Instituto de Meteorologia usadas na caracterização climática da região dos ensaios (vd. 5.1.1). ....	81
Tabela 4.9 - Localização das estações meteorológicas da rede do SNIRH usadas no estudo. ....	82
Tabela 4.10 – Lista de variáveis meteorológicas observadas e equipamentos de medição usados na estação meteorológica instalada no pomar de Briteiros (41° 31' N, 8° 27' W, 147 m). ....	83
Tabela 4.11 – Lista de sensores de Granier e GTN usados no Dispositivo Experimental I (pomar), durante o período de 2003 a 2006. ....	85
Tabela 4.12 - Lista de sensores instalados no Dispositivo Experimental II (lisímetro). ....	87
Tabela 4.13 – Lista de sensores de Granier, GTN e LVDTs usados no Dispositivo Experimental III (pomar – 2006). ....	89
Tabela 5.1 – Resumo climático da região (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988; à excepto da insolação – Anexo III). ....	94
Tabela 5.2 – Valores médios mensais de ETo do período de 1958 a 1988 (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988). ....	95
Tabela 5.3 – Síntese estatística dos GTN verificados nos pontos de instalação dos sensores de Granier, no ensaio do lisímetro. ....	104
Tabela 5.4 - Análise estatística dos índices microdendrométricas (MDS e OGR) por regressão linear com o potencial hídrico de base e do ramo. ....	117
Tabela 5.5 – Indicadores da qualidade dos dados das medições micrometeorológicas (sistema das flutuações instantâneas) sendo CFN a contribuição cumulativa normalizada dos fluxos medidos até ao limite da parcela, na direcção do vento dominante no intervalo de tempo considerado. ....	123
Tabela 5.6 – Dados do levantamento dendrométrico do pomar de actinidia para determinação da secção efectivamente condutora do tronco. ....	128
Tabela 5.7 – Estatísticas de avaliação da transpiração obtida pela integração das medições de fluxo de seiva do talhão T-I em relação à transpiração obtida por ETc-ETei, nos períodos de 2003 e 2004. ....	130
Tabela 5.8 – Valores de evapotranspiração diária do estrato inferior do coberto (ETei), medidos com minilisímetros e relações com ET e ETo. ....	133
Tabela 5.9 – Componentes do balanço hídrico e coeficientes culturais do coberto de actinidia medidos e estimados no período do ensaio de 2003 a 2006. ....	136

Tabela 5.10 – Avaliação da previsão da temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 2 m do solo pelo modelo GFS, com diferentes tempos de avanço, por comparação com as observações da estação meteorológica de Gondizalves, para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=595) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=592).....	150
Tabela 5.11 - Avaliação das temperaturas mínima ( $T_{a_n}$ ), média ( $T_{a_m}$ ) e máxima ( $T_{a_x}$ ) diária ( $^{\circ}\text{C}$ ) a 2 m, previstas pelo modelo GFS, com diferentes tempos de avanço, por comparação com as observações da estação meteorológica de Gondizalves: período de 10/05/2006 a 30/09/2006 (após correcção dos dados; N=592). .....	151
Tabela 5.12 – Análise estatística da previsão de $R_s$ ( $\text{W m}^{-2}$ ) pelo modelo GFS, utilizando a metodologia apresentada na Figura 5.80, por comparação com a estação meteorológica de Gondizalves para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=1122) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=1133).....	153
Tabela 5.13 - Análise estatística da previsão de $e_a$ (kPa) pelo modelo GFS por comparação com a estação meteorológica de Gondizalves (para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=1120) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=1130), após introdução da correcção encontrada na Figura 5.82).....	154
Tabela 5.14 - Análise estatística da previsão de $e_a$ diária (kPa) pelo modelo GFS por comparação com a estação meteorológica de Gondizalves, após correcção dos dados (10/05/2006 a 30/09/2006; N= 144). 154	154
Tabela 5.15 - Análise estatística da previsão da velocidade de vento a 2 m ( $\text{m s}^{-1}$ ), pelo modelo GFS por comparação com a estação meteorológica de Gondizalves para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=1120) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=1130), com correcção para o perfil vertical do vento e ajustamento encontrado na Figura 5.84. ....	155
Tabela 5.16 - Análise estatística da previsão de ETo à escala horária ( $\text{mm h}^{-1}$ ; pelo método de Penman-Monteith), com base nos dados das PNT do modelo GFS, por comparação com ETo determinada com os dados da estação meteorológica de Gondizalves para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=3348) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=3368). ....	156
Tabela 5.17 - Análise estatística da previsão de ETo ( $\text{mm d}^{-1}$ ), à escala diária por integração dos valores horários, com base nos dados das PNT do modelo GFS e no método de Penman-Monteith, por comparação com a ETo determinada com os dados da estação meteorológica de Gondizalves para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=136) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=138).....	157
Tabela 5.18 - Análise estatística da previsão de ETo ( $\text{mm d}^{-1}$ ), à escala diária, com base nos dados das PNT do modelo GFS e nos métodos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani, por comparação com a ETo determinada com os dados da estação meteorológica de Gondizalves para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=136) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=138). ....	158
Tabela 5.19 - Análise estatística da previsão de ETo, à escala horária ( $\text{mm h}^{-1}$ ) e diária ( $\text{mm d}^{-1}$ ) por integração dos valores horários, com base nos dados da estação meteorológica de Gondizalves com substituição da variável indicada pela previsão do modelo GFS com um tempo de avanço de 48 h; método de Penman-Monteith; por comparação com a ETo determinada com os dados da estação meteorológica de Gondizalves, dados do período de 10/05/2006 a 30/09/2006.....	159
Tabela 5.20 – Análise estatística da “previsão” de ETo, à escala horária ( $\text{mm h}^{-1}$ ) e diária ( $\text{mm d}^{-1}$ ), com base na NC da região (estação meteorológica de Braga/Posto Agrário) e com base nos dados das PNT; comparação com a ETo calculada com base nos dados meteorológicos da estação de Gondizalves (10/05 a 30/09 de 2006). ....	159
Tabela 6.1 – Estatísticas de avaliação da previsão de ETo diária ( $\text{mm d}^{-1}$ ).....	166
Tabela 6.2 – Equações matemáticas que descrevem os fluxos nos percursos de ligação e nos elementos de ligação ao exterior ou a locais de armazenamento (Figura 6.8). ....	174
Tabela 6.3 – Parâmetros ajustados das funções hidrodinâmicas de Brooks e Corey.....	179
Tabela 6.4 – Parâmetros da configuração do sistema radicular e propriedades hidráulicas do sistema radicular das plantas - lisímetro e pomar (V – volume, A – área, Ra – área de raízes).....	181
Tabela 6.5 – Propriedades hidráulicas do sistema vascular e dos locais de armazenamento – lisímetro e pomar. .....	184

### III LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação esquemática da variação do potencial hídrico ao longo do sistema SPAC; extraído e adaptado de Gurevitch <i>et al.</i> (2006a). .....	9
Figura 2.2 – Representação esquemática da geometria cilíndrica da raiz usada para a modelação a nível microscópico da extracção radicular e movimento de água no solo.....	13
Figura 2.3 – Resposta da absorção radicular ao stress hídrico do solo, $\alpha_w$ , em função da pressão efectiva de água no solo, $h$ , e da transpiração potencial $T_p$ (Feddes <i>et al.</i> , 1978).....	14
Figura 2.4 – Resposta de absorção radicular ao stress osmótico do solo como função da condutividade eléctrica do extracto saturado do solo (Mass e Hoffman, 1977).....	15
Figura 3.1 – Esquema da estrutura de uma rede de fitomonitorização típica (extraído e adaptado de Ton e Kopyt, 2003). .....	34
Figura 3.2 – Ilustração da dispersão obtida com um modelo de previsão por conjuntos: previsões da temperatura do ar (extraído de Persson e Grazzini, 2007).....	44
Figura 3.3 Diagrama do sistema SPAC considerado para a representação dos processos hídricos do sistema vegetal, ao nível da planta.....	53
Figura 3.4 – Arquétipo do sistema formalizado para a determinação (estado actual) e previsão a curto/médio prazo da transpiração e estado hídrico da cultura.....	55
Figura 3.5 – Formulação algébrica simplificada do modelo SPAC, considerado na formulação inicial do sistema ISIS.....	57
Figura 4.1 – Fotografia do pomar actinidia localizado em S. Salvador de Briteiros, concelho de Guimarães (latitude 41° 31' N, longitude 8° 27' W, altitude 147 m), com indicação da zona onde decorreram as medições directas.....	60
Figura 4.2 – Fotografias do aspecto do pomar de actinidia em S. Salvador de Briteiros, Guimarães. ....	61
Figura 4.3 – Grelha usada para a referenciação das actividades e medições realizadas no interior do pomar de actinidia em S. Salvador de Briteiros, Guimarães. ....	62
Figura 4.4 – Fotografias do lisímetro de pesagem instalado na Quintas das Fontainhas (latitude 41° 36' N, longitude 8° 28' W, altitude 21 m) com uma planta de <i>Actinidia deliciosa</i> cv. Hayward, com 8 anos. ....	63
Figura 4.5 – Fotografia da protecção plástica colocada nos tensiómetros para impedir o escoamento preferencial de água ao longo da cana dos sensores. ....	65
Figura 4.6 – Fotografias dos sacos utilizados para o isolamento das folhas para a medição do potencial hídrico do ramo.....	67
Figura 4.7 – Esquemas (a. e b.) e fotografias (c. e d.) dos suportes usados para fixação dos sensores: a. e c. suporte do tipo I, b. e d. suporte do tipo II. ....	70
Figura 4.8 – Fotografias do isolamento dos sensores de Granier: a. isolamento térmico ao nível do sensor, b. isolamento exterior da radiação solar usado nos sensores do tronco, c. protecção usada para a radiação solar nos sensores instalados em ramos.....	73
Figura 4.9 – Representação esquemática da proveniência dos fluxos medidos pelos sensores colocados na torre de observações no método das flutuações instantâneas, (extraído de Burba e Anderson, 2007)...	76
Figura 4.10- Localização da torre de observações micrometeorológicas no pomar de Briteiros com indicação do <i>fetch</i> nos azimutes considerados na validação dos dados.....	77
Figura 4.11 – Fotografias da instalação dos sensores do método das flutuações instantâneas na torre de observações micrometeorológicas, no pomar de Briteiros. ....	78

Figura 4.12 - Fotografias da instalação dos mini-lisímetros no pomar.....	80
Figura 4.13 – Imagem de satélite da região do Entre Douro e Minho com a localização das principais estações meteorológicas usadas e dos locais experimentais (Google Earth).....	81
Figura 4.14 – Sensores instalados para a monitorização do estado hídrico do solo: $h_{25}$ , $h_{50}$ , $h_{75}$ e $h_{100}$ pressão efectiva de água no solo medida com tensiómetros a 25, 50, 75 e 100 cm, respectivamente; $\theta_{s_{25}}$ teor de água no solo medido com ThetaProbes a 25 cm.....	90
Figura 5.1 – Diagrama ombrotérmico da estação meteorológica de Braga/Posto Agrário: linha, temperatura média do ar; colunas, valores médios mensais de precipitação (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988). Nota: as escalas da precipitação e da temperatura não respeitam a relação 2:1 do diagrama ombrotérmico de Gausson.....	94
Figura 5.2 – Cruzamento de variáveis meteorológicas: a. relação entre a temperatura média mensal do ar e a precipitação total mensal; b. relação entre a temperatura média mensal e a humidade relativa do ar média mensal (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988).....	95
Figura 5.3 – Balanço hídrico de Thornthwaite-Mather (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988).....	96
Figura 5.4 - Períodos com excesso ou carência hídrica do Balanço hídrico de Thornthwaite-Mather (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988).....	96
Figura 5.5 – Valores das variáveis meteorológicas: a. radiação solar global; b. precipitação; c. temperatura do ar; d. humidade relativa; e. velocidade do vento; NC – normal climática, Observado – valor registado na estação meteorológica de Gondizalves; os valores de $R_s$ da NC foram estimados com base na metodologia apresentada em Allen <i>et al.</i> (1998), com os dados da normal de insolação apresentada em 5.1.1.....	97
Figura 5.6 – Evapotranspiração de referência mensal, calculada com base nos dados horários registados na estação meteorológica de Gondizalves (ET <sub>o</sub> ) e valores normais de ET <sub>o</sub> mensais calculados com a normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário (NC), apresentada em 5.1.1.....	98
Figura 5.7 - Balanço hídrico de Thornthwaite-Mather da região, considerando um armazenamento hídrico do solo de 100 mm, ET <sub>o</sub> e P da estação meteorológica de Gondizalves, período de 2003 a 2006.....	98
Figura 5.8 – Comparação da estação meteorológica de Gondizalves com a estação do pomar de Briteiros: a. precipitação (valores médios mensais em mm d <sup>-1</sup> , N=22), b. ET <sub>o</sub> (valores médios mensais em mm d <sup>-1</sup> , N=14).....	99
Figura 5.9 - Calibração do lisímetro através da adição/remoção de cargas de valor conhecido.....	100
Figura 5.10 – Carga registada pelo lisímetro. Aberto – sistema não isolado para arejamento do solo e/ou drenagem; Fechado – isolado à superfície e sistema de drenagem fechado; Rega – efectuada uma rega; Série – compilação de todos os registos.....	101
Figura 5.11 – Dotações de rega praticadas no lisímetro.....	101
Figura 5.12 – Variação de carga do lisímetro. Aberto – sistema não isolado para arejamento do solo e/ou sistema de drenagem aberto; Fechado – isolado à superfície e sistema de drenagem fechado; Série – compilação de todos os registos; Falha pre. – preenchimento de falhas de duração igual ou inferior a 60 min.....	102
Figura 5.13 – Humidade do solo registada às 7:00 horas, medida (ML2x) e estimada com base na variação de carga do lisímetro.....	102
Figura 5.14 – Valores de GTN dos sensores de Granier sem aquecimento (a. e c.) para determinação dos GTN e posterior correcção dos valores de $\Delta T$ com aquecimento, com base nas regressões estabelecidas nos gráficos b. e d. ....	103
Figura 5.15 – Processo de fixação de $\Delta T_x$ do método de Granier para o sensor Gra_01 do ensaio em lisímetro: aplicação de um máximo móvel (Máximo móvel 11 dias) sobre o valor máximo diário de $\Delta T$ (Gra_01), seguido da aplicação de uma média móvel (Média móvel 7 dias) sobre a última série.....	104

Figura 5.16 – Valores de $\Delta T_x$ fixados para os sensores de Granier utilizados no ensaio em lisímetro por aplicação de um máximo móvel de 11 dias ao valor máximo diário de $\Delta T$ , de cada um dos sensores, seguido da aplicação de uma média móvel de 7 dias. ....	105
Figura 5.17 - Variação de carga do lisímetro. Legenda: Aberto – sistema não isolado para arejamento do solo e/ou sistema de drenagem aberto; Fechado – isolado à superfície e sistema de drenagem fechado; Série – compilação de todos os registos; Falha pré. – preenchimento de falhas de duração igual ou inferior a 60' .....	105
Figura 5.18 – Valores horários de transpiração da planta de actinidia instalada no lisímetro: Gra_1 e Gra_2 valores de transpiração acedida pela integração dos valores da densidade de fluxo de seiva registada pelos sensores de Granier, considerando a secção condutora do tronco ao nível da instalação; LIS – transpiração obtida através do balanço hídrico do lisímetro.....	107
Figura 5.19 - Valores horários de transpiração da planta de actinidia instalada no lisímetro: Gra_01 e Gra_02 valores de transpiração acedida pela integração dos valores da densidade de fluxo de seiva registada pelos sensores de Granier considerando a secção condutora do tronco ao nível da instalação com a correcção de $\Delta T$ medido com base na equação 5.1 e um coeficiente $a$ de 0.60 e 0.38, para os sensores Gra_01 e Gra_02, respectivamente; LIS – transpiração obtida através do balanço hídrico do lisímetro	109
Figura 5.20 - Valores diários da transpiração da planta de actinidia instalada no lisímetro: T Gra_01 e T Gra_02, transpiração diária obtida pela integração dos valores horários da densidade de fluxo de seiva medidos pelos sensores de Granier, considerando a secção condutora do tronco ao nível da instalação e a correcção de $\Delta T$ medido com base na Eq. [5.1] e um coeficiente $a$ de 0.60 e 0.38, para os sensores Gra_01 e Gra_02, respectivamente; LIS, transpiração obtida através do balanço hídrico do lisímetro.	109
Figura 5.21 – Densidade de fluxo de seiva obtida considerando T obtida pelo balanço hídrico do lisímetro e a secção condutora do tronco ao nível do sensor Gra_02; $k$ determinado com base nos valores de $\Delta T$ medidos (DT) e corrigidos (DTc) do sensor Gra_02 com um coeficiente de correcção $a$ de 0.38. Dados do período de 24 a 27 de Agosto de 2005.....	110
Figura 5.22 - Valores diários da transpiração da planta de actinidia instalada no lisímetro: a. transpiração obtida pela média dos sensores Gra_01 e Gra_02, com correcção independente de $\Delta T$ ( $a=0.60$ Gra_1 e $a=0.38$ Gra_2); b. transpiração obtida pela média dos sensores Gra_01 e Gra_02, com correcção conjunta de $\Delta T$ ( $a=0.52$ ).....	110
Figura 5.23 - Valores horários da transpiração da planta de actinidia instalada no lisímetro: Ind., transpiração obtida pela média dos sensores Gra_01 e Gra_02, com correcção independente de $\Delta T$ ( $a=0.60$ Gra_1 e $a=0.38$ Gra_2); Conj., transpiração obtida pela média dos sensores Gra_01 e Gra_02, com correcção conjunta de $\Delta T$ ( $a=0.52$ ); LIS, transpiração obtida através do balanço hídrico do lisímetro.....	111
Figura 5.24 – Densidade de fluxo de seiva obtida considerando T obtida pelo balanço hídrico do lisímetro e a secção condutora do tronco ao nível do sensor SG 2; $k$ determinado com base nos valores de $\Delta T$ medidos (SG 2) e corrigidos (SG 2c) com um coeficiente de correcção $a$ de 0.55. Dados do período apresentado na Figura 5.25.....	111
Figura 5.25 - Valores médios de 30 min da densidade de fluxo da planta de actinidia instalada no lisímetro: SG_2 densidade de fluxo determinada pela equação de calibração original do método de Granier; SG_2c densidade de fluxo obtida após correcção de $\Delta T$ pela Eq. [5.1] com $a=0.55$ ; LIS densidade de fluxo de seiva calculada pela variação de massa no lisímetro e a secção condutora do tronco.....	112
Figura 5.26 – Potencial hídrico de base (a), potencial hídrico do ramo (b) e condutância estomática (c) medidos ao longo dos ensaios no dispositivo I (planta do lisímetro e do pomar).....	113
Figura 5.27 – Resposta da condutância estomática ( $g_s$ ) à variação do potencial hídrico do ramo ( $\psi_{st}$ ): a. relação com todos os valores observados no ensaio; b. relação com os valores observados com a radiação fotossinteticamente activa (PAR) superior a $1500 \text{ mmol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .....	113
Figura 5.28 – Variação do potencial hídrico do ramo da planta instalada no lisímetro em função do teor de água do solo no momento da medição.....	114

Figura 5.29 – Variação do diâmetro do tronco registada pelos sensores durante o ensaio no lisímetro, com identificação dos máximos (MxD) e mínimos (MnD) diários.....	115
Figura 5.30 – Valores diários dos índices microdendrométricos MDS (daily maximum diameter shrinkage) e OGR (daily organ growth rate) observados no ensaio em lisímetro. ....	116
Figura 5.31 – Relação do potencial hídrico de base ( $p_d$ ) e do ramo ( $st$ ) com os índices microdendrométricos MDS (a.) e OGR (b.); sensor Dia_02.....	116
Figura 5.32 – Relações logarítmicas entre o índice MDS.(1-OGR) e o potencial hídrico do ramo com ajustamento independente (a.) a cada uma das séries de dados e ajustamento conjunto (b.) da relação logarítmica às séries Dia_01, Dia_02 e Dia_03.....	118
Figura 5.33 – Potencial hídrico do ramo medido e estimado pelo índice MDS.(1-OGR): a. potencial hídrico do ramo estimado pela regressão apresentada na Figura 5.32b; b. potencial hídrico do ramo estimado pela média aritmética das séries do gráfico a. ....	118
Figura 5.34 – a. série do potencial hídrico do ramo estimado para o período do ensaio e medido em alguns dias; b. teor de água do solo registado pela ThetaProbe instalada no contentor.....	119
Figura 5.35 – Potencial hídrico de base (a) e mínimo (b; medido por volta das 14:00 h) observados em 2003 no pomar de Briteiros nos talhões T-I e T-II. ....	120
Figura 5.36 – Cinéticas diárias do potencial hídrico da folha medidas nos talhões T-I e T-II: a. dia 9 de Agosto; b. dia 18 de Agosto de 2003.....	120
Figura 5.37 – Relação entre os fluxos de calor latente medidos pelo IRGA (LI_7500) e pelo higrómetro de kriptón (kriptón), durante o período de medições de 2003. ....	122
Figura 5.38 – Fecho do balanço de energia do coberto: a. período de medições de 2003; b. período de medições de 2004; c. período de medições de 2006. ....	124
Figura 5.39 – Fluxos de energia do coberto durante um período de 2003 (a), 2004 (b) e 2006 (c); H fluxo de calor sensível, LE fluxo de calor latente, Rn radiação líquida e $G_{sfc}$ fluxo de calor à superfície do solo. ....	125
Figura 5.40 – Relações H/LE e LE/(Rn-G) em 2003 (a.) e 2004 (b.). ....	126
Figura 5.41 – Evapotranspiração cultural do pomar de actinidia medida em 2003 (a) e 2004 (b).....	126
Figura 5.42 – Gradientes térmicos naturais (GTN) observados nos anos de 2004 (a), 2005 (b) e 2006 (c), durante o mês de Agosto, em plantas de T-I.....	127
Figura 5.43 – Transpiração diária acedida através da medição do fluxo de seiva ( $T_{sf}$ ) e por combinação de técnicas EC-ML ( $T_{ec}=ET_c-ET_{ei}$ ): à esquerda apresenta-se a relação antes da introdução da correcção nos dados de $\Delta T$ ; à direita apresenta-se a relação da transpiração após a introdução do factor de correcção $a=0.55$ na Eq. [5.1]; dados dos períodos com medições de $ET_c$ de 2003 e 2004.....	129
Figura 5.44 – Transpiração do coberto obtida por integração das medições de fluxo de seiva com correcção de $\Delta T$ ( $T_{sf}$ ) e obtida por $ET_c-ET_{ei}$ ( $T_{ec}$ ), nos períodos de 2003 (a.) e 2004 (b.). ....	130
Figura 5.45 – Transpiração do talhão T-I e média da transpiração dos talhões T-III, T-IV e T-V, obtida por integração das medições de fluxo de seiva com correcção de $\Delta T$ .....	130
Figura 5.46 – Número de sensores de Granier da amostra disponível no talhão T-I para a determinação da transpiração do coberto, após análise e validação dos dados. ....	131
Figura 5.47 – Transpiração do coberto obtida pela amostragem dos sensores de fluxo de seiva instalados no talhão T-I, ao longo de todo o ensaio (2003 a 2006).....	131
Figura 5.48 - Transpiração do coberto obtida pela amostragem dos sensores de fluxo de seiva instalados no talhão T-I, ao longo de todo o ensaio (2003 a 2006), sobreposta para o ciclo cultural. ....	131
Figura 5.49 – Coeficiente cultural basal da cultura ( $K_{cb}$ ) obtido para os anos de 2003 a 2006, com base na transpiração do talhão T-I.....	132

Figura 5.50 - Coeficiente cultural basal ( $K_{cb}$ ) obtido pela média do coeficiente dos anos de 2003 a 2006 (mínimo três valores), com base na transpiração do talhão T-I e $E_{To}$ do local.....	132
Figura 5.51 – Estimativa da evaporação do estrato inferior do coberto, com base no processo de cálculo descrito em Allen <i>et al.</i> (1998), para a estimativa do coeficiente de evaporação ( $K_e$ ). .....	134
Figura 5.52 – Evaporação do solo, medida (pontos cheios) e estimada (pontos vazios), 2003 (a.), 2004 (b.) e 2006 (c.). .....	134
Figura 5.53 – Coeficiente de evaporação ( $K_e$ ) do coberto de actinidia ao longo do ensaio. ....	135
Figura 5.54 – Evapotranspiração cultural ( $E_{Tc}$ ) do coberto de actinidia ao longo do período do ensaio. ....	135
Figura 5.55 – Coeficiente cultural ( $K_c=K_{cb}+K_e$ ) diário do coberto de actinidia, ao longo do período do ensaio. ....	135
Figura 5.56 – Coeficientes culturais do coberto de actinidia, obtidos pela média dos coeficientes verificados no pomar de Briteiros no período de 2003 a 2006 (média de pelo menos três anos, as barras verticais na série $K_{cb}$ correspondem a $\pm$ desvio padrão).....	136
Figura 5.57 – Regimes hídricos impostos aos diferentes talhões: a. precipitação efectiva verificada durante o ensaio ( $P_e=P-0.2E_{To}$ ); b., c. e d. dotações de rega aplicadas aos talhões T-III, T-IV e T-V, respectivamente. ....	138
Figura 5.58 – Quantidade de água aplicada em cada um dos talhões (precipitação e rega): $E_{Tc}$ , evapotranspiração do coberto obtida pela soma da transpiração do talhão T-I com a estimativa de $E$ ; $T$ , transpiração do talhão T-I.....	138
Figura 5.59 – Teor de água do solo no talhão T-I a 25 cm de profundidade na zona abrangida pelo sistema de rega. ....	139
Figura 5.60 – Pressão efectiva da água no solo, medida com tensiómetros, nos talhões T-III (a), T-IV (b) e T-V (c), a diferentes profundidades na zona abrangida pelo sistema de rega.....	139
Figura 5.61 – Potencial hídrico do ramo medido ao longo do período de ensaios em 2006 no pomar: a. potencial medido a $\frac{1}{4}$ do dia solar, b. potencial medido ao meio-dia solar e c. potencial medido a $\frac{3}{4}$ do dia solar. ....	140
Figura 5.62 – Cinéticas diárias de potencial hídrico do ramo verificadas em três dias durante os ensaios em 2006 no pomar: a. 21 de Junho, b. 27 de Julho e c. 31 de Agosto.....	141
Figura 5.63 – Condutância estomática medida ao meio-dia solar, durante os ensaios em 2006 no pomar, indicando-se a ocorrência de uma forte chuvada no período apresentado (P). ....	141
Figura 5.64 - Resposta da condutância estomática ( $g_s$ ) à variação do potencial hídrico do ramo ( $\psi_{st}$ ): a. relação com todos os valores observados no ensaio; b. relação com os valores observados com PAR superior a $1500 \text{ mmol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ; dados das observações realizadas no pomar em 2006.....	141
Figura 5.65 – Valores médios de transpiração de 21 dias, no período 10 de Junho a 10 de Julho, obtida pela integração da densidade de fluxo de seiva registada por cada um dos 12 sensores instalados em 2006 nos talhões do pomar T-III, T-IV e T-V (os losangos representam o valor médio da amostra). ....	142
Figura 5.66 – Estatísticas do grupo de 12 sensores (Todas) e das amostras de sensores consideradas pelos talhões T-III, T-IV e T-V; gráfico dos fluxos medidos pelos sensores considerando uma distribuição normal das observações.....	142
Figura 5.67 – Transpiração obtida pela integração das medições de fluxo de seiva com normalização de cada um dos sensores em relação à média dos sensores dos três talhões durante o período a sombreado; dados do ensaio de 2006 no pomar. ....	143
Figura 5.68 - Transpiração relativa dos talhões T-III e T-V em relação a T-IV; dados do ensaio de 2006 em pomar. ....	144
Figura 5.69 – a. e b. variação do diâmetro do tronco registada pelos sensores nas plantas do talhão T-III, C16 (tronco), D12 (ramo) e C14 (ramo); c. potencial hídrico do ramo observado em T-III ao meio-dia solar. ....	144

Figura 5.70 – a. e b. relação do índice MDS.(1-OGR) das medições Dia_12 e Dia_17 com o potencial hídrico do ramo, independente e conjunta, respectivamente; c. e d. relação entre o potencial hídrico do ramo medido e estimado, pelas regressões apresentadas em a. e b., respectivamente. ....	145
Figura 5.71 – a. potencial hídrico do ramo estimado pelo índice MDS.(1-OGR) para os talhões T-III e T-IV; b. ETo verificada durante o período; c. teor de água no solo no talhão T-III. ....	146
Figura 5.72 – Curvas de crescimento dos frutos observadas nos talhões T-III, T-IV e T-V, ao longo do ciclo cultural de 2006 e correspondente taxa de crescimento diária. ....	146
Figura 5.73 – Representação dos pontos da matriz do modelo GFS sobre a região do EDM. ....	147
Figura 5.74 – Previsão da temperatura a 2 m, para os quatro pontos geográficos indicados na legenda do gráfico, para o período de 10 a 20 de Maio de 2006, com um tempo de avanço de 48 horas. ....	148
Figura 5.75 – Temperatura (a.) e humidade relativa (b.), observadas ( $X_o$ ) e previstas na análise ( $X_p$ ) no período de 10 a 23 de Maio de 2006; as relações apresentadas no canto inferior direito de cada gráfico correspondem à localização 41° N e os do canto superior esquerdo à localização 42° N. ....	148
Figura 5.76 – Relação entre a temperatura do ar a 2.0 m, na análise ( $T_p$ ) e observada ( $T_o$ ) na estação meteorológica de Gondizalves, dados de 10 de Maio a 30 de Setembro de 2005, N=595. ....	149
Figura 5.77 - Temperatura horária do ar a 2 m: $T_o$ , observada na estação meteorológica de Gondizalves, $T_p$ temperatura prevista pelo modelo GFS com 48 horas de avanço, $T_p'$ corresponde a $T_p$ com correcção de escala e viés verificados no período de 10/05/2005 a 30/09/2005 na análise (+0) (Figura 5.76). ....	150
Figura 5.78 – Temperaturas mínima ( $T_{a_n}$ ), média ( $T_{a_m}$ ) e máxima ( $T_{a_x}$ ) diárias do ar a 2 m: $T_{a_o}$ , observada na estação meteorológica de Gondizalves, $T_{a_p}$ temperatura prevista pelo modelo GFS com 48 horas de avanço, após correcção dos dados. ....	151
Figura 5.79 – Relação entre a radiação solar observada ( $R_{s_o}$ ) na estação meteorológica de Gondizalves e a radiação solar prevista: a. $R_{s_p}$ radiação solar de curto comprimento de onda ( $oDSWRFsfc$ , $W m^{-2}$ ); b) $R_{s_o}$ radiação solar com céu limpo, determinada pela metodologia FAO (Allen, <i>et al.</i> , 1998), $R_s/R_{s_o}$ radiação relativa de curto comprimento de onda, que se considerou corresponder à cobertura de nuvens ( $oTDCc_{clm}$ , %) (dados do período de 10/05/2005 a 30/09/2005; N= 1125). ....	152
Figura 5.80 – Processo de cálculo de $R_{s_p}$ , sendo $R_{s_o}$ obtido pelas fórmulas apresentadas em Allen <i>et al.</i> (1998). ....	152
Figura 5.81 – Radiação solar global, observada na estação de Gondizalves ( $R_{s_o}$ ) e prevista ( $R_{s_p}$ ) com um tempo de avanço de 24 h: a. com base em $R_s$ ( $oDSWRFsfc$ ); b. considerando as duas vias apresentadas na Figura 5.80. ....	153
Figura 5.82 - Relação entre a tensão actual de vapor observada ( $e_{a_o}$ ) na estação meteorológica de Gondizalves e prevista ( $e_{a_p}$ ), no período de 2005 (N= 1120). ....	154
Figura 5.83 – Tensão actual de vapor média diária, observada na estação meteorológica de Gondizalves e prevista pelo modelo GFS com 48 horas de avanço, após correcção dos dados. ....	154
Figura 5.84 - Relação entre a velocidade do vento observada ( $u_o$ ) na estação meteorológica de Gondizalves e prevista ( $u_p$ ), com introdução de correcção para o perfil vertical do vento, no período de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N= 1123). ....	155
Figura 5.85 – Relação entre ETo calculada com base nos dados da estação meteorológica de Gondizalves e prevista com base nos dados das PNT com 48 h de avanço: a. período de 10 de Maio a 30 de Setembro de 2005 (N=3348); b. período de 10 de Maio a 30 de Setembro de 2006 (N=3368). ....	156
Figura 5.86 – Valores de ETo calculados com base nos dados meteorológicos da estação de Gondizalves (Meteorologia) e calculados com base nos dados das PNT com 48 h de avanço. ....	157
Figura 5.87 - Relação entre ETo diária calculada com base nos dados horários da estação meteorológica de Gondizalves e prevista com base nos dados das PNT com 48 h de avanço: a. período de 10 de Maio a 30 de Setembro de 2005 (N=138); b. período de 10 de Maio a 30 de Setembro de 2006 (N=136). ....	157

Figura 5.88 – Valores de ETo horários (a.) e diários (b.) determinados com os dados meteorológicos da estação de Gondizalves (Meteorologia), da PNT com um tempo de avanço de 48 h (PNT, +48 h) e com a normal climática da estação de Braga/Posto Agrário (Normal Climática). .....	160
Figura 6.1 – Esquema da contribuição relativa das fontes de informação (meteorologia, PNT e NC) para a determinação de ETo: $t$ em dias, “0” corresponde ao momento presente, representando os valores negativos o histórico e os positivos o alcance de previsão. ....	162
Figura 6.2 – a. série de ETo diária obtida com base na interpolação linear da série decendial de ETo, da normal climática da estação meteorológica de Braga/Posto Agrário (período de 1975 a 1994); b. série de ETo horária, estimada com base no total diário de ETo apresentado em a. e na curva padrão de ETo horária normalizada da região, para cada decêndio.....	163
Figura 6.3 – Curvas padrão normalizadas de ETo horária, para alguns decêndios, obtidas com base nos valores horários de ETo (dados da estação meteorológica de Gondizalves do período de 1 Janeiro de 2004 a 31 de Dezembro de 2006).....	164
Figura 6.4 – Valores de ETo dos dias do ano 162 a 165, verificada nos anos 2003 a 2006 e estimada com base na NC da região.....	164
Figura 6.5 – Comparação das previsões de ETo geradas no dia 10 de Agosto de 2005 (a.) e 2006 (b.) com os valores calculados com base nas observações meteorológicas efectuadas.....	165
Figura 6.6 – Representação gráfica da modelação da extracção de água pelas plantas com camadas de solo sobre a superfície radicular, identificando-se as propriedades atribuídas a cada uma das partições (considerando três volumes de solo).....	169
Figura 6.7 – Esquema da divisão do solo na proximidade das raízes para a resolução da equação do escoamento. ....	171
Figura 6.8 – Representação do modelo SPAC utilizado para descrever a extracção radicular, fluxo de água na planta e capacitância hídrica dos tecidos. O modelo compreende três macrorraízes ligadas em paralelo ao sistema vascular e dois locais de armazenamento hídrico variável (tronco e copado).....	173
Figura 6.9 – Espessura ( $x$ ) das camadas de solo consideradas para a resolução da equação geral do escoamento no interior dos volumes de solo associados a cada macrorraiz (Eq. [6.6], considerando $x_r=35$ mm e $m=10$ ). ....	181
Figura 6.10 – Condutância hidráulica calculada pela Eq. [6.18] para as plantas dos casos de estudo em pomar (a.) e lisímetro (b.), considerando o fluxo de seiva e o potencial hídrico do ramo medidos. ....	183
Figura 6.11 – Representação dos valores de condutância estomática observados nos estudos realizados em actinidia e função ajustada (Eq. [6.16], $g_{min}=80$ mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> , $g_{max}=700$ mmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> , $\Psi_r=0$ MPa e $s_r=3$ MPa); T-III, T-IV e T-V valores observados no pomar de Briteiros; Lisímetro e Pomar QF valores observados no ensaio em lisímetro, planta do contentor e do pomar contíguo, respectivamente. ....	185
Figura 6.12 – Potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ , Modelo) resultante da imposição do fluxo equivalente à transpiração medida (fluxo de seiva) e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ , Medido) medido ao longo do ensaio no Lisímetro.....	186
Figura 6.13 – Relação entre o potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo SPAC e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido durante o ensaio no Lisímetro.....	186
Figura 6.14 – a. potenciais hídricos do xilema na raiz ( $Y_{xr}$ ) e no copado ( $Y_{xc}$ ) simulados por imposição do fluxo de seiva medido (caso de estudo do lisímetro); b. relação entre o potencial hídrico do xilema na raiz e no copado.....	187
Figura 6.15 – a. e b. (pormenor de a.) fluxo simulado nas macrorraízes do sistema radicular; c. pressão efectiva de água à superfície da raiz nos volumes de solo explorados pelas diferentes macrorraízes, por imposição do fluxo de seiva medido (caso de estudo do lisímetro).....	188

Figura 6.16 – Pressão efectiva de água no solo nas três camadas mais próximas das macrorraízes 1 (a.), 2 (b.) e 3 (c.); d. teor de água no solo na camada mais distante da raiz nas três macrorraízes; simulação para o caso de estudo do lisímetro com transpiração medida.....	189
Figura 6.17 – Fluxo total diário registado no sistema radicular (Qrs) e ao nível das diferentes macrorraízes (1, 2 e 3); caso de estudo do lisímetro com transpiração medida.....	190
Figura 6.18 – Potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado, resultante da imposição do fluxo equivalente à transpiração medida (fluxo de seiva) e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido ao longo do ensaio no Pomar, T-III. ....	191
Figura 6.19 - Relação entre o potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ), simulado pelo modelo SPAC e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ), medido durante o ensaio no Pomar, T-III.....	191
Figura 6.20 - Potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado, resultante da imposição do fluxo equivalente à transpiração medida (fluxo de seiva) e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ), medido ao longo do ensaio no Pomar, T-IV.....	192
Figura 6.21 - Relação entre o potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ), simulado pelo modelo SPAC e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ), medido durante o ensaio no Pomar, T-IV. ....	192
Figura 6.22 - a. potenciais hídricos do xilema na raiz ( $Y_{xr}$ ) e no copado ( $Y_{xc}$ ) simulados por imposição do fluxo de seiva medido (caso de estudo pomar, T-III); b. relação entre o potencial hídrico do xilema na raiz e no copado; caso de estudo pomar, T-III. ....	192
Figura 6.23 - a. fluxo simulado nas macrorraízes do sistema radicular; c. pressão efectiva de água nas camadas de solo adjacentes às raízes nos volumes de solo explorados pelas diferentes macrorraízes, por imposição do fluxo de seiva medido (pomar, T-III). ....	193
Figura 6.24 – Pressão efectiva de água nas três camadas de solo adjacentes às raízes nas macrorraízes 1 (a.), 2 (b.) e 3 (c.); teor de água na camada de solo mais afastada das raízes nas diferentes macrorraízes; caso de estudo do pomar, T-III. ....	193
Figura 6.25 - Fluxo total diário registado no sistema radicular e ao nível das diferentes macrorraízes (caso de estudo pomar, T-III). ....	194
Figura 6.26 – Diâmetro do tronco (D) registado pelo sensor De_2 e armazenamento hídrico de variação lenta ( $W_{stem}$ ) simulado pelo modelo SPAC, considerando o fluxo imposto pela transpiração modelada com ETo, para o caso estudo Lisímetro.....	195
Figura 6.27 – Relação entre o armazenamento hídrico de variação lenta e o diâmetro do tronco registado pelos sensores De_1 (a. e c.) e De_2 (b. e d.) no período de 12 a 14 de Agosto de 2005 (a. e b., N=72) e no dia 14 de Agosto das 8:00 às 24:00 (c. e d., N=17); relação entre o potencial hídrico do xilema do tronco ( $\Psi_{xs}$ ) simulado com o modelo SPAC e o diâmetro do tronco medido pelos sensores De_1 (e.) e De_2 (f.) no dia 14 de Agosto das 8:00 às 24:00 (N=17); os diâmetros apresentados correspondem à variação observada desde a instalação dos sensores). ....	196
Figura 6.28 - Potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ) resultante da transpiração calculada e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido ao longo do ensaio no lisímetro; com transpiração modelada. ....	197
Figura 6.29 - Relação entre o potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo SPAC com a transpiração calculada e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido durante o ensaio no lisímetro; com transpiração modelada. ....	197
Figura 6.30 – Transpiração relativa (Tr) em relação à transpiração máxima; caso de estudo do lisímetro, transpiração modelada. ....	197
Figura 6.31 – Transpiração medida e obtida pelo modelo SPAC; caso de estudo do lisímetro. ....	198
Figura 6.32 – Relação entre a transpiração medida e obtida pelo modelo SPAC; caso de estudo do lisímetro. ....	198

Figura 6.33 - Variação do diâmetro do tronco (D) registada pelos sensores De_C16t (a.) e De_C14r (b.) e variação do armazenamento hídrico de variação lenta (Wstem, a.) e variação rápida (Wcrown, b.) simulado pelo modelo SPAC considerando o fluxo imposto pela transpiração calculada para o caso estudo Pomar, T-III.....	199
Figura 6.34 – Relação entre o armazenamento hídrico de variação lenta (Wstem), potencial hídrico do xilema do tronco ( $\Psi_{xs}$ ) com o diâmetro do tronco registado pelo sensor De_C16t, no período de 10 a 12 de Agosto de 2006 (a., N=72) e no dia 11 de Agosto (c. e e., N=24); relação entre o armazenamento hídrico de variação rápida (Wcrown), potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ) com o diâmetro do ramo registado pelo sensor De_C14r, no período de 10 a 12 de Agosto de 2006 (b., N=72) e no dia 11 de Agosto (d. e f., N=24). .....	199
Figura 6.35 - Potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido ao longo do ensaio e potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pela aplicação do modelo SPAC ao caso estudo Pomar, T-III (o eixo das abcissas não tem escala, apresentando-se para cada dia de medições as correspondentes a $\frac{1}{4}$ , $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ do dia solar, à excepção do dia 10 de Agosto em que só foram medidos os dois primeiros). .....	200
Figura 6.36 - Relação entre o potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo SPAC com a transpiração calculada e o potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido durante o ensaio no Pomar, T-III... ..	200
Figura 6.37 – Potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) estimado com o índice microdendrométrico MDS.(1-OGR) e potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo, pomar, T-III. ....	200
Figura 6.38 – Transpiração diária medida e simulada com o modelo SPAC, pomar, T-III. ....	201
Figura 6.39 – Relação entre a transpiração medida (vd. 5.4.3.2) e simulada com o modelo SPAC, dados do período de 7 de Julho a 13 de Setembro de 2006, pomar, T-III. ....	201
Figura 6.40 - Variação do diâmetro do tronco (D) registada pelos sensores De_F10t (a.) e De_F12r (b.), variação do armazenamento hídrico de variação lenta (Wstem, a.) e variação rápida (Wcrown, b.) simulado pelo modelo SPAC considerando o fluxo imposto pela transpiração calculada para o caso estudo Pomar, T- IV.....	201
Figura 6.41 – Relação entre o armazenamento hídrico de variação lenta (Wstem), potencial hídrico do xilema do tronco ( $\Psi_{xs}$ ) com o diâmetro do tronco registado pelo sensor De_F10t no período de 10 a 12 de Agosto de 2006 (a., N=72) e no dia 11 de Agosto (c. e e., N=24); relação entre o armazenamento hídrico de variação rápida (Wcrown), potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ) com o diâmetro do ramo registado pelo sensor De_F12r no período de 10 a 12 de Agosto de 2006 (b., N=72) e no dia 11 de Agosto (d. e f., N=24). .....	202
Figura 6.42 - Potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido ao longo do ensaio e potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pela aplicação do modelo SPAC ao caso estudo Pomar – Talhão IV (o eixo das abcissas não tem escala, apresentando-se para cada dia de medições as correspondentes a $\frac{1}{4}$ , $\frac{1}{2}$ e $\frac{3}{4}$ do dia solar, à excepção do dia 10 de Agosto em que só foram medidos os dois primeiros) .....	202
Figura 6.43 - Relação entre o potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo SPAC com a transpiração calculada e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido durante o ensaio no Pomar, T-IV. ....	203
Figura 6.44 - Potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) estimado com o índice microdendrométrico MDS.(1-OGR) e potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo, pomar, T-IV.....	203
Figura 6.45 - Transpiração diária medida e simulada com o modelo SPAC, pomar, T-IV.....	203
Figura 6.46 - Relação entre a transpiração medida (vd. 5.4.3.2) e simulada com o modelo SPAC, dados do período de 7 de Julho a 13 de Setembro de 2006, pomar, T-IV.....	204
Figura 6.47 – Previsão da transpiração (a., T) e do estado hídrico da planta (b., $\Psi_{xc}$ ) gerada pelo sistema ISIS no dia 8 de Agosto (0:00) com 10 dias de alcance; b. $\Psi_{st}$ , potencial hídrico do ramo medido e $\Psi_{xc}$ , potencial hídrico do xilema do copado previsto; caso de estudo do lisímetro. ....	205

Figura 6.48 – Previsão do estado hídrico da planta ( $\Psi_{xc}$ ) gerado com 5 dias de avanço e potencial hídrico do ramo medido ( $\Psi_{st}$ ); caso de estudo do lisímetro. ....	206
Figura 6.49 – Avaliação estatística do desempenho do sistema ISIS para a previsão do estado hídrico da planta ( $\Psi_{xc}$ ) por confrontação com o potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido; caso de estudo do lisímetro. ....	206
Figura 6.50 – Previsão gerada pelo sistema ISIS no dia no dia 8 de Agosto (0:00) com 10 dias de alcance, considerando ou não as regas praticadas: a. ETo calculada com dados meteorológicos e PNT; b. transpiração (T); c. estado hídrico da planta simulado ( $\Psi_{xc}$ ), com e sem rega; caso de estudo do lisímetro. ....	207
Figura 6.51 - Previsão da transpiração gerada pelo sistema ISIS com diferentes tempos de avanço; caso de estudo do pomar, T-III. ....	208
Figura 6.52 - Previsão da transpiração com 5 dias de avanço, enquadrada pelos valores observados, para os talhões T-III e T-IV; caso de estudo do pomar, T-III e T-IV.....	208
Figura 6.53 - Previsão da transpiração (a., T) e do estado hídrico da planta (b., $\Psi_{xc}$ ) gerada pelo sistema ISIS no dia 16 de Agosto (0:00) com 10 dias de alcance; b. $\Psi_{st}$ , potencial hídrico do ramo medido; caso de estudo do pomar, T-III. ....	209
Figura 6.54 - Previsão do estado hídrico da planta ( $\Psi_{xc}$ ) gerado com 5 dias de avanço e potencial hídrico do ramo medido ( $\Psi_{st}$ ); caso de estudo do pomar, T-III. ....	209
Figura 6.55 - Avaliação estatística do desempenho do sistema ISIS para a previsão da transpiração por confrontação com a transpiração medida; caso de estudo do pomar, T-III e T-IV. ....	210
Figura 6.56 - Avaliação estatística do desempenho do sistema ISIS para a previsão do estado hídrico da planta ( $\Psi_{xc}$ ) por confrontação com o potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido; caso de estudo do pomar, T-III e T-IV.....	210

## IV LISTA DE SÍMBOLOS

### LETRAS LATINAS

$A_{sw}$	área da secção condutora por unidade de superfície de terreno, para o cálculo do fluxo de seiva	$L^2 L^{-2}; m^2 m^{-2}$
CNF	contribuição cumulativa normalizada do fluxo medido até à distância $x_L$	%
$c_p$	calor específico do ar seco	$J kg^{-1} °C^{-1}$
$C_{sto}$	capacitância hídrica dos tecidos	$M^{-1} L^4 T^2; m^3 Pa$
D	diâmetro do órgão medido	L; mm
DP	fluxo através do limite inferior do sistema (percolação ou drenagem profunda (-) e ascensão capilar (+))	$mm d^{-1}; kg h^{-1}$
E	taxa de evaporação/transpiração	$mm d^{-1}; kg h^{-1}$
$e_a$	tensão actual de vapor da atmosfera	kPa
$EC_{ext}$	condutividade eléctrica do extracto saturado do solo	$dS m^{-1}$
ET	evapotranspiração	$kg; mm h^{-1}; mm d^{-1}$
ETc	evapotranspiração cultural	$kg; mm h^{-1}; mm d^{-1}$
ETei	evapotranspiração do estrato inferior do coberto	$kg; mm h^{-1}; mm d^{-1}$
ETo	evapotranspiração de referência	$kg; mm h^{-1}; mm d^{-1}$
G	condutância hidráulica	$L^4 T M^{-1}; m^3 Pa^{-1} s^{-1}; g MPa s^{-1}$
$G_x$	do sistema vascular das plantas (xilema)	
$g_a$	condutância aerodinâmica para o vapor de água	$m s^{-1}$
$g_c$	condutância da superfície para o vapor de água	$m s^{-1}$
$g_s$	condutância estomática	$mmol m^{-2} s^{-1}$
$G_{sfc}$	fluxo de calor sensível à superfície do solo;	$W m^{-2}; MJ m^{-2} h^{-1}; MJ m^{-2} d^{-1}$
H	fluxo de calor sensível	$W m^{-2}; MJ m^{-2} h^{-1}; MJ m^{-2} d^{-1}$
h	pressão efectiva de água no solo	cm; kPa
I	dotação de rega	mm, kg
k	índice de fluxo (método de Granier)	-
Kc	coeficiente cultural	-
Kcb	coeficiente cultural basal	-
Ke	coeficiente de evaporação	-
Ks	condutividade hidráulica do solo	$L^3 T M^{-1}; m^2 Pa^{-1} s^{-1}; L T^{-1}; cm d^{-1}$
$K_{\psi}$	condutividade hidráulica	$L^3 T M^{-1}; m^2 Pa^{-1} s^{-1}$
LE	fluxo de calor latente	$W m^{-2}; MJ m^{-2} h^{-1}; MJ m^{-2} d^{-1}$
MDS	amplitude de variação diária do diâmetro do órgão (daily maximum diameter shrinkage), diferença entre MxD e MnD	mm
MnD	diâmetro mínimo diário do órgão ( <i>daily minimum diameter</i> )	mm
MxD	diâmetro máximo diário do órgão ( <i>daily maximum diameter</i> )	mm

OGR	variação entre dois máximos diários consecutivos ( <i>organ growth rate</i> ), associado à taxa de crescimento do órgão	mm
P	precipitação	mm h <sup>-1</sup> ; mm d <sup>-1</sup>
Pe	precipitação efectiva	mm h <sup>-1</sup> ; mm d <sup>-1</sup>
Q	fluxo numa determinada secção do percurso	L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ; m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ; g s <sup>-1</sup>
Q <sub>rs</sub>	fluxo correspondente à absorção radicular	
Q <sub>sto</sub>	fluxo entre os tecidos de armazenamento e o xilema	
Q <sub>x</sub>	fluxo no sistema vascular da planta: xilema raiz-folha	
R	resistência hidráulica	L <sup>4</sup> T <sup>-1</sup> M; s m <sup>-3</sup> Pa
R <sub>r</sub>	resistência hidráulica na raiz na passagem solo-xilema	
R <sub>s</sub>	resistência hidráulica no solo	
R <sub>sto</sub>	resistência hidráulica do percurso xilema-órgão de armazenamento	
R <sub>x</sub>	resistência hidráulica no sistema vascular (xilema raiz-folha)	
Ra	radiação solar no topo da atmosfera	W m <sup>-2</sup> ; MJ m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ; MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
R <sub>d</sub>	densidade radicular, área de raízes activas por unidade de volume de solo	m <sup>2</sup> m <sup>-3</sup>
RH	humidade relativa do ar	%
Rn	radiação solar líquida à superfície	W m <sup>-2</sup> ; MJ m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ; MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
RO	entrada (+) ou saída (-) de água no solo devido ao escoamento superficial	kg; mm h <sup>-1</sup> ; mm d <sup>-1</sup>
Rs	densidade de fluxo de radiação solar global	W m <sup>-2</sup> ; MJ m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> ; MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>
S	sumidouro, representa a extracção volumétrica de água por unidade de volume de solo e tempo	L <sup>3</sup> L <sup>-3</sup> T <sup>-1</sup> ; cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ; L <sup>3</sup> L <sup>-2</sup> T <sup>-1</sup> ; mm d <sup>-1</sup>
T	transpiração	kg; mm h <sup>-1</sup> ; mm d <sup>-1</sup>
Ta	temperatura do ar	°C ou K
Ta <sub>m</sub>	média diária do ar	
Ta <sub>n</sub>	mínima diária do ar	
Ta <sub>x</sub>	máxima diária do ar	
Tsf	transpiração obtida pela integração da densidade de fluxo de seiva	kg; mm h <sup>-1</sup> ; mm d <sup>-1</sup>
u <sub>2</sub>	velocidade média horária do vento, medida a 2 m de altura	m s <sup>-1</sup>
VPD	deficit de pressão de vapor do ar ( <i>Vapour Pressure Deficit</i> )	Pa; kPa; MPa
W <sub>sto</sub>	armazenamento hídrico dos tecidos	L <sup>3</sup> ; cm <sup>3</sup>
X <sub>max</sub>	espessura da camada de solo hipotética sobre as raízes	mm

## LETRAS GREGAS

---

$\Delta$	declive da curva da pressão de vapor de saturação	Pa °C <sup>-1</sup>
$\Delta T_x$	diferença de temperatura entre as duas sondas do sensor de Granier em situação de densidade de fluxo nula	°C
$\Delta T$	diferença de temperatura medida entre as duas sondas do sensor de Granier	°C
$\Delta T_{sw}$	valor corrigido de $\Delta T$ relativo ao método de Granier	°C
$\Psi$	potencial hídrico	M L <sup>-1</sup> T <sup>-2</sup> , Pa, kPa, MPa
$\Psi_s$	matriz do solo	
$\Psi_x$	xilema	
$\Psi_{xr}$	xilema da raiz	
$\Psi_{xs}$	xilema no tronco	
$\Psi_{xc}$	xilema no copado	
$\Psi_r$	superfície solo-raiz	
$\Psi_{sto}$	tecidos de armazenamento	
$\Psi_l$	foliar ( <i>leaf</i> )	
$\Psi_{pd}$	foliar de base ( <i>predawn</i> )	
$\Psi_{md}$	foliar mínimo ( <i>midday</i> )	
$\Psi_{st}$	foliar do ramo ( <i>stem</i> )	
$\Psi_p$	potencial de pressão ou potencial hidrostático	
$\Psi_o$	potencial osmótico	
$\Psi_g$	potencial gravitacional	
$\Psi_m$	potencial mátrico	
$\lambda$	calor latente de vaporização da água	J kg <sup>-1</sup>
$\rho_a$	densidade do ar	kg m <sup>-3</sup>
$\theta_s$	teor de água do solo	L <sup>3</sup> L <sup>-3</sup> ; m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
$\gamma$	constante psicrométrica	Pa C <sup>-1</sup> ; kPa °C <sup>-1</sup>
$v$	densidade de fluxo	mm s <sup>-1</sup> ; m <sup>3</sup> .m <sup>2</sup> de área de xilema.s <sup>-1</sup>

## SIGLAS

---

ABA	ácido abscísico
BE	erro viés ( <i>bias error</i> )
CWSI	<i>crop water stress index</i>
DRAEDM	Direcção Regional de Agricultura de Entre Douro e Minho
EC	método das flutuações instantâneas ( <i>eddy covariance</i> )
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EUA	Estados Unidos da América
GFS	Global Forecasting System (NOAA/NCEP)
GTN	gradiente térmico natural
IC	intervalo de confiança
IM	Instituto de Meteorologia, IP Portugal
ISIS	sistema integrado para a gestão da rega ( <i>integrated system for irrigation scheduling</i> )
LVDT	<i>linear variable displacement transducers</i>
MAE	erro médio absoluto ( <i>mean absolute error</i> )
ML	mini-lisímetros
NC	normal climática
PAR	radiação fotossinteticamente activa ( <i>photosynthetically active radiation</i> )
PNT	previsão numérica do tempo
PRD	rega parcial do sistema radicular ( <i>partial rootzone drying</i> )
RDI	rega deficitária controlada ( <i>regulated deficit irrigation</i> )
RMSE	raiz do erro quadrático médio ( <i>root mean square error</i> )
SAD	sistema de aquisição de dados
SNIRH	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, organismo do Instituto da Água (INAG, I.P.)
SPAC	contínuo solo-planta-atmosfera ( <i>Soil-Plant-Atmosphere Continuum</i> )





# CAPÍTULO 1

## ENQUADRAMENTO, OBJECTIVO E ORGANIZAÇÃO DA TESE



### SUMÁRIO

Neste capítulo é apresentado o enquadramento geral da tese, com referência ao contexto e motivação pessoal para a realização deste trabalho.

No segundo ponto é apresentado o objectivo principal do trabalho e o seu âmbito de aplicação.

Termina-se o capítulo com uma breve descrição da metodologia utilizada e da organização do documento.

1.1. MOTIVO E OBJECTIVO DO ESTUDO

1.2. ÂMBITO DE APLICAÇÃO DO ESTUDO

1.3. METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

# 1 ENQUADRAMENTO, OBJECTIVO E ORGANIZAÇÃO DA TESE

## 1.1 Enquadramento e objectivo do estudo

No contexto actual da produção vegetal, a afectação dos factores de produção (recursos) às culturas deverá assegurar as necessidades culturais e controlar, quando possível pela manipulação da sua aplicação, algumas respostas fisiológicas das plantas, sem contudo causar impactos negativos para o ambiente. No entanto, constata-se que a larga maioria dos produtores agrícolas continua a gerir a rega de forma simplista e negligente. As pressões externas relacionadas com a crescente escassez de água, o aumento do custo da água, a internalização dos custos ambientais gerados por uma incorrecta utilização deste factor e a crescente valorização da qualidade dos produtos, deverão levar a uma alteração do paradigma de gestão vigente.

Tradicionalmente a gestão da rega é baseada no solo, quer na medição directa do estado hídrico (teor de água ou potencial mátrico) ou na estimativa do seu estado hídrico pela aplicação do balanço hídrico ao solo, no qual a variação do teor de água, num determinado período, é determinada pela diferença entre as entradas (rega, precipitação e ascensão capilar) e perdas (evapotranspiração, escoamento superficial e drenagem). Conceptualmente, a utilização do balanço hídrico dispensa a realização de medições. No entanto, pelo facto de os erros de estimativa das componentes do balanço serem cumulativos no tempo, é necessário periodicamente aferir o balanço realizado com medições directas do estado hídrico do solo ou da planta. Acresce que a resposta da planta a um determinado estado hídrico do solo é traduzida por uma função complexa da procura evaporativa exercida pela atmosfera (Jones, 2004). A actividade da planta (fisiologia) em termos hídricos é determinada pelo estado hídrico dos seus tecidos (hidratação e potencial hídrico) pelo que, não havendo uma relação unívoca entre o estado hídrico do solo e o estado hídrico da planta, a implementação de planos de gestão da rega mais exigentes no controlo do estado hídrico da planta só serão possíveis com a sua monitorização directa. Nesta abordagem, a gestão da rega deverá ser baseada na observação directa da resposta da planta às condições do meio.

No que concerne aos recursos hídricos, houve nas últimas décadas grandes avanços ao nível dos sistemas de distribuição, aplicação de água na parcela e na área da instrumentação de medida. No entanto, houve pouca evolução das ferramentas de apoio à gestão da rega ao nível da parcela que permitam aceder e integrar facilmente os dados recolhidos pelos instrumentos de medida e fazer a condução da rega de acordo com planos de gestão hídrica. A maioria dos sistemas de monitorização vegetal actuais são constituídos por uma rede de sensores, geralmente relacionados com o estado hídrico do solo, um subsistema de aquisição, processamento e transmissão dos

dados e por uma interface gráfica para visualização das leituras de cada um dos sensores ou uma estatística descritiva por unidade de monitorização (média por talhão). Estes sistemas apresentam a lacuna de não extraírem conhecimento sobre os processos, ficando a tarefa a cargo do operador do sistema, conhecimento esse ainda mais importante no caso das culturas perenes que estão instaladas durante um período bastante alargado (geralmente 10 a 30 anos), praticamente nas mesmas condições edáficas e culturais, sendo normalmente a meteorologia o factor de maior variação entre ciclos culturais.

Actualmente, na produção vegetal, o fornecimento de água às plantas representa mais do que a manutenção das plantas em condições de pleno conforto hídrico. Com base no conhecimento empírico e científico adquirido são inúmeras as culturas em que é possível sujeitar as plantas, em determinadas fases do ciclo cultural, a situações de stress hídrico ligeiro a moderado para mitigar a falta de água para rega ou porque são mesmo benéficas em termos da qualidade e/ou quantidade dos produtos e em termos da rentabilidade das culturas. A aquisição de conhecimento pela via empírica é lenta e está, no caso da utilização dos recursos hídricos, dependente da variabilidade climática, da disponibilidade hídrica do solo, das reservas de água para rega e das práticas culturais. Desta forma, pela conjugação de vários factores em alguns anos obtêm-se produções elevadas e de boa qualidade. No entanto, apesar de se ter percepção que o factor “água” teve um efeito preponderante no resultado, não se conseguem identificar claramente os níveis deste factor e as fases do ciclo cultural que mais contribuíram para o resultado final, não se conseguindo posteriormente reproduzir estas condições. Por outro lado, a investigação e experimentação, na área da utilização dos recursos hídricos, têm produzido conhecimento sobre os níveis de estado hídrico nas diferentes fases do ciclo cultural de cada cultura, que beneficiam os parâmetros associados à qualidade das produções e os impactos na quantidade produzida. Os estudos têm incidido especialmente sobre fruteiras e vinha, culturas em que a qualidade dos produtos é determinante em termos de mercado. Estes vieram corroborar e aumentar significativamente o conhecimento empírico adquirido pelos agricultores e comprovar que o controlo da utilização da água pelas culturas, designadamente do seu estado hídrico, permite controlar vários processos fisiológicos e obter algumas respostas desejáveis em termos agronómicos.

Apesar do conhecimento adquirido, a implementação de protocolos de gestão da rega que integrem estes conhecimentos tem falhado devido à dificuldade em submeter as plantas ao longo do ciclo cultural aos níveis de estado hídrico pretendidos. Parte desta dificuldade surge, nas culturas de ar livre, devido à variabilidade e imprevisibilidade meteorológica. Contudo, subsistem lacunas na determinação das necessidades hídricas e de rega para a prossecução dos níveis de estado hídrico pretendidos em cada uma das fases do ciclo, para além dos problemas operacionais ainda

verificados nos sistemas de rega, tais como a uniformidade de distribuição e o controlo da dotação aplicada.

Com base nas ideias apresentadas e na percepção de que o conhecimento científico sobre a utilização da água pelas plantas está actualmente bastante desenvolvido, é relevante a realização de estudos conducentes ao desenvolvimento de uma nova geração de ferramentas para a gestão da rega (ou gestão hídrica) ao nível da exploração agrícola (parcela). Deste modo, nesta tese, inicia-se o trabalho de especificação, concepção e desenvolvimento de um sistema que permita integrar o conhecimento empírico e científico (bibliográfico) adquirido sobre as culturas, informações recolhidas por uma rede de monitorização vegetal, informação meteorológica e previsões do estado do tempo. Com a conjugação destas fontes de informação/conhecimento pretende-se determinar as necessidades hídricas da cultura, em função do estado hídrico, para diferentes intervalos temporais, considerando as condições meteorológicas expectáveis ao longo desse intervalo de tempo. Para a sua realização o estudo incidiu principalmente sobre dois eixos de trabalho: a monitorização da actividade da planta e a previsão das necessidades hídricas da cultura a curto prazo.

O objectivo subjacente na previsão das necessidades hídricas da cultura é o de melhorar as práticas de gestão da rega actuais, nas quais as dotações de rega praticadas são efectuadas principalmente com o intuito de restituir o armazenamento hídrico do solo, com base na depleção ocorrida anteriormente. Com o contínuo desenvolvimento nas últimas décadas dos modelos de previsão numérica do estado do tempo é possível actualmente realizar previsões com reconhecida validade até 5 dias de avanço e até 10 dias com alguma vantagem em relação ao estado do tempo mais frequente (normal climática). Desta forma, com a incorporação desta fonte de informação externa será possível conduzir a rega de forma a fazer face às necessidades expectáveis a curto prazo para assegurar o estado hídrico pretendido. Nos planos de gestão hídrica que contemplem alguma carência hídrica, as vantagens da previsão do estado do tempo serão ainda maiores.

## **1.2 Âmbito de aplicação do estudo**

Atendendo à especificidade das diferentes culturas agrícolas e aos diferentes modos de produção vegetal, houve necessidade de limitar o campo de aplicação do sistema em desenvolvimento a culturas lenhosas, anisotrópicas, de ar livre (cultivadas no solo). Nestas incluem-se fruteiras, oliveiras e vinhas, entre outras. Estas culturas apresentam em geral um bom retorno económico e é nelas frequente ou vantajosa a condução da rega abaixo dos níveis de pleno conforto hídrico, para a promoção de determinadas respostas fisiológicas ou para a economia de água, até porque frequentemente estas culturas se encontram instaladas em zonas com alguma escassez de recursos hídricos. Esta limitação do âmbito de utilização não inviabiliza a aplicabilidade

noutros tipos de culturas e modos de produção. Porém, estes não foram considerados na identificação das restrições ao definir os pré-requisitos do sistema e do subsistema de monitorização vegetal.

Em relação à escala temporal de aplicação do sistema, procurou-se constituir as bases do que será um sistema para gestão da rega em culturas perenes. Nesta fase de desenvolvimento pretende-se que o sistema seja capaz de determinar o consumo e estado hídrico actuais das culturas bem como prever a evolução destas variáveis a curto/médio prazo.

Alguns aspectos actualmente relacionados com a gestão da rega, como a nutrição (fertilização), a qualidade da água de rega e a salinidade do solo, não foram considerados neste estudo, salvaguardando-se contudo as possíveis interacções com os estudos realizados desses domínios.

### **1.3 Organização do documento**

O documento escrito está dividido em 7 capítulos: neste inicial é feita uma introdução na qual se apresenta a motivação e o seu campo de aplicação. O segundo capítulo constitui uma revisão bibliográfica dos fundamentos de suporte à abordagem para a resolução do problema. No capítulo 3, é descrito o desenvolvimento conceptual do sistema sendo identificados os pré-requisitos, definido o arquétipo do sistema e apresentados os principais domínios científicos de suporte. No capítulo 4, faz-se a caracterização dos meios experimentais usados, apresentam-se os métodos e as medições realizadas nos diversos estudos experimentais conduzidos, terminando com a sistematização dos dispositivos e protocolos experimentais utilizados. No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios efectuados, a edição dos dados e a análise dos resultados constituindo, desta forma, os resultados de base. Faz parte também deste capítulo a análise das previsões numéricas do tempo e a consequente previsão da evapotranspiração de referência. No capítulo 6, são formalizadas as componentes do sistema e feita uma avaliação da aplicação *ex post* do sistema obtido aos casos de estudo. No capítulo 7, são apresentadas as principais conclusões do estudo e linhas de trabalho a explorar. Nos pontos subsequentes apresentam-se as referências bibliográficas e os anexos.



## CAPÍTULO 2

### CARACTERIZAÇÃO CONCEPTUAL DO MEIO A MODELAR



#### SUMÁRIO

A determinação das necessidades hídricas das culturas requer a quantificação da transpiração do coberto vegetal e caracterização do estado hídrico verificado. Apenas com a compreensão e caracterização dos mecanismos relevantes que governam o fluxo de água na planta e interações com a sua actividade metabólica será possível desenvolver qualquer tentativa de modelação com vista a descrever e prever o funcionamento hídrico destes sistemas.

Os modelos estáticos e dinâmicos das relações hídricas das plantas, aplicados a diferentes escalas espaciais do sistema (célula, órgão, planta, coberto), baseiam-se num conjunto de princípios base aqui sintetizados.

Na parte final são feitas algumas considerações relativamente aos cobertos em estudo, cobertos lenhosos anisotrópicos regados.

#### 2.1 RELAÇÕES HÍDRICAS DAS PLANTAS – CONCEITO SPAC

##### 2.1.1 Solo-planta: absorção

##### 2.1.2 Fluxos na planta

##### 2.1.3 Planta-atmosfera: transpiração

#### 2.2 COBERTOS LENHOSOS ANISOTRÓPICOS REGADOS

#### 2.3 BALANÇO HÍDRICO E ENERGÉTICO DOS COBERTOS

## 2 CARACTERIZAÇÃO CONCEPTUAL DO MEIO A MODELAR

Os modelos sobre as relações hídricas das plantas são componentes fundamentais de todos os modelos culturais devido ao papel crítico que o estado hídrico desempenha no crescimento, produtividade e qualidade das produções (Jones e Tardieu, 1998). Atendendo à estrutura do sistema ISIS<sup>1</sup> definida no capítulo 3, a planta é o elemento principal do sistema, dado que a monitorização vegetal efectuada incide sobre uma amostra de plantas da cultura e é utilizado um modelo SPAC (*Soil-Plant-Atmosphere Continuum*) para integrar a monitorização efectuada e prever o estado futuro das variáveis caracterizadoras do funcionamento hídrico da cultura.

### 2.1 Relações hídricas das plantas – conceito SPAC

A base teórica das relações hídricas das plantas, ao nível a que se pretende trabalhar, compreende modelos para representar, descrever e modelar o fluxo de água através das plantas, incluindo os fluxos nas zonas de interface com o solo (absorção) e com a atmosfera (transpiração).

O conceito SPAC proporciona uma teoria unificada através da qual o movimento da água desde o solo até às folhas e a sua evaporação para o ar envolvente pode ser estudado em termos das forças motrizes e das resistências a operar em cada segmento. Este conceito também é útil quando se pretende estudar a forma como vários factores, intrínsecos ou ambientais, podem afectar o movimento da água ao influenciar quer as forças motoras, quer as resistências ou ambas.

O fluxo de água desde o solo até à atmosfera pode ser dividido em diferentes segmentos: fluxo de água no solo até à proximidade da raiz; fluxo de água na zona de contacto solo/raiz; absorção pela raiz e movimento até ao xilema da raiz; movimento no xilema até às folhas; evaporação nas células do mesófilo; difusão do vapor de água através dos estomas para a camada limite da folha; transporte para a zona turbulenta da atmosfera. Em todos estes segmentos, à excepção dos últimos habitualmente expressos como proporcionais ao gradiente de concentração de vapor de água, os fluxos são proporcionais à diferença de potencial hídrico<sup>2</sup> operante verificado nos percursos e inversamente relacionados com a resistência interposta. As plantas podem ser consideradas como sistemas hidráulicos e as ramificações (tronco e ramos) como uma rede hidráulica. A Figura 2.1 ilustra a gama de valores da variação de potencial hídrico que podem ocorrer ao longo do sistema SPAC. Como representado, a variação de potencial hídrico entre o solo

---

<sup>1</sup> Acrónimo que será usado para referir o sistema desenvolvido neste estudo - *Integrated System for Irrigation Scheduling*, conforme apresentado em 3.3.

<sup>2</sup> No Anexo I apresenta-se o conceito de potencial hídrico e a definição das principais componentes habitualmente consideradas em fisiologia vegetal.

e a atmosfera pode ser de várias dezenas de megapascals, ou mesmo mais de 100 MPa. Contudo, no conjunto, a redução total de potencial hídrico entre o solo e as folhas na maioria das plantas, apenas varia entre 0.5 e -3.0 MPa (Jones, 1992), correspondendo ao valor máximo que as plantas podem suportar. Atendendo aos valores de potencial hídrico da atmosfera, a maior variação de potencial no sistema SPAC ocorre entre as folhas e a atmosfera.

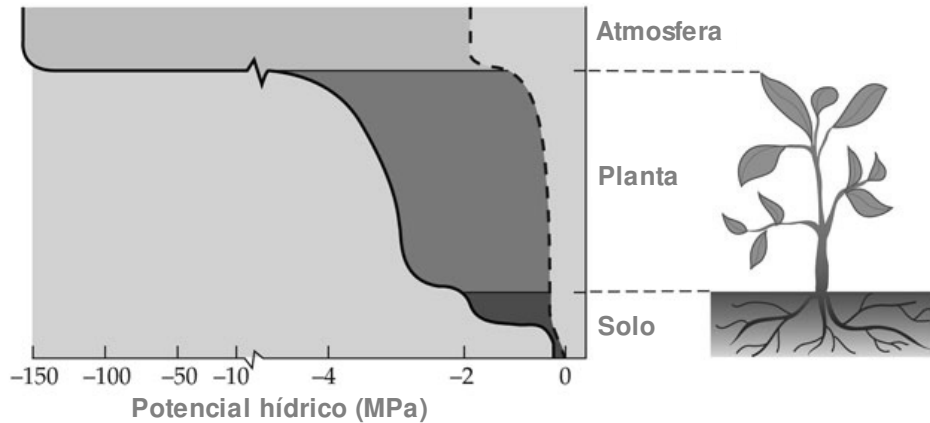


Figura 2.1 - Representação esquemática da variação do potencial hídrico ao longo do sistema SPAC; extraído e adaptado de Gurevitch *et al.* (2006a).

O fluxo de água é directamente proporcional à diferença de potencial hídrico e inversamente proporcional à resistência hidráulica verificada ao longo do percurso, deslocando-se a água preferencialmente pelas vias que ofereçam menor resistência (Kozlowski e Pallardy, 1997). O fluxo em qualquer parte do sistema SPAC pode ser descrito através da Eq. [2.1]. Neste estudo, para a caracterização das propriedades hidráulicas no sistema SPAC utilizou-se a terminologia proposta por Reid *et al.* (2005).

$$Q = K_{\psi} A_s \frac{\Delta\Psi}{L} \quad [2.1]$$

onde,

$Q$  fluxo numa determinada secção do percurso ( $L^3 T^{-1}$ ,  $m^3 s^{-1}$ );

$K_{\psi}$  condutividade hidráulica ( $L^3 T M^{-1}$ ,  $m^2 Pa^{-1} s^{-1}$ );

$A_s$  área da secção condutora ( $L^2$ ,  $m^2$ );

$\Psi$  potencial hídrico ( $M L^{-1} T^{-2}$ , Pa);

$L$  comprimento do elemento (L, m).

Para a modelação do fluxo de água através da planta esta equação é geralmente traduzida na forma análoga à Lei de Ohm, onde a complexidade do percurso por onde se dá o fluxo no meio poroso (comprimento, área da secção e condutividade) é representada através de uma resistência ou de uma condutância. Desta forma, o fluxo passa a ser descrito pela aplicação de uma das Eq. [2.2].

$$Q = G \Delta\Psi ; Q = \frac{\Delta\Psi}{R} \quad [2.2]$$

onde,

$R$  resistência hidráulica ( $L^{-4} T^{-1} M, s m^{-3} Pa$ );

$G$  condutância hidráulica, inverso da resistência hidráulica ( $L^4 T M^{-1}, m^3 Pa^{-1} s^{-1}$ ).

De acordo com esta formulação do fluxo de água nas plantas, os vários factores que podem afectar o movimento em cada uma das fases do percurso, independentemente da sua natureza, podem ter impacto quer na força motriz para o movimento, quer na resistência interposta ao fluxo, quer em ambos aspectos, tal como a depleção da água do solo (Kramer, 1983). A soma de todas as resistências verificadas ao longo do percurso determinam a diferença de potencial, entre o solo e as folhas, necessária para manter o fluxo.

### 2.1.1 Solo – planta: absorção

O fluxo ao longo do contínuo SPAC é determinado por factores tais como o funcionamento dos estomas presentes nas folhas que regulam a transpiração na interacção com a atmosfera e por factores do solo, tais como profundidade, distribuição e actividade das raízes, bem como pelas propriedades do solo como a curva de tensão-retenção e a condutividade hidráulica (Jackson *et al.*, 2000). As raízes das plantas desempenham diversas funções nas quais se incluem a absorção e o transporte de água. A absorção de água, processo no qual a água passa da matriz do solo para os tecidos condutores da planta (xilema), ocorre devido a gradientes de potencial hídrico existentes entre o solo, explorado pelo sistema radicular e o xilema das raízes, traduzida pela Eq. [2.3].

$$Q_{rs} = - \frac{\Psi_{xr} - \Psi_s}{R_s + R_r} \quad [2.3]$$

onde,

$Q_{rs}$  fluxo correspondente à absorção radicular ( $L^3 T^{-1}, m^3 s^{-1}$ );

$\Psi_s$  e  $\Psi_{xr}$  potencial hídrico na matriz do solo e no xilema da raiz, respectivamente ( $M L^{-1} T^{-2}, Pa$ );

$R_s$  e  $R_r$  resistências hidráulicas no solo e na raiz na passagem solo-xilema, respectivamente ( $L^{-4} T^{-1} M, s m^{-3} Pa$ ).

O potencial hídrico do solo depende principalmente da componente mátrica e geralmente em muito menor escala do potencial osmótico. Em termos práticos, o potencial mátrico é difícil de dissociar do potencial de pressão, pelo que o potencial mátrico é geralmente expresso juntamente com o potencial de pressão. No xilema da planta, a componente de pressão é geralmente preponderante, assumindo a componente osmótica importância apenas em situações de baixo fluxo. A raiz representa uma barreira ao fluxo em massa dos sais dissolvidos na água do solo, pelo que a componente osmótica interfere na absorção radicular. Contudo, o potencial osmótico dos

solos e do xilema da raiz é pequeno, bem como o seu gradiente, e é comum considerar apenas a componente de pressão como a força motriz neste percurso<sup>3</sup>.

O movimento de água através do córtex da raiz para o sistema vascular (xilema) ocorre através de diferentes vias. A importância relativa destas vias é de difícil determinação e admite-se variar. Em comparação com a condutividade das outras componentes do sistema vascular das plantas, este percurso, solo-xilema, apresenta uma baixa condutividade hidráulica (Agele *et al.*, 2006), representando 40 a 70% da resistência total encontrada ao fluxo de água nas plantas (Tromp *et al.*, 2005). Como consequência, o gradiente de potencial hídrico entre o solo e o xilema da raiz é considerável.

A condutividade das raízes é diminuída por vários factores. Um deles é a redução da temperatura, sendo o aumento da viscosidade da água e o efeito da temperatura sobre a condutividade das membranas existentes nos tecidos, algumas das causas apontadas (Tromp *et al.*, 2005). Há outros factores externos tais como secura e salinidade do solo e factores internos, tais como o estado nutricional e hídrico da planta (Steudle, 2000). Além dos factores abióticos, a condutividade hidráulica das raízes varia em função do desenvolvimento e envelhecimento das raízes (Steudle, 2000). Situações de anaerobiose e inibidores da respiração reduzem a condutividade indicando que a respiração também deverá ter efeito na absorção de água pelas plantas, ideia apoiada pelo facto de as situações de encharcamento do solo, que reduzem a disponibilidade de oxigénio, reduzirem a absorção de água, originando stress hídrico (Tromp *et al.*, 2005).

A absorção de água pelas raízes depende da diferença de potencial entre as raízes e o solo. No entanto, este fluxo causa uma dinâmica não linear no espaço e no tempo pelo que, devido a esta interdependência, não se pode tratar a absorção de água pelas raízes como um processo isolado, tendo que ser modelado conjuntamente com os movimentos de água no solo (Früh e Kurth, 1999). Quando ocorre absorção à superfície das raízes tem de haver convergência de água no solo em direcção às raízes de forma a manter o fluxo. No entanto, a condutividade hidráulica dos solos varia fortemente com o teor de água do solo, podendo variar duas a três ordens de magnitude, dentro da gama de valores utilizáveis pela planta (Jones e Tardieu, 1998). À medida que ocorre extracção de água junto às raízes esta zona pode apresentar condutividades muito baixas. Em resultado, o estado hídrico do solo pode sofrer uma grande quebra na proximidade das raízes, especialmente para baixos valores de potencial hídrico (Tuzet *et al.*, 2003), podendo apresentar diferenças de potencial até 1 MPa em distâncias da ordem de um decímetro (Jones e Tardieu, 1998).

---

<sup>3</sup> Na modelação desenvolvida neste estudo não se considerou o efeito da concentração osmótica da solução do solo na absorção radicular.

Em certas condições a raiz funciona como um osmómetro e não como uma resistência hidráulica (Steudle, 2000; Steudle e Peterson, 1998). A força motriz para a absorção de água pelas plantas originada pela transpiração nas folhas (gradiente de pressão no percurso solo-folha) dá origem, na ausência de transpiração, a um fluxo originado pela acumulação de iões no xilema da raiz.

A distribuição das raízes no solo não é regular (devido a factores genéticos, pedológicos, culturais, etc.), pelo que a extracção de água do solo também não é uniforme em todo o perfil. Por isso, nem as medições pontuais do potencial hídrico do solo, nem mesmo valores médios, são expectáveis de fornecer uma imagem fidedigna da água realmente disponível para as plantas. O fluxo de água no solo na proximidade das raízes e o potencial hídrico das raízes é fortemente afectado pelo arranjo espacial das raízes no solo, verificando-se que: com um sistema radicular uniformemente distribuído no solo, o potencial hídrico radicular mantém-se próximo do potencial hídrico do solo; no caso de um sistema radicular, com a mesma extensão mas com uma distribuição irregular, a resistência à transferência hídrica no solo é consideravelmente aumentada, podendo o potencial hídrico do sistema radicular diferir significativamente da matriz do solo (Jones e Tardieu, 1998). Este défice não é devido ao estado hídrico do solo mas sim devido à capacidade das raízes extraírem água.

Actualmente, atribui-se mais uma função importante ao sistema radicular, a redistribuição hidráulica passiva de água no solo de zonas com mais humidade para zonas com menor disponibilidade hídrica, podendo assumir um papel importante na redistribuição do perfil vertical de água (Nadezhdina *et al.*, 2007), partição da água intra e inter espécies e no balanço dos ecossistemas (Meinzer *et al.*, 2001). Em acréscimo ao efeito benéfico que possa ter no balanço hídrico durante períodos de seca, a redistribuição hidráulica deverá aumentar a disponibilidade efectiva de nutrientes nas camadas superficiais do solo, onde geralmente o seu teor é superior, facilitando a sua aquisição pelas raízes finas superficiais.

#### **2.1.1.1. Modelação da extracção radicular**

Os modelos existentes, para traduzir a extracção de água do solo pelas plantas, usam diferentes níveis de detalhe necessitando consequentemente de diferentes informações do sistema radicular e do solo para a sua parametrização e aplicação. Estes modelos são geralmente agrupados em duas categorias: modelos microscópicos e macroscópicos.

Nos modelos a nível microscópico é considerada uma raiz cilíndrica hipotética com um volume de solo associado, por unidade de comprimento, como representado esquematicamente na Figura 2.2. As raízes são consideradas como longos cilindros, com um raio uniforme ao longo do

seu comprimento, com propriedades hidráulicas definidas e considera-se que o fluxo de água no solo ocorre apenas na direção radial (Feddes *et al.*, 2001). O sistema radicular no seu conjunto é descrito por um conjunto de raízes individuais, distribuídas no solo com uma distância que pode variar conforme a densidade radicular em cada ponto da matriz do solo explorado pela planta. A aplicação da equação de Richards a esta representação é traduzida pela Eq. [2.4] (Tuzet *et al.*, 2003).

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r K_s \frac{\partial h}{\partial r} \right) \quad [2.4]$$

onde,

$\theta_s$  teor de água do solo ( $L^3 L^{-3}$ ,  $cm^3 cm^{-3}$ );

$t$  tempo (T, s);

$r$  distância radial ao eixo da raiz (L, cm);

$K_s$  condutividade hidráulica do solo ( $L T^{-1}$ ,  $cm d^{-1}$ );

$\Psi_s$  potencial hídrico do solo (L, cm).

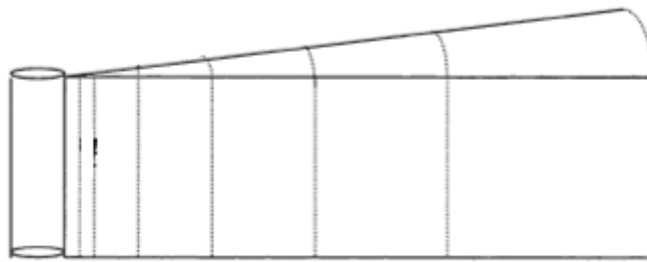


Figura 2.2 – Representação esquemática da geometria cilíndrica da raiz usada para a modelação a nível microscópico da extracção radicular e movimento de água no solo.

Esta abordagem pressupõe a consideração apenas do potencial hídrico de pressão, modelando-se o fluxo de água na proximidade das raízes e considerando-se uma resistência ou condutância da raiz por unidade de comprimento para o fluxo solo-raiz (absorção). A consideração da resistência ao fluxo de água solo-raiz permite modelar a compensação da redução da extracção em zonas do solo com menos disponibilidade hídrica através da activação de zonas de solo com mais disponibilidade, ainda que com menos densidade radicular (Hopmans e Bristow, 2002).

A nível macroscópico, a abordagem tradicional considera a extracção radicular por camadas horizontais, incluindo um termo (sumidouro) na equação de Richards para representar a extracção de água pelas raízes contidas em cada uma das camadas de solo (Skaggs *et al.*, 2006; Feddes *et al.*, 2001). Esta formulação é traduzida pela Eq. [2.5] para um sistema monodimensional, considerando apenas o fluxo vertical de água no solo e a extracção difusa de água no perfil.

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S(z) \quad [2.5]$$

onde,

$\theta_s$  teor de água do solo ( $L^3 L^{-3}$ ,  $cm^3 cm^{-3}$ );

$t$  tempo (T, s);

$z$  coordenada vertical (L, cm);

$K_s$  condutividade hidráulica do solo ( $L T^{-1}$ ,  $cm d^{-1}$ );

$h$  pressão efectiva de água no solo (L, cm).

$S$  sumidouro, extracção volumétrica de água por unidade de volume de solo e tempo ( $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ,  $cm^3 cm^{-3} d^{-1}$ ;  $L T^{-1}$ ,  $mm d^{-1}$ ), função da profundidade da camada de solo ( $z$ ).

A extracção máxima em cada camada de solo é determinada pela partição feita do sistema radicular pelas camadas, geralmente através de uma função de densidade de comprimento ou de área de raízes.

Nesta modelação, em condições de plena disponibilidade hídrica do solo, a extracção de todo sistema radicular é máxima,  $S_{max}(z)$  ( $L T^{-1}$ ,  $mm d^{-1}$ ), sendo igual à transpiração potencial,  $T_{max}$  ( $L T^{-1}$ ,  $mm d^{-1}$ ) que é governada pelas condições atmosféricas (excluindo o efeito da capacitância hídrica dos tecidos). Situações de stress, quer provocadas pela redução do teor de água no solo, quer devido ao efeito de concentrações salinas elevadas, originam a redução de  $S_{max}(z)$ , sendo a extracção obtida pela Eq. [2.6].

$$S(z) = \alpha_{rw} \alpha_{rs} S_{max}(z) \quad [2.6]$$

onde,

$\alpha_{rw}$  função de redução da absorção pela pressão efectiva de água no solo, 0 a 1 (Figura 2.3);

$\alpha_{rs}$  função de redução da absorção pelo efeito da salinidade do solo, 0 a 1 (Figura 2.4);

$S_{max}(z)$  extracção potencial do sistema radicular ( $L T^{-1}$ ,  $mm dia^{-1}$ ).

A função  $\alpha_{rw}$  traduz a redução da absorção radicular devido ao estado hídrico do solo (0 a 1), sendo comumente definida por 5 valores críticos do estado hídrico do solo, três pontos relativos a estados de escassez de água no solo ( $h_{3l}$ ,  $h_{3h}$  e  $h_4$ ), um relativo ao ponto óptimo de máxima disponibilidade ( $h_2$ ) e um de excesso de água na matriz do solo ( $h_1$ ) (Feddes *et al.*, 1978; Figura 2.3). O valor de  $h$  abaixo do qual ocorre redução da absorção radicular depende do fluxo, com a redução a suceder mais cedo para valores mais elevados de  $T_{max}$ , como apresentado por Denmead e Shaw (1962).

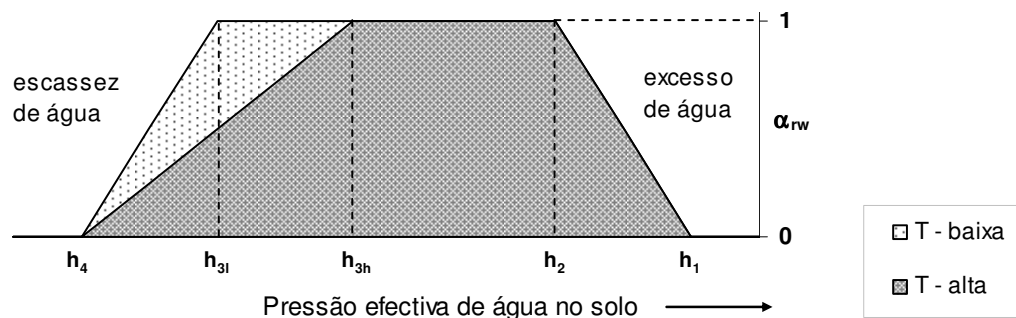


Figura 2.3 – Resposta da absorção radicular ao stress hídrico do solo,  $\alpha_{rw}$ , em função da pressão efectiva de água no solo,  $h$ , e da transpiração potencial  $T_p$  (Feddes *et al.*, 1978).

Na Figura 2.4 apresenta-se a função geralmente considerada para a resposta da absorção radicular ao aumento da salinidade do solo, expressa pela condutividade eléctrica do extracto saturado do solo ( $EC_{ext}$ ), podendo-se encontrar por exemplo em Homae *et al.* (2002) um método alternativo de considerar o efeito da salinidade do solo na extracção radicular.

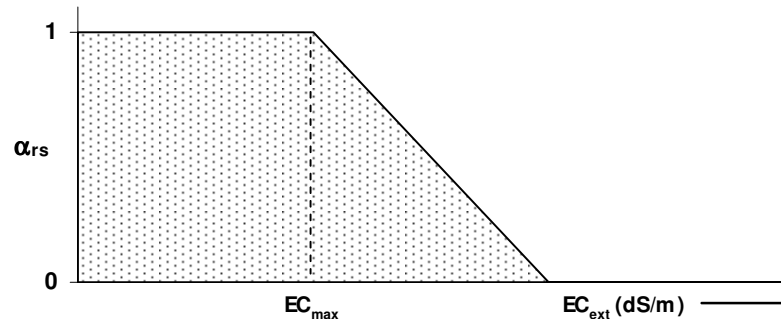


Figura 2.4 – Resposta de absorção radicular ao stress osmótico do solo como função da condutividade eléctrica do extracto saturado do solo (Mass e Hoffman, 1977).

Quando o solo é regado com soluções nutritivas (fertilregas) ou água de rega de má qualidade, podem-se acumular solutos na interface solo-raiz, criando uma alteração significativa do potencial osmótico. Nestes casos, baixos potenciais hídricos podem ser observados pelas plantas mesmo com uma pressão efectiva de água no solo elevada (potencial mátrico, medido por ex. com tensiómetros).

## 2.1.2 Fluxos na planta

### 2.1.2.1. Fluxo xilémico

Em termos de percurso, o xilema é o percurso mais importante no transporte de água nas plantas e constitui, pelo menos em árvores, mais de 99.5% do percurso total (Tromp *et al.*, 2005). A água no xilema está sob tracção o que a torna fisicamente instável. Como consequência, em situações de stress hídrico ou de transpiração elevada, os gases dissolvidos na seiva podem formar bolhas de ar e quebrar as colunas de água, processo designado por cavitação. Estas bolhas de ar ficam geralmente bloqueadas nas placas perfuradas existentes nos topos das células de xilema e ocorre o bloqueio do vaso, evitando a propagação do embolismo, originando contudo uma redução da condutividade hidráulica do sistema vascular. O conhecimento actual sobre este processo aponta para uma dinâmica entre a formação de embolismos no sistema vascular e a sua reparação ao longo do dia e que a libertação de água do xilema pela cavitação poderá servir para estabilizar o balanço hídrico da folha pelo desligamento temporário entre o fornecimento e a procura (Meinzer *et al.*, 2001). Classicamente considera-se que este processo apenas pode ser revertido durante a noite ou quando o estado hídrico do solo e da atmosfera o permitam, considerando-se ser necessário o

aumento do potencial hídrico do xilema para poder ocorrer a redissolução dos gases e restituir a continuidade da coluna de água (Tromp *et al.*, 2005).

Para explicar o fluxo de água na planta, para além da pressão radicular, que apenas tem lugar em situações muito pontuais de baixa ou nula transpiração, a teoria mais aceite e solidamente fundamentada é da tensão-coesão, proposta por Dixon. Esta teoria considera a transpiração como o motor da ascensão da seiva bruta na planta. Durante o dia, devido à transpiração, cria-se um défice de água nas células do mesófilo (potencial de pressão), que devido às forças de adesão-coesão das moléculas de água, é transmitido aos vasos condutores, o que faz baixar o potencial hídrico, criando-se assim a força motriz para o fluxo de água na planta. Na maioria das condições, o gradiente resulta principalmente da componente hidrostática, atendendo a que variações no tempo e no espaço do potencial osmótico e mátrico não têm relevância no transporte de água no sistema vascular das plantas e o potencial gravitacional é de apenas 0.01 MPa m<sup>-1</sup> (fluxos verticais).

O fluxo xilémico (raiz-copado) é traduzido pela Eq. [2.7], resultante da aplicação da Eq. [2.2] a este percurso.

$$Q_x = - \frac{\Psi_{xc} - \Psi_{xr}}{R_x} \quad [2.7]$$

onde,

$Q_x$  fluxo de seiva (L<sup>3</sup> T<sup>-1</sup>, m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>);

$\Psi_{xr}$  e  $\Psi_{xc}$  potencial hídrico no xilema da raiz e no copado, respectivamente (M L<sup>-1</sup> T<sup>-2</sup>, Pa);

$R_x$  resistência hidráulica do xilema no percurso raiz-copado (L<sup>-4</sup> T<sup>-1</sup> M, s m<sup>-3</sup> Pa).

### 2.1.2.2. Translocação no floema

Em complemento ao xilema, as plantas vasculares dispõem do floema que é um tecido que tem como principal função a translocação da seiva elaborada (solução aquosa de substâncias orgânicas), produzida pelos tecidos com capacidade fotossintética ou resultante da mobilização de reservas, até aos órgãos consumidores (todos os tecidos vivos da planta, em especial os tecidos em crescimento e de reserva). O fluxo no floema, ao contrário do xilema, ocorre em todos os sentidos. A força motriz para o fluxo, segundo a teoria de Münch de fluxo em massa, actualmente aceite, é a existência de um gradiente de concentração de sacarose entre os órgãos produtores e os órgãos consumidores ou de armazenamento (Taiz e Zeiger, 1998). A fortalecer esta teoria, que ainda carece de alguma corroboração, Köckenberger *et al.* (1997) realizaram estudos de ressonância magnética em *Ricinus communis* L., tendo obtido resultados que comprovam a existência de circulação interna entre o floema e o xilema, mesmo na ausência de transpiração. Apesar de nesse estudo se tratar de uma planta jovem de pequenas dimensões e na qual a fonte de energia ainda provinha das reservas da semente, é de salientar que do fluxo total observado no xilema, cerca de

45% correspondeu a recirculação interna entre o floema e o xilema. Este aspecto, a verificar-se em plantas adultas, ainda que em muito menor escala, poderá originar alguns problemas nos métodos térmicos usados na medição do fluxo de seiva.

### 2.1.2.3. Capacitância hídrica dos tecidos

Associado ao fluxo e à variação de potencial hídrico na planta (diária e sazonal) ocorre uma variação do teor de água e volume dos tecidos da planta – capacitância hídrica. É definida como a variação do teor de água em função da variação do potencial hídrico dos tecidos, traduzida pela Eq. [2.8]. Este aspecto é de extrema importância para o funcionamento hídrico das plantas, em especial em situações de carência hídrica. O fluxo de água dos locais de armazenamento para o sistema vascular, para fazer face à transpiração, origina uma aparente flutuação na condutância hidráulica do percurso solo-folha (Andrade *et al.*, 1998). Verifica-se em muitas situações uma redução da captação de CO<sub>2</sub> durante a tarde em resultado da redução da condutância estomática associada à redução do potencial hídrico após a depleção da água armazenada (Meinzer *et al.*, 2003), acrescida da redução do potencial hídrico do solo na proximidade das raízes. A contribuição desta capacitância para as perdas verificadas diariamente por transpiração depende do tamanho da planta (volume dos órgãos), da resistência imposta ao fluxo dos locais de armazenamento para o sistema vascular (Lhomme *et al.*, 2001) e da amplitude de variação do potencial hídrico vascular, como descrito pela Eq. [2.8].

$$Q_{sto} = \frac{\Psi_x - \Psi_{sto}}{R_{sto}} \quad [2.8]$$

onde,

$Q_{sto}$  fluxo entre os tecidos de armazenamento e o xilema ( $L^3 T^{-1}$ ,  $m^3 s^{-1}$ );

$\Psi_x$  e  $\Psi_{sto}$  potencial hídrico no xilema e nos locais de armazenamento, respectivamente ( $M L^{-1} T^{-2}$ , Pa);

$R_{sto}$  resistência hidráulica da ligação xilema-órgão de armazenamento ( $L^{-4} T^{-1} M$ ,  $s m^{-3} Pa$ ).

A capacitância não é constante pelo que é comum considerar curvas que relacionam o potencial hídrico com o armazenamento hídrico dos tecidos (Zweifel e Häsler, 2001). No entanto, em muitos estudos considera-se que a capacitância hídrica dos tecidos é constante e definida pela razão entre a variação do armazenamento hídrico dos tecidos e a correspondente variação do potencial hídrico (Phillips *et al.*, 2003), conforme apresentado na Eq. [2.9].

$$C_{sto} = \frac{\Delta W_{sto}}{\Delta \Psi_{sto}} \quad [2.9]$$

onde,

$C_{sto}$  capacitância hídrica dos tecidos de armazenamento ( $M^{-1} L^4 T^2$ ,  $m^3 Pa$ );

$\Delta W_{sto}$  variação do armazenamento hídrico dos tecidos ( $L^3$ ,  $m^3$ )

$\Delta\Psi_{sto}$  variação do potencial hídrico nos locais de armazenamento ( $M L^{-1} T^{-2}$ , Pa).

A relação entre a mobilização de reservas hídricas e a transpiração diária varia sendo maior em dias de maior transpiração, podendo atingir metade do fluxo total diário conforme reportado por Verbeeck *et al.*, (2007), Loustau *et al.* (1996), Tyree e Yang (1990) e Meinzer *et al.* (2001). A água armazenada internamente nos tecidos contribui para a transpiração diária mesmo em plantas em conforto hídrico, indicando que esta reserva desempenha um papel importante não apenas durante períodos de stress hídrico, mas sempre que ocorre fluxo na planta (Zweifel *et al.*, 2001). Em termos ecológicos, a água armazenada é importante por permitir atenuar a taxa de absorção radicular em relação à de transpiração e porque é acessível apenas à planta, ao contrário da água do solo (Zweifel *et al.*, 2001). A água cedida do armazenamento hídrico dos tecidos funciona como um *buffer* da transpiração que permite suavizar os valores mais baixos de potencial hídrico no sistema vascular, reduzir a possibilidade de cavitação, manter a abertura estomática em curtos períodos de elevada transpiração e manter a taxa de fotossíntese acima do que seria possível apenas pela extracção radicular (Waring e Running, 1978; Van Leperen e Madery, 1994; Stratton *et al.* 2000).

### **2.1.3 Planta – atmosfera: transpiração**

De toda a água absorvida pelo sistema radicular apenas uma pequena fracção fica retida na planta sendo a maior parte evaporada pela parte aérea para o ar circundante através da transpiração. A transpiração nas plantas pode ser cuticular, lenticular e estomática. No entanto, ocorre principalmente através dos estomas que são orifícios de abertura variável e, como tal, a resistência à passagem de vapor de água, do interior da folha para a camada limite, apresenta uma resistência variável em função da abertura dos estomas. Quando os estomas estão abertos, a resistência cuticular é muito superior à resistência estomática, podendo aquele percurso alternativo ser desprezado (Monteith e Unsworth, 1990). Os estomas funcionam como reguladores da pressão (tensão) da planta: o encerramento progressivo dos estomas à medida que o potencial baixa previne a ocorrência de valores críticos que danificariam o sistema vascular e os tecidos (pela desidratação e falta de regulação térmica). Contudo, o encerramento não é total podendo-se atingir pela persistência de condições de seca extrema, valores baixos de potencial hídrico na planta.

A perda de água pela planta é função da condutância estomática e da procura atmosférica, mas, para evitar a dissecação da planta, não pode exceder a capacidade máxima de fornecimento pelo sistema radicular (Jackson *et al.*, 2000), ainda que suplantada em curto momentos pela contribuição da capacitância hídrica dos tecidos.

De acordo com o conhecimento actual este é o segmento do percurso SPAC onde a planta exerce maior controlo sobre o fluxo de água. Contudo, ao limitar as perdas de água através da

redução da abertura estomática as plantas estão também a limitar a aquisição de CO<sub>2</sub>, substrato da fotossíntese, havendo redução da produtividade potencial das plantas.

A passagem da água do xilema para os espaços intercelulares do mesófilo e em especial para as câmaras estomáticas é acompanhada da passagem do estado líquido a vapor. Nesta interface desenvolve-se a força motriz para o fluxo de água na planta em condições de absorção passiva (processo dominante). A concentração de vapor dentro da folha junto às células do mesófilo está em equilíbrio com o potencial hídrico dessa superfície. Isto significa que para valores normais de potencial (0 - 1.2 MPa) o ar junto às células da cavidade estomática deverá estar praticamente saturado apresentando uma humidade relativa (RH) entre 100 e 99%, pelo que se verifica que o potencial hídrico da folha por si, tem pouco impacto directo no controle da transpiração (Tromp *et al.*, 2005).

A regulação estomática é um processo bastante complexo e ainda objecto de muita controvérsia. Existe contudo consenso em que a actividade estomática depende de factores ambientais (densidade de fluxo de radiação, concentração de CO<sub>2</sub>, humidade atmosférica, temperatura do ar), concentração interna de CO<sub>2</sub>, sinais químicos da planta (hormonas), temperatura da folha, potencial hídrico da folha e do solo (Tardieu e Davies, 1993; Whitehead, 1998; Dewar, 2002; Tuzet *et al.*, 2003). A velocidade do vento, pelo efeito que tem na regulação térmica dos tecidos, afecta indirectamente a temperatura da folha. No entanto, a percepção de que a regulação estomática em condições de carência hídrica é controlada pela dinâmica dos aspectos físicos do sistema hidráulico das plantas tem ganho sustentação (Früh e Kurth, 1999; Yao *et al.*, 2001). O fecho dos estomas constitui uma resposta defensiva das plantas a situações de carência hídrica no solo ou a situações agressivas da atmosfera às quais o sistema vascular da planta não conseguiria corresponder se não houvesse fecho estomático, já que haveria desidratação dos tecidos da planta e consequente deterioração. A condutância máxima, em condições de ausência de stress hídrico, é geralmente atingida antes do meio-dia solar, a que sucede uma redução gradual, verificando-se em algumas espécies um segundo máximo no final do dia. A condutância é influenciada pelo VPD, dado que se demonstra que a exposição das folhas a uma atmosfera seca induz o fecho estomático, mesmo em folhas relativamente hidratadas (Ferreira e Katerji, 1992). A resposta dos estomas ao défice hídrico é modificada pelas experiências anteriores: os estomas de plantas previamente sujeitas a stress hídrico fecham geralmente a níveis inferiores de potencial hídrico do que plantas não sujeitas a stress anterior (Tromp *et al.*, 2005). Um outro factor para o fecho estomático é o aumento da concentração de ABA (ácido abscísico) em tecidos sujeitos a stress hídrico, que pode actuar em adição ao efeito hidráulico do decréscimo do teor de água e de turgescência dos tecidos (Davies *et al.*, 1994).

A última barreira aos fluxos gasosos da planta é interposta pela camada limite da folha a que acresce a restante resistência aerodinâmica do copado. A camada limite da folha é formada por uma camada de ar quase estacionária existente sobre a superfície das plantas, cuja espessura depende de características morfológicas da superfície vegetal e da circulação do ar sobre a superfície (velocidade do vento). Em situações de pouca agitação da atmosfera esta camada é espessa e interpõe uma grande resistência à difusão de gases podendo ser da mesma ordem de grandeza que a resistência estomática (Ferreira, 1996). Em contraste, em situações de forte agitação da atmosfera apresenta uma espessura reduzida, sendo a transpiração principalmente controlada pela resistência estomática. Este aspecto está relacionado com o factor de acoplamento enunciado por Jarvis (1985) e descrito p. ex. em Ferreira (1996). Em cobertos rugosos, o controlo estomático desempenha um papel muito importante no funcionamento hídrico das plantas ao permitir a variação do grau de acoplamento do coberto às condições atmosféricas através do aumento da resistência ao fluxo. O controlo estomático funciona como um mecanismo de protecção do sistema vascular da planta mantendo o potencial hídrico acima de determinados valores, dependendo da espécie, de forma a reduzir os efeitos negativos da cavitação do sistema vascular, contrabalançando o fornecimento de água com a procura evaporativa (Buckley, 2005).

As plantas apresentam diferentes capacidades de regulação do estado hídrico interno, relativamente ao estado hídrico do solo e à procura evaporativa da atmosfera: as plantas com um bom controlo estomático são designadas de isohídricas por oposição às anisohídricas. Em termos práticos esta divisão circumspecta não existe, havendo plantas com comportamento intermédio e por exemplo Schultz (2003) num estudo em videiras com duas cultivares da casta Syrah, observou comportamentos apostos, relacionando as diferenças com a condutância hidráulica do sistema vascular.

#### **2.1.3.1. Modelação do controlo estomático**

Conclui-se que os estomas respondem a estímulos ambientais de uma forma complexa e os mecanismos fisiológicos do comportamento estomático ainda não são totalmente conhecidos (Leuning, 1995; Tuzet *et al.*, 2003; Meinzer *et al.*, 2001). A condutância estomática a cada momento é resultado de interacções complexas e não lineares entre diversos factores tais como a intensidade de radiação, temperatura da folha, VPD, concentração de CO<sub>2</sub> e estado hídrico do solo e da folha (Leuning *et al.*, 2003; Lankreijer, 1998) e eventualmente sinais químicos (Davies *et al.*, 1994). Contudo, é relativamente consensual que o funcionamento dos estomas depende da diferença de pressão de turgescência entre as células guarda e as células da epiderme (Franks *et al.*, 2001). O grande número de variáveis que determinam o funcionamento estomático, o conhecimento

incompleto sobre este processo e a consideração deste processo como o processo chave do funcionamento hídrico da planta, levaram ao surgimento de um grande número de modelos empíricos para este processo. Estes modelos podem ser agrupados em dois grupos:

- Modelos de regressão (estatísticos), que descrevem o funcionamento estomático por ajustamento de funções entre valores observados de condutância estomática e as variáveis consideradas descritoras, nomeadamente as variáveis ambientais;
- Modelos fisiológicos, que descrevem o funcionamento estomático em relação ao processo de assimilação de CO<sub>2</sub> (fotossíntese).

Dos modelos estatísticos existentes, o mais usado como base para novas aproximações é o de Jarvis (1976). Este modelo empírico, de regressão, considera um valor máximo de condutância estomática ( $g_s$ ) e um conjunto de funções independentes normalizadas, com a formulação apresentada na Eq. [2.10] (Jarvis, 1976).

$$g_s = g_{s,max} \cdot f(Qp) \cdot f(T_l) \cdot f(VPD) \cdot f(\Psi_l) \cdot f(Ca) \quad [2.10]$$

onde,

- $g_s$  condutância estomática;
- $g_{s,max}$  condutância estomática máxima;
- $Qp$  radiação solar global;
- $T_l$  temperatura da folha;
- $VPD$  défice de pressão de vapor do ar;
- $\Psi_l$  potencial hídrico da folha;
- $Ca$  concentração atmosférica de CO<sub>2</sub>.

O desenvolvimento das equações parciais pode ser encontrado em Jarvis (1976) ou p. ex. em Lankreijer (1998), com a terminologia actualizada. Das variantes introduzidas neste modelo, a de Stewart (1988), designada por Jarvis-Stewart, é também bastante utilizada, quer para a modelação do processo, quer como base para novas abordagens (Whitley *et al.*, 2008). Neste último modelo, a condutância estomática foi substituída pela condutância da superfície; o modelo considera o efeito da concentração de CO<sub>2</sub> e a função do potencial hídrico foliar foi substituída por uma função da depleção da água do solo. Estas formulações (Jarvis e Jarvis-Stewart) pressupõem que as variáveis que determinam a condutância estomática são independentes o que dificilmente se verifica na natureza (Friend, 1995). Um aspecto que, nem estes modelos, nem a maioria dos existentes consideram, é a condutância estomática nocturna e a concomitante transpiração que ocorre sempre que as condições do meio o propiciem (Daley e Phillips, 2006).

Um aspecto que limita a percepção sobre o funcionamento estomático é a interdependência deste processo com a fotossíntese/respiração (assimilação) e fluxo de água desde o solo, através da planta, para a atmosfera (Tuzet *et al.*, 2003). O fornecimento e procura de CO<sub>2</sub> pela fotossíntese e respiração afectam a condutância através da variação da concentração intercelular de CO<sub>2</sub>

(Assmann, 1999). Em consequência, os estudos mais recentes têm utilizado uma abordagem de cariz mais fisiológica. Os primeiros modelos deste tipo foram os modelos de Ball-Berry-Leuning (Ball *et al.*, 1987; Leuning, 1995), de Tardieu-Davies (Tardieu e Davies, 1993) e de Dewar (Dewar, 2002). O modelo de Ball-Berry-Leuning apresenta a limitação de não descrever o fecho estomático quando há restrições hídricas do solo (Dewar, 2002). Os modelos baseados apenas nos processos da folha descrevem convenientemente o controlo estomático quando o teor de água no solo é adequado, mas falham geralmente na simulação da condutância e transpiração quando o potencial hídrico do solo é baixo ou quando varia significativamente (Dewar, 2002; Leuning, 1995). O modelo de Tardieu-Davies colmata esta lacuna com a utilização do efeito combinado do potencial hídrico da folha e de sinais químicos (ABA) (Tardieu e Davies, 1993). Os modelos de Tardieu-Davies e posteriores, de Dewar e o proposto por Tuzet *et al.* (2003), bem como o recentemente apresentado por Zweifel *et al.* (2007), consideram o fornecimento de água às folhas (estado hídrico do solo, absorção e fluxo na planta) necessário para manter a turgescência das células de guarda e da epiderme.

Apesar do progressivo avanço sobre o conhecimento do controlo estomático, ainda subsistem dúvidas sobre o papel das mensagens químicas (como o ácido abscísico) transmitidas da raiz para as folhas, no controlo deste processo (Tardieu e Davies, 1993; Dewar, 2002; Comstock, 2002). No entanto, os modelos dinâmicos (Tuzet *et al.*, 2003; Zweifel *et al.*, 2007) conseguem dar resposta a muitas das objecções existentes ao controlo exclusivamente físico do processo, tal como anteriormente sustentado por Yao *et al.* (2001), Früh e Kurth (1999).

### 2.1.3.2. Modelação da transpiração

Para a modelação da transpiração é geralmente utilizada a equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965), Eq. [2.11], que descreve o processo de evaporação verificado em cobertos vegetais, podendo-se encontrar em Allen *et al.* (1998) e Jones (1992) a sua formulação completa.

$$\lambda E = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a c_p g_a (VPD)}{\Delta + \gamma(1 + g_a / g_c)} \quad [2.11]$$

onde,

$E$  taxa de evaporação/transpiração ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ );

$\lambda$  calor latente de vaporização ( $\text{J kg}^{-1}$ );

$Rn$  radiação líquida do coberto ou balanço de radiação ao nível da superfície ( $\text{W m}^{-2}$ );

$G_{sfc}$  fluxo de calor sensível para o solo; ( $\text{W m}^{-2}$ );

$VPD$  défice de pressão de vapor do ar (Pa);

$\rho_a$  densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$c_p$  capacidade térmica mássica do ar seco ( $\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ );

$\Delta$  declive da curva da pressão de vapor de saturação ( $\text{Pa °C}^{-1}$ );

$\gamma$  constante psicrométrica (Pa C<sup>-1</sup>);

$g_a$  condutância aerodinâmica para o vapor de água (m s<sup>-1</sup>);

$g_c$  condutância da superfície do coberto para o vapor de água (m s<sup>-1</sup>).

Esta equação combina o balanço de energia do coberto vegetal com princípios aerodinâmicos da superfície acima e fisiológicos da cultura (abertura estomática). A equação integra duas condutâncias em série, uma condutância de superfície correspondente à agregação das condutâncias intrínsecas ao copado e uma condutância aerodinâmica. Para superfícies vegetadas a condutância de superfície é equivalente à condutância do copado, correspondente à integração da condutância estomática para o nível do copado (Ronda *et al.*, 2001). A condutância aerodinâmica corresponde ao percurso de passagem do vapor de água evaporado das superfícies para o nível de referência da atmosfera acima do copado, calculada em função da velocidade horizontal do vento e da rugosidade da superfície (Jones, 1992, Allen *et al.*, 1998). Na situação da evaporação de um coberto molhado (precipitação, rega, deposição de orvalho) o termo  $g_a/g_c$  é praticamente nulo, pelo que a evaporação passa a depender exclusivamente de  $g_a$ . No entanto, em condições normais nos cobertos rugosos (tipo de cobertos em estudo) a transpiração depende fortemente de  $g_c$ , pelo que a modelação/simulação da transpiração destes cobertos depende bastante da qualidade da estimativa da condutância do copado. Os estomas nestes cobertos permitem, especialmente em situações de carência hídrica, aumentar a resistência ao fluxo de vapor de água da folha para o exterior (Meinzer *et al.*, 1997).

A determinação do valor de  $g_c$  (copado) é bastante complexa e envolve a medição da condutância estomática ( $g_s$ ) em folhas de diferentes camadas do copado, aplicação de uma média ponderada com base na área foliar de cada camada. Outra via é medir a transpiração e inverter a equação de Penman-Monteith para obter  $g_c$ , uma vez conhecido  $g_a$  (Ferreira, 1996). No entanto, em qualquer dos casos a determinação de  $g_c$  é bastante onerosa, pelo que raramente se procede à aplicação da Eq. [2.11] para o cálculo directo da transpiração de um coberto específico, recorrendo-se normalmente à abordagem apresentada em 3.1.

## 2.2 Cobertos lenhosos anisotrópicos regados

Pretende-se que o sistema em desenvolvimento tenha aplicabilidade em pomares, vinhas, olivais e outras culturas com características similares. Estas culturas são usualmente instaladas em linhas com compassos regulares, com espaçamento na entrelinha geralmente compreendido entre 1.5 m e 12 m e com distância entre plantas na linha geralmente inferior à distância na entrelinha. Esta configuração origina na maioria das situações cobertos contínuos ao longo das linhas com o copado de plantas contíguas a sobreporem-se. Na entrelinha, pela necessidade de garantir uma boa penetração da radiação, um bom arejamento e a circulação das máquinas agrícolas, existe um

“corredor” livre. Esta tipologia de cobertos insere-se na tipologia dos cobertos lenhosos anisotrópicos, apesar de apresentarem um compasso regular de plantação.

Na designação deste estudo não se identifica a propriedade à qual se aplica o termo, anisotrópico, pelo facto de nos cobertos lenhosos abrangidos, haver anisotropia de diversas propriedades em resultado da distribuição das plantas no terreno: anisotropia na distribuição das raízes no solo, na inserção do copado na atmosfera e na aplicação de água através da rega; propriedades estas que originam anisotropia no balanço hídrico e energético à superfície do solo. No entanto, estes cobertos apresentam alguma regularidade por estarem instalados de acordo com um compasso de plantação regular podendo-se definir uma malha com uma quadrícula de base. Desta forma, a anisotropia verificada apresenta dois eixos de variação: o de menor variação, segundo a direcção das linhas e o de maior variação, ortogonal à direcção das linhas.

A maioria das metodologias para o estudo das relações hídricas em cobertos vegetais foi desenvolvida considerando uma superfície em que se considera um perfil vertical de distribuição do sistema radicular em função apenas da profundidade e um coberto uniforme com uma altura de referência à qual a circulação da atmosfera deixa se ser influenciada pela cultura.

A importância atribuída à resistência estomática, no caso de cobertos rugosos, é precisamente consequência da reduzida resistência aerodinâmica ( $r_a$ ); do valor de  $r_a$  depende o grau de ligação ou, pelo contrário, de desacoplamento entre o défice de saturação ao nível da folha e as condições atmosféricas (Ferreira, 1996). Este grau de desacoplamento foi quantificado por Jarvis (1985) através do coeficiente  $\Omega$  ( $0 < \Omega < 1$ ). Em cobertos de elevada rugosidade aerodinâmica da copa (montados, pomares, culturas esparsas ou em linhas afastadas), devido ao forte acoplamento da vegetação à atmosfera ( $\Omega \rightarrow 0$ ) a transpiração é fundamentalmente “imposta” (Jarvis e McNaughton, 1986; Martin, 1989). Isto significa que, nestes casos, a transpiração é fortemente condicionada pelo défice de saturação do ar acima do coberto, assumindo particular importância o controle estomático nas perdas de água, como referido em 2.1.3.

Nestes cobertos, esparsos e com sistema de rega localizada, para uma correcta estimativa do uso de água pelas culturas deve ser considerada a distribuição não uniforme de água e energia à superfície (Annandale *et al.*, 2003). A energia é repartida à superfície dependendo da orientação solar, da direcção das linhas da cultura, das dimensões do copado e da forma e densidade foliar (Annandale *et al.*, 2003). A água apresenta dois padrões de distribuição distintos: um originado pela precipitação em que a distribuição à superfície é afectada pela interceptação pelo copado (depende da geometria do copado, intensidade e duração da precipitação e da velocidade e direcção vento) e um padrão originado pela aplicação de rega à cultura (geralmente localizada e sob o copado). Esta anisotropia na distribuição de água e energia origina diferentes padrões de partição e consequente

utilização de água nos cobertos. A rega localizada (gota-a-gota ou microaspersão) humedece apenas uma pequena área à superfície sob o copado das plantas, pelo que a evaporação à superfície do solo é determinada pela disponibilidade energética e pelo humedecimento do solo em cada ponto da superfície. Dados estes condicionalismos é expectável que a densidade de raízes varie com a profundidade e também com a distância à linha, pelo que, a absorção de água pela cultura varia também nas duas dimensões (Annandale *et al.*, 2003).

## 2.3 Balanço hídrico e energético dos cobertos

### ▪ Balanço energético

O balanço de energia dos cobertos é usado como base para a resolução de problemas em diversas áreas ambientais e agrícolas tais como a estimativa da evapotranspiração dos cobertos vegetais, estimativa da evaporação do solo nu, regime térmico do solo, taxa de decomposição de resíduos orgânicos, entre outros (Evelt, 1999). O balanço hídrico está dependente do balanço de energia das superfícies porque a evaporação de água requer grandes quantidades de energia.

No cômputo dos fluxos de energia em cobertos vegetais é usual considerar a equação de balanço numa superfície, a interface vegetação-atmosfera, o que permite igualar a equação de balanço a zero. A equação simplificada do balanço de energia é dada pela Eq. [2.12].

$$Rn + G_{sfc} + LE + H = 0 \quad [2.12]$$

onde,

$Rn$  radiação solar líquida à superfície ( $W m^{-2}$ );

$G_{sfc}$  fluxo de calor para o solo ( $W m^{-2}$ );

$LE$  fluxo de calor latente ( $W m^{-2}$ ), resultado do produto do fluxo evaporativo verificado à superfície ( $E$ ) pelo calor latente de vaporização ( $\lambda$ ,  $2.44 \times 10^6 J kg^{-1}$  a  $25^\circ C$ );

$H$  fluxo de calor sensível ( $W m^{-2}$ ).

Nesta equação, apenas são considerados os fluxos verticais e o fluxo horizontal por advecção é ignorado. Desta forma, esta equação apenas pode ser aplicada a superfícies extensas e homogêneas. Alguns termos do balanço, como a variação da energia armazenada na vegetação e a energia utilizada no metabolismo das plantas são desprezados por representarem uma pequena fracção da radiação líquida diária e são considerados desprezáveis quando comparados com os componentes considerados (Allen *et al.*, 1998). A quantidade e a variação sazonal da radiação líquida sobre as superfícies determinam em grande medida a quantidade de água utilizada pelas culturas e evaporada directamente do solo, a taxa de evapotranspiração (ET). No caso de cobertos regados e quando ocorram fortes chuvadas é conveniente considerar também o fluxo convectivo à superfície do solo, associado ao fluxo de água a uma temperatura diferente do solo.

### ▪ **Balço hídrico**

O balanço hídrico dos cobertos vegetais é geralmente associado ao balanço hídrico do volume de solo explorado pelo sistema radicular das plantas do coberto. Desta forma, considera-se a capacitância hídrica do solo, que é pertinente para descrever o regime hídrico dos cobertos procura evaporativa praticamente constante e fornecimento esporádico de água ao solo. Considera-se o volume de solo com área unitária à superfície e dimensão vertical (altura) desde a superfície do solo até uma profundidade que engloba a totalidade da zona de enraizamento das plantas. Os fluxos podem ser traduzidos na altura equivalente. Conforme os critérios usados na identificação dos fluxos hídricos do sistema, existem diferentes equações para traduzir este balanço hídrico, correspondente à variação de armazenamento ( $\Delta S$ ), utilizando-se neste estudo a Eq. [2.13].

$$\Delta S = P + RO + I + DP + ET \quad [2.13]$$

onde,

$\Delta S$  variação no armazenamento hídrico no intervalo de tempo considerado (mm);

$P$  precipitação (mm);

$RO$  entrada (+) ou saída (-) de água devido ao escoamento superficial (mm);

$DP$  percolação ou drenagem profunda (-) e ascensão capilar (+) através do limite inferior do sistema (mm);

$ET$  perda de água para a atmosfera pelo solo ou plantas na forma de vapor (-) ou ganho através da formação de orvalho (+), (mm);

$I$  rega (mm).

## CAPÍTULO 3

### NOVO PARADIGMA PARA A DETERMINAÇÃO DAS NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS



#### SUMÁRIO

Começam-se por definir as necessidades hídricas das culturas e o método de estimativa mais difundido. No segundo ponto, faz-se uma revisão de dois domínios científicos de suporte que se consideram ser importantes na proposta de solução apresentada e que não foram abordados na revisão bibliográfica apresentada no capítulo anterior: monitorização vegetal e previsão numérica do tempo. No terceiro ponto, é feita uma revisão das exigências colocadas actualmente à gestão da rega, com particular enfoque nas culturas lenhosas, nas quais é frequente a prática de rega deficitária. Atendo a estas exigências e ao objectivo concreto deste trabalho, no quarto ponto são definidos os pré-requisitos que o sistema em desenvolvimento deverá considerar. Seguidamente é definido o arquétipo inicial do sistema e apresentada a abordagem considerada.

#### 3.1 NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS

#### 3.2 ÁREAS CIENTÍFICAS DE SUPORTE

##### 3.2.1 Monitorização vegetal

##### 3.2.2 Previsão numérica do tempo

#### 3.3 IMPERATIVOS ACTUAIS DA GESTÃO DA REGA

#### 3.4 ISIS – INTEGRATED SYSTEM FOR IRRIGATION SCHEDULING

##### 3.4.1 Pré-requisitos do sistema

##### 3.4.2 Modelo do processo

##### 3.4.3 Formulação do sistema ISIS

### **3 NOVO PARADIGMA PARA A DETERMINAÇÃO DAS NECESSIDADES HÍDRICAS DAS CULTURAS**

#### **3.1 Necessidades hídricas das culturas**

Num coberto vegetal, mais de 95% (normalmente cerca de 99%) da água absorvida pelas plantas<sup>4</sup> é perdida para a atmosfera através da transpiração. Desta forma, em termos práticos da gestão da rega, considera-se que as necessidades hídricas de uma cultura correspondem aproximadamente à quantidade de água perdida pelas plantas por transpiração acrescidas das perdas por evaporação que inevitavelmente ocorrem à superfície do solo. As necessidades hídricas correspondem assim à soma da transpiração da cultura com interesse económico directo com as perdas que ocorrem no estrato inferior do coberto, nomeadamente evaporação directa do solo e transpiração de eventuais plantas existentes (infestantes ou cultura de revestimento). Este fluxo conjunto é designado por evapotranspiração cultural (ETc), designando-se por vezes as perdas da cultura principal como transpiração e do estrato inferior como evaporação, quer sejam perdas directas à superfície do solo ou água vinculada através das plantas (transpiração). Esta distinção não é muito coerente com os conceitos subjacentes (transpiração e evaporação), pois considera como evaporação um fluxo que foi vinculado através das plantas do estrato inferior. Neste estudo, para uma maior clareza dos conceitos, considera-se que a ETc do coberto corresponde à soma da transpiração da cultura (T) e da evapotranspiração do estrato inferior (ETei). Esta abordagem parece ser mais adequada aos cobertos lenhosos em estudo, à abordagem utilizada para a determinação das necessidades hídricas e aos princípios que determinam actualmente a gestão da rega (vd. 3.3). A ETei pode variar significativamente, dependendo da energia disponível, da disponibilidade de água à superfície do solo e, caso exista cobertura do solo, das características e estado hídrico desse coberto.

A ETei deverá ser encarada como um fluxo na equação do balanço hídrico, que faz diminuir a disponibilidade hídrica do solo para a cultura, do mesmo modo que a percolação profunda (drenagem) e o escoamento superficial o fazem. Esta componente não tem impacto directo na produção das culturas pelo que a importância da sua determinação é bastante menor que o conhecimento da transpiração, sendo em muitos casos seguidas estratégias de rega que visam minimizar esta componente do balanço hídrico, em especial em zonas com escassez de água.

---

<sup>4</sup> Este estudo incide sobre cobertos vegetais de espécies com uma parte lenhosa perene. Para simplicidade de escrita, utiliza-se o termo “planta” em sentido lato para designar as espécies vegetais abrangidas por este estudo.

Como a redução desta componente tem associada a redução da humidade do solo à superfície, este objectivo permite simultaneamente exercer algum controlo sobre as infestantes. Contudo, a ETei tem algum impacto no regime térmico da superfície, no albedo da superfície, na energia disponível para a evaporação ao nível do copado da cultura principal (radiação reflectida e fluxo de calor sensível) e VPD do ar, pelo que o possível controlo desta componente tem implicações indirectas na transpiração da cultura, o que também sucede com a maioria das restantes práticas culturais. A rega influencia a ETei através da fracção de solo humedecida à superfície, no volume de solo explorado pelas infestantes ou cultura de revestimento e pela frequência de humedecimento. Apesar das recomendações para a conservação da água do solo, há situações em que é conveniente promover o aumento de ETei para reduzir o estado hídrico do solo e aumentar o período de sação – aspecto particularmente importante em vinhas em determinadas regiões do nosso país para induzir um défice hídrico mais precoce.

Outra componente incluída na ETc é a interceptação do copado que corresponde à quantidade de precipitação ou rega que fica retida no copado ou ao orvalho formado. Parte desta água pode drenar para o solo e ficar aí disponível, mas parte perde-se directamente para a atmosfera. No caso dos cobertos rugosos, atendendo à elevada condutância aerodinâmica dos cobertos (vd. 2.1.3.2 e 2.2), nesta situação a evaporação é limitada quase exclusivamente pela energia disponível.

A maioria dos métodos de quantificação de ET está mais adequada para uso corrente em cobertos baixos e uniformes, apresentando bastantes restrições quando se pretende aplicá-los a cobertos rugosos (Ferreira, 1996). Tradicionalmente a evapotranspiração de um coberto é obtida pela aplicação de métodos hidrológicos ou dos métodos micrometeorológicos, sendo também actualmente comum utilizar métodos de medição de fluxo de seiva, para estimativa da transpiração, conjugados com métodos de medição da evaporação do solo ou evapotranspiração do estrato inferior. Nos métodos hidrológicos, baseados na equação do balanço hídrico do solo (Eq. [2.13]), a ETc é obtida pela medição da variação do armazenamento hídrico do solo explorado pela cultura e estimativa ou medição das restantes componentes do balanço (entradas e saídas) à excepção de ET, que é obtida por diferença. Os métodos micrometeorológicos quantificam os fluxos de água para a atmosfera (ET) com recurso a variáveis meteorológicas observadas em um ou dois níveis acima da superfície evaporante utilizando equações que descrevem os fluxos de vapor de água na atmosfera. Estes métodos podem subdividir-se em três tipos: método do balanço energético (razão de Bowen), métodos aerodinâmicos e método das flutuações instantâneas (*eddy covariance*, EC), podendo considerar-se a associação de qualquer dos dois últimos com a equação do balanço energético (Ferreira, 1996).

A aplicação dos métodos hidrológicos ao tipo de cobertos em estudo encontra algumas dificuldades, nomeadamente a caracterização da totalidade do volume de solo explorado pelas raízes mais profundas, a heterogeneidade de distribuição do sistema radicular nesse volume e a baixa resolução associada ao método. Acrescem ainda as dificuldades e incertezas na determinação de alguns termos do balanço hídrico. Relativamente aos métodos micrometeorológicos, apesar de fiáveis, a aplicação é muito condicionada pelas condições exigidas pelos princípios teóricos em que se baseiam: as medições têm de ser realizadas acima da subcamada rugosa, na subcamada inerte (Monteith e Unsworth, 1990), o que exige geralmente a instalação de torres para a realização das medições, parcelas homogêneas, de grandes dimensões e relativamente planas e instrumentos caros para uma aplicação de rotina. O reduzido valor dos gradientes encontrados em cobertos rugosos conduz a uma maior importância relativa dos erros de medição (Monteith e Unsworth, 1990), constituindo uma outra importante limitação dos métodos baseados em relações de fluxo-gradiente (método do balanço energético e métodos aerodinâmicos). O método das flutuações instantâneas constitui por vezes a única possibilidade de determinar os fluxos de massa (vapor de água, dióxido de carbono, etc.), de calor sensível ou quantidade de movimento acima de um coberto vegetal arbóreo-arbustivo, apesar das limitações para a aplicação dos métodos micrometeorológicos em geral (Landsberg *et al.*, 1991). No entanto, devido ao tipo de sensores utilizados e ao elevado custo envolvido tem sido mais frequentemente aplicado em períodos relativamente curtos.

Recentemente, é cada vez mais acessível e frequente, especialmente em cobertos lenhosos, a medição/estimativa da transpiração, com base em métodos de medição do fluxo de seiva e a medição ou estimativa de  $ET_{ei}$  por métodos alternativos como o uso de microlisímetros (p. ex. Paço *et al.*, 2006; Silva, 2002; Silvestre, 2003). Atendendo a que a transpiração é geralmente a componente principal das necessidades hídricas das culturas, os resultados desta abordagem estão bastante dependentes da qualidade da estimativa da transpiração da cultura.

Considerando as dificuldades, limitações e custos da medição de  $ET_c$ , é geralmente utilizado o método de estimativa de  $ET_c$  a partir da estimativa de  $ET$  de uma superfície de referência usando-se para este efeito a equação de Penman-Monteith (Eq. [2.11]) com parâmetros dessa superfície (relva bem regada). Um dos exemplos é a aplicação apresentada no boletim 56 da FAO (Allen *et al.*, 1998), aqui designada como método FAO Penman-Monteith.

A estimativa das necessidades hídricas das culturas pelo método da FAO utiliza o conceito de evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) para quantificar a taxa de evaporação em condições não limitantes da superfície num dado local. Considera-se que a cultura de referência está bem abastecida em água, pelo que os factores do solo não afectam a  $ET_o$ . A superfície de referência

definida no método FAO Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) considera uma cultura hipotética de referência com uma altura de 0.12 m, uma resistência fixa de superfície de 70 s m<sup>-1</sup> e um albedo de 0.23. Estas características correspondem aos valores considerados médios de uma extensa superfície de relva de altura uniforme, em crescimento activo e bem abastecida em água (Allen *et al.*, 1998). A aplicação da equação de Penman-Monteith (Eq. [2.11]), utilizando a parametrização para a superfície hipotética de referência é traduzida na Eq. [3.1], para passos de tempo horários ou inferiores (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta(R_n - G_{sfc}) + \gamma \frac{37}{T_a + 273} u_2 VPD}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad [3.1]$$

onde,

$ET_0$  evapotranspiração de referência (mm h<sup>-1</sup>)

$R_n$  balanço de radiação ao nível da superfície (MJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)

$G_{sfc}$  densidade de fluxo de calor para o solo (MJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)

$T_a$  temperatura média horária, medida a 2 m de altura (°C)

$u_2$  velocidade média horária do vento, medida a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>)

$VPD$  défice de pressão de vapor da atmosfera (kPa)

$\Delta$  – declive da curva de pressão de vapor saturante à temperatura T (kPa °C<sup>-1</sup>)

$\gamma$  – constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>)

Apesar de o método de Penman-Monteith ser considerado o melhor método de cálculo de  $ET_0$ , requer dados meteorológicos que por vezes não estão disponíveis. Desta forma, é possível recorrer a outros métodos para o cálculo de  $ET_0$ , ainda que menos precisos. A fórmula de cálculo da  $ET_0$  proposta por Hargreaves e Samani (1982, 1985), Eq. [3.2], para cálculos diários, para a superfície de referência, apenas requer dados diários de temperatura e de radiação diária no topo da atmosfera ( $R_a$ ) que pode ser determinada matematicamente, como apresentado p. ex. em Allen *et al.* (1998).

$$ET_0 = 0.408 \left[ 0.0023 R_a (T_m + 17.8) \sqrt{T_x - T_n} \right] \quad [3.2]$$

onde,

$T_m$  temperatura média diária do ar (°C);

$T_x$  temperatura máxima diária do ar (°C);

$T_n$  temperatura mínima diária do ar (°C);

$R_a$  radiação solar no topo da atmosfera (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);

0.408 factor de conversão de MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup> para mm d<sup>-1</sup>.

A  $ET_c$  é determinada pela multiplicação de  $ET_0$  por um coeficiente, como apresentado na Eq. [3.3], independentemente do método de cálculo de  $ET_0$ .

$$ET_c = K_c ET_0 \quad [3.3]$$

onde,

$ET_c$  evapotranspiração cultural na ausência de restrições ( $\text{mm d}^{-1}$ );

$K_c$  coeficiente cultural (-);

$ET_o$  evapotranspiração de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ ).

Nesta equação,  $ET_o$  é interpretada como um índice climático da evapotranspiração imposta às culturas pelas condições do meio, representando  $K_c$  a integração das características que diferenciam a cultura em estudo da cultura hipotética de referência (estado hídrico, altura, albedo, resistência do copado, evaporação do solo, etc.) (Allen *et al.*, 1998).

Atendendo às diferenças de rugosidade de superfície das culturas abrangidas por este estudo, em relação à superfície de referência (relvado hipotético), a relação entre  $ET_c$  e  $ET_o$ , para a mesma fase do ciclo, aumenta com a velocidade do vento e com o decréscimo da humidade atmosférica (Allen *et al.*, 1998). Na aproximação com um único coeficiente, o efeito da transpiração e da evaporação do solo é combinado e integra as diferenças verificadas na evaporação do solo e na transpiração da cultura em relação à superfície de referência. Atendendo à grande variabilidade da evaporação do solo em função do padrão de humedecimento através da precipitação ou rega, esta abordagem é mais adequada para passos temporais alargados, superiores ao dia (Allen *et al.*, 1998) e para cobertos homogéneos. As diferenças na evaporação do solo, em relação à superfície de referência podem ser mais convenientemente descritas com o uso dos coeficientes culturais duais (Allen *et al.*, 1998) - Eq. [3.4]. Nesta aproximação, os efeitos da transpiração e da evaporação do solo são separados: o coeficiente cultural basal ( $K_{cb}$ ) adequa a transpiração da cultura e o coeficiente de evaporação ( $K_e$ ) adequa a evaporação do estrato inferior; estabelecendo os dois coeficientes no conjunto ( $K_{cb}+K_e$ ) a relação entre a cultura e a superfície de referência em condições de pleno conforto hídrico da cultura.

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad [3.4]$$

onde,

$K_{cb}$  coeficiente cultural basal;

$K_e$  coeficiente de evaporação do solo.

Em função do desenvolvimento da cultura, a cobertura do solo, a área foliar activa e em alguma medida a altura da cultura variam. Devido a estas alterações o valor dos coeficientes culturais não é estático, definindo-se geralmente uma curva anual que considera as diferentes fases do ciclo cultural (dormência, início da fase vegetativa, fase de estabelecimento do copado, fase média e fase final do ciclo). Em culturas lenhosas perenes, a esta curva anual de crescimento apõe-se uma plurianual relacionada com o desenvolvimento das plantas desde a instalação da cultura no solo, até ao pleno desenvolvimento da cultura, um período de plena produção a que se segue uma fase de senescência do coberto devido a problemas fitossanitários ou excesso de desenvolvimento

vegetativo. A condutância estomática das plantas de folha caduca durante a fase de dormência pode-se considerar nula, pelo que a *ET* do coberto nesta fase corresponde à evaporação do solo.

Neste estudo, *Ke* difere do método da FAO ao integrar a totalidade da evaporação verificada ao nível do estrato inferior - *ET<sub>ei</sub>*.

As necessidades hídricas calculadas por este método devem ser ajustadas para o desenvolvimento real da cultura, densidade de plantação (Allen *et al.*, 1998) e carga de produção (Naor *et al.*, 2001).

## 3.2 Áreas científicas de suporte

### 3.2.1 Monitorização vegetal

As redes de monitorização constituem uma ferramenta que possibilita a obtenção de dados em tempo real sobre diversos aspectos dos processos, relevantes para a tomada de decisão. Em agricultura a sua aplicação é ainda limitada e usada principalmente para caracterizar o estado da atmosfera (meteorologia) e o estado do solo (estado hídrico e regime térmico). A observação das plantas é feita tradicionalmente de forma indirecta através da caracterização do meio envolvente. Contudo, o sistema radicular das plantas perenes é irregular e ocupa geralmente um grande volume de solo não uniformemente, excedendo o volume de solo regado, pelo que a selecção de pontos de medição do estado hídrico do solo é problemática. Acresce ainda que, o teor de água do solo é espacialmente variável sendo necessárias dezenas de medições para o representar convenientemente (Goldhamer e Fereres, 2004; Naor e Cohen, 2003). Acresce ainda o problema de estabelecer a relação entre o estado hídrico do solo e o estado hídrico da planta e a determinação de níveis de referência para a gestão da rega (Naor e Cohen, 2003).

Nas últimas décadas, surgiu um novo de conceito de monitorização aplicado à produção vegetal, recentemente designado por fitomonitorização, que veio mudar o padrão e instituir a planta como elemento central de observação (*plant sensing*). Nesta linha de pensamento tem-se procurado desenvolver sensores para medir algumas variáveis nas plantas relacionadas com o seu funcionamento e produtividade.

A técnica de fitomonitorização foi desenvolvida para a detecção precoce de stresses das culturas, tais como o stress hídrico (Ton, 1997; Gratacos e Gurovich, 2003; Ton *et al.*, 2004). A primeira aplicação desta tecnologia foi na detecção precoce da resposta da planta à disponibilidade de água no solo, com o intuito de definir em tempo real, estratégias de rega para maximizar o crescimento das plantas (Gurovich *et al.*, 2006).

A fitomonitorização é uma combinação de *hardware* (sensores relacionados com a planta, sensores ambientais, sistemas de aquisição de dados e sistemas de transmissão de dados),

software, técnicas de aplicação (protocolos de instalação e de medição) e técnicas de interpretação dos dados) (Gurovich *et al.*, 2006), como esquematizado na Figura 3.1. Em primeiro lugar, a planta observada é o principal elemento sensitivo do sistema. Os dados relacionados com a planta são registados automaticamente de forma controlada com o uso de um conjunto mínimo de sensores (amostragem). A fitomonitorização permite derivar informação e conhecimento sobre as culturas a partir de medições pontuais não representativas por si (Ton e Kopyt, 2003). Actualmente, esta tecnologia permite aceder ao estado hídrico qualitativo da planta em tempo real e de forma não destrutiva. É possível registar algumas respostas anatómicas e fisiológicas da planta às condições micro ambientais do local, modificadas pelas práticas agronómicas. A gestão da rega, baseada em informação de sistemas de fitomonitorização, é uma das tecnologias mais recentes e dinâmicas aplicadas em fruticultura (Wolf, 1996).

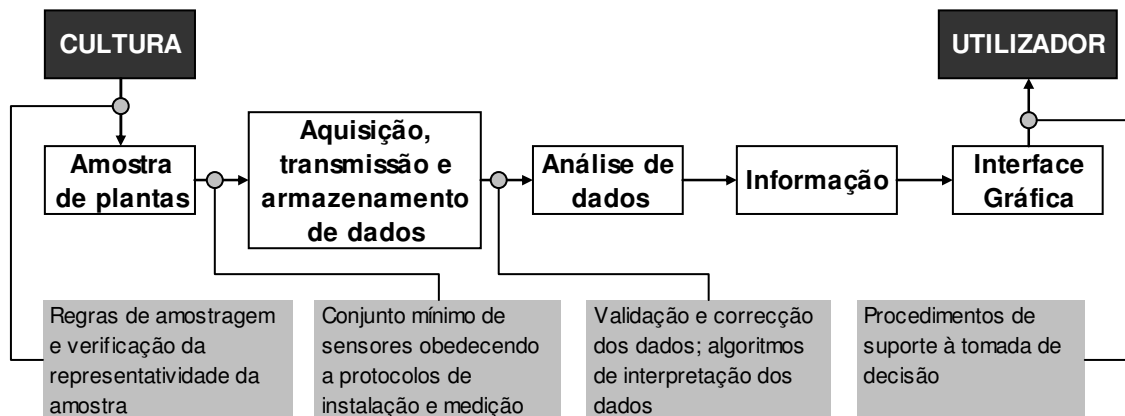


Figura 3.1 – Esquema da estrutura de uma rede de fitomonitorização típica (extraído e adaptado de Ton e Kopyt, 2003).

A selecção do conjunto mínimo de sensores baseados na planta, harmonização dos sensores, protocolos de medição e análise e interpretação de dados, são os aspectos principais para o desenvolvimento de um sistema deste género, para a comparação de valores e reprodutividade. A interpretação de dados é baseada na análise de tendências e dinâmicas das interações planta-ambiente (Ton, 1997).

Ao considerarmos a fitomonitorização, a unidade a monitorizar terá de ser uniforme em alguns aspectos: material vegetal (variedade, estado de desenvolvimento), facilidade de controlo (sectores ou talhões), práticas culturais e condições ambientais (Ton e Kopyt, 2003). Alguma heterogeneidade entre plantas é admissível desde que as práticas e tecnologias sejam aplicadas de igual modo sobre toda a unidade (Ton e Kopyt, 2003). Algumas plantas visualmente representativas da cultura devem ser seleccionadas em zonas representativas da parcela. A amostra mínima é de duas plantas: uma de controlo e uma de referência (Ton e Kopyt, 2003). Duas ou mais plantas permitem uma verificação regular da representatividade interna da amostra e consequentemente

garantir a extrapolação para o nível do coberto. Estes métodos baseados na planta podem a curto prazo ser combinados com métodos de detecção remota para facilitar a identificação de zonas homogêneas no interior do pomar e constituição de amostragens mais representativas (Naor, 2006), permitindo desta forma utilizar um número reduzido de sensores na planta, compatíveis com uma utilização comercial (Sepulcre-Cantó *et al.*, 2006). Com um mapeamento adequado do coberto poderá ainda ser possível extrapolar a monitorização efectuada para outras zonas semelhantes, reduzindo os custos de amostragem.

Para facilitar a instalação e operação desta tecnologia é comum actualmente recorrer a redes de sensores sem fios. Nesta tecnologia, cada ponto de medição (nó da rede) dispõe de um pequeno microcontrolador, os sensores requeridos, uma fonte de energia (bateria ou painel solar) e um transmissor de rádio (Wang *et al.*, 2006). Com esta tecnologia é possível instalar e ligar facilmente inúmeros sensores em locais representativos da parcela, facilitando bastante a constituição de uma amostragem representativa da unidade a monitorizar. Estas redes, em relação às redes convencionais, permitem uma instalação bastante mais rápida e estão geralmente associadas a sistemas auto configuráveis com diagnóstico de erros e são modulares. Estas redes de sensores sem fios têm condicionadores e processadores de sinal nos nós da rede, sendo os sinais transmitidos em formato digital. Como resultado, o ruído de leitura associado à utilização de cabos, em especial de grande comprimento, é eliminado (Wang *et al.*, 2006).

Apesar da observação directa da planta ter diversas vantagens potenciais em relação às medições baseadas no solo, nomeadamente uma relação mais directa com o funcionamento da planta, a sua utilização tem sido limitada pelas dificuldades práticas encontradas na implementação para uma utilização corrente e comercial (Jones, 2004). Contudo, actualmente já existem no mercado algumas soluções para apoio à tomada de decisão baseadas nesta técnica (p. ex. Phyttech Ltd., Israel; Dynamax Inc., EUA; Verdtech S.A., Espanha).

### **3.2.1.1. Fitomonitorios**

Considerando a fitomonitorização como a tecnologia de monitorização de plantas, podem-se designar os elementos do sistema relacionados com a observação de determinada variável como fitomonitorios. Cada fitomonitorio tem como objectivo observar determinada variável fisiológica, directa ou indirectamente pela observação de um processo relacionado com a variável fisiológica. Atendendo às características das medições requeridas para uma possível utilização como fitomonitorios (automatizável, robusta, expedita e de baixo custo), apresentam-se as medições com relevância para a área em estudo. Estas medições são usadas frequentemente em estudos de carácter científico sendo a sua utilização comercial ainda muito incipiente.

#### ▪ Fluxo de seiva (transpiração)

A medição do fluxo de seiva pode ser utilizada como um fitomonitor da transpiração. A estimativa da transpiração com base neste tipo de metodologia pressupõe a equivalência entre o fluxo de seiva no tronco e a transpiração. Este pressuposto é praticamente válido à escala diária. No entanto, em intervalos de tempo mais curtos e devido ao armazenamento hídrico nalguns órgãos da planta (capacitâncias), observam-se certos desfasamentos cuja magnitude reflecte, em parte, a maior ou menor distância entre o topo da árvore e o nível de medição do fluxo de seiva (David, 1995). Estudos recentes (Köckenberger *et al.*, 1997) indicam também que o refluxo de seiva no floema na redistribuição dos fotoassimilados pela planta origina fluxo no floema no sentido oposto, criando-se um fluxo em circuito. Nesta situação, ambos os fluxos têm impacto nos métodos térmicos de medição do fluxo de seiva devido à dissipação de calor da zona do sensor por convecção, para o qual se admite unicamente fluxo axial ascendente.

Com medições pontuais em plantas representativas do coberto (amostragem) é possível obter uma boa estimativa da transpiração do coberto. Actualmente, para a medição do fluxo de seiva através de métodos térmicos, existem várias alternativas possíveis, sendo os seguintes métodos os mais utilizados:

- Método de impulsos de calor, no qual o fluxo de seiva é calculado com base na detecção da variação da temperatura em pontos do tronco situados a diferentes distâncias de uma fonte de calor intermitente inserida no lenho (Cohen *et al.*, 1981);
- Método de aquecimento constante e pontual, no qual o fluxo de seiva é avaliado através da diferença de temperatura entre duas sondas inseridas radialmente no tronco, condicionada pelo fluxo convectivo de seiva (Granier, 1985, 1987);
- Método do balanço de calor que permite estimar directamente o fluxo volumétrico de seiva pelo aquecimento de uma secção ou sector do tronco, medição dos fluxos de calor por condução a partir da zona submetida a aquecimento e estimativa do fluxo volumétrico como proporcional ao termo residual da equação do balanço energético (Sakuratani, 1981; Valancogne, 1990).

O método do balanço de calor tem a vantagem face aos restantes de eliminar erros de calibração, sendo considerado o método mais fiável para obtenção de valores absolutos (Ferreira, 1996). A aplicação dos métodos de impulsos de calor e de aquecimento constante e pontual (vulgarmente designado por método de Granier) requer a determinação da área de tecido condutor (xilema activo) da secção onde se instala o sensor (raiz, tronco, ramo). Esta informação não é fácil de obter e como discutido em 5.2.3.3 é necessário considerar o perfil radial do fluxo de seiva e a variabilidade entre os diferentes raios da mesma secção. O método de *Granier* apresenta ainda a limitação da calibração original ser em parte empírica, pelo que deverá ser verificada para as condições de instalação. Apresenta contudo vantagens em termos de custo de amostragem e leitura da saída analógica do sensor. O método de impulsos de calor tem também uma calibração

parcialmente empírica e requer uma instrumentação mais dispendiosa, sendo geralmente utilizado para estudos de menor duração, em especial para caracterização do perfil radial dos troncos.

A nível científico, as medições de fluxo de seiva têm sido bastante usadas, sendo estes métodos passíveis de automatização, robustos e relativamente fiáveis para operação em condições de campo durante longos períodos de tempo (Fernández *et al.*, 2008). O desenvolvimento de soluções comerciais relativamente fiáveis destes métodos térmicos permite o actual desenvolvimento de vias alternativas para a determinação das necessidades hídricas das culturas e a realização de estudos fisiológicos com um maior detalhe e abrangência.

Actualmente a sua aplicação em raízes está a permitir aumentar o conhecimento sobre o funcionamento desta parte importante das plantas, como a existência de redistribuição de água ao nível radicular (*hydraulic lift*; Nadezhdina *et al.*, 2007).

Estes métodos permitem separar as componentes da ETc que respondem de forma diferenciada às condicionantes ambientais, devendo estas componentes ser consideradas separadamente em modelação. Além disso, podem ser usados em cobertos heterogéneos e pouco extensos horizontalmente (Ferreira, 1996) e também quer em plantas inteiras, quer em ramos ou raízes, sem perturbar as condições de funcionamento da planta.

#### ▪ Estado hídrico da planta

O estado da planta pode ser inferido indirectamente com base no estado hídrico do solo (teor ou tensão de água). Este facto resulta da maior facilidade de medição do estado hídrico do solo e da possibilidade de automatização das medições. Os problemas de amostragem associados à grande variabilidade espacial do estado hídrico do solo e o facto de apenas se obter uma estimativa indirecta do estado hídrico da planta, levam a considerar novos métodos para avaliar o estado hídrico da planta. Na planta, as possíveis medições incluem medições directas do estado hídrico (potencial hídrico ou hidratação dos tecidos) ou a medição de processos da planta que se sabe responderem de forma sensível ao estado hídrico da planta, como a condutância estomática. No entanto, é necessário considerar a capacidade que as plantas dispõem de regulação do seu estado hídrico, que tende a controlar o estado hídrico interno à medida que o solo tem menor disponibilidade hídrica e/ou a procura evaporativa atmosférica aumenta. Os métodos tradicionais de avaliação do estado hídrico da planta, o potencial hídrico (vd. 4.2.2.1) e a condutância estomática (vd. 4.2.2.2), não se coadunam com uma utilização corrente e ainda não são passíveis de automatizar para que essa utilização corrente seja possível. Pode-se encontrar por exemplo em Jones (2004) uma revisão dos métodos indirectos de medição ou observação do estado hídrico da planta.

A sensibilidade em relação à variação do estado hídrico e a variabilidade da medição são aspectos que devem ser considerados no estudo de indicadores do estado hídrico da planta. Estes aspectos determinam a qualidade do indicador e o número de medições a realizar para determinar convenientemente o estado hídrico do coberto vegetal.

#### FLUXO DE SEIVA

A medição do fluxo de seiva pode também ser utilizada como fitomonitor do estado hídrico da cultura. Para tal é possível utilizar os conceitos de transpiração relativa, definida como o quociente entre as perdas de água de um coberto em stress hídrico e as perdas que ocorreriam em conforto hídrico (Ferreira, 1996). No entanto, a implementação de protocolos de gestão baseados nesta abordagem não é prática devido à necessidade de manutenção de plantas de referência e por não permitir a prática de protocolos de gestão em rega deficitária (Fernández *et al.*, 2008). Para obviar este problema, a Dynamax (Dynamax Inc., EUA) utiliza num sistema comercializado, o conceito de *benchmarking* interno em relação à  $ET_0$ , que consiste em utilizar o quociente  $T/ET_0$  após o pleno abastecimento do solo (rega ou precipitação) como referência para o período seguinte até haver nova supressão do défice hídrico do solo.

O perfil radial de fluxo de seiva não é constante havendo alguma evidência que depende do estado hídrico da planta e do solo (Lu *et al.*, 2000), pelo que em alguns estudos foi testada a possibilidade de utilização desta medição para aceder ao estado hídrico das plantas. Fernández *et al.* (2001) e Lu *et al.* (2000) observaram uma redução relativa do fluxo de seiva nas camadas mais exteriores (junto ao câmbio) em situação de stress hídrico. No entanto, resultados de Fernández *et al.* (2008) em três espécies diferentes contrariaram os estudos anteriores. Nadezhdina (1999, 2000) propôs um índice do estado hídrico baseado na medição do perfil radial do fluxo de seiva, não havendo contudo indicações de posteriores desenvolvimentos. A medição do fluxo de seiva em raízes com ligação a diferentes zonas do solo, superficiais e profundas, poderá também fornecer alguma indicação do estado hídrico do solo (Fernández *et al.*, 2001). No entanto, a instalação dos sensores nas raízes é bastante mais difícil do que na parte aérea da planta.

Em geral, a utilização das medições do fluxo de seiva para a gestão da rega baseada na caracterização do estado hídrico das plantas não tem tido sucesso (Alarcón *et al.*, 2000).

#### TERMOMETRIA DE INFRAVERMELHOS

A percepção de que a temperatura da folha tende a aumentar com o stress hídrico e consequente fecho estomático e o desenvolvimento da termometria de infravermelhos, levaram ao desenvolvimento de métodos térmicos, para avaliar o estado hídrico das plantas (Jackson, 1982). A temperatura da folha é directamente determinada pelo fluxo de energia e balanço hídrico: a diminuição da disponibilidade hídrica decresce o fluxo de calor latente ao nível da folha e ocorre um

aumento complementar do fluxo de calor sensível e concomitante aumento da diferença de temperatura entre a superfície da folha e o ar (Fuchs, 1990). Contudo, esta diferença de temperatura depende das condições meteorológicas (radiação, temperatura do ar, humidade do ar e velocidade do vento) e de aspectos anatómicos e geométricos do copado (posição, inclinação e orientação das folhas). A dependência destes factores obriga à normalização das medições. Verifica-se que este método apresenta pouca sensibilidade em situações de stress hídrico ligeiro a moderado (Fuchs, 1990). Os resultados deste método estão também dependentes do acoplamento do copado à atmosfera, com a maior transferência de energia nos copados lenhosos a originar uma menor diferença de temperatura entre a folha e o ar, reduzindo a aplicabilidade deste método nas culturas abrangidas por este estudo.

Um dos índices térmicos do copado mais usado na gestão da rega é o CWSI (*crop water stress index*), proposto por Idso *et al.* (1981) e Jackson *et al.* (1981). A aplicação deste índice revelou ser válido em condições áridas com céu limpo mas pouco consistente em climas mais húmidos ou em condições de céu nublado (Jones, 1999). Apesar dos recentes avanços introduzidos neste índice (Alves e Pereira, 2000), a aplicação em copados esparsos com cobertura parcial do solo continua a ser difícil.

Em culturas esparsas a medição sobre o copado ou áreas maiores pode originar resultados falaciosos pela inclusão, no campo de visão do sensor, de superfície de solo, com características distintas do copado (Cifre *et al.*, 2005), aspecto que pode actualmente ser obviado com o processamento das imagens por meios informáticos (Jones *et al.*, 2002).

#### MICRODENDROMETRIA

Os órgãos das plantas sofrem variações diárias e sazonais de dimensões, quer devido ao crescimento dos tecidos (divisão e expansão celular), quer devido à variação da hidratação dos tecidos (Simonneau *et al.*, 1993; Genard *et al.*, 2001), quer em menor escala devido à variação da temperatura (dilatação térmica (Genard *et al.*, 2001). A variação devida à hidratação dos tecidos é reversível e à escala diária é geralmente de maior amplitude que o crescimento verificado, que se considera ser irreversível. A consideração da condição de regime permanente nas plantas (*steady-state*) não é possível, especialmente em plantas de grandes dimensões, nas quais são inúmeros os estudos que demonstram desfasamentos entre a perda de água por transpiração e a absorção pelo sistema radicular (Steppe e Lemeur, 2004). A existência deste desfasamento pressupõe a utilização de reservas internas da planta que são descarregadas e carregadas à escala diária e sazonal, originando a variação do tamanho observada em alguns órgãos da planta (Steppe *et al.*, 2006b; Zweifel e Häsler, 2001; Zweifel *et al.*, 2000). A variação diária da espessura das folhas em macieira praticamente não apresenta histerese em relação à variação do potencial hídrico do ramo, estando

fortemente correlacionada com a variação do potencial hídrico da folha, ao contrário da variação do diâmetro do tronco (Naor, 2006).

É globalmente aceite que o xilema activo e restante tecido interior ao xilema é praticamente incompressível (Brough *et al.*, 1986; Ueda e Shibata, 2001) e que as células de floema, câmbio vascular e parênquima, fornecem grande parte da água armazenada que contribui para a variação das dimensões dos órgãos (Genard *et al.*, 2001; Steppe *et al.*, 2006a; Zweifel *et al.*, 2000). Zweifel *et al.* (2000) demonstraram que, numa árvore de *Picea abies* L., a variação do diâmetro do tronco é proporcional ao teor de água da casca e que o teor de água do lenho se mantém inalterado com o potencial hídrico do xilema acima de  $-2.3 \pm 0.3$  MPa. Em consequência, para valores de potencial hídrico acima deste valor, nesta espécie, a variação do diâmetro do tronco reflecte a variação do armazenamento hídrico da casca. É também consensual que a variação de hidratação está ligada à variação do potencial hídrico dos tecidos (Panterne *et al.*, 1998). A variação de hidratação origina uma variação das dimensões dos órgãos o que, atendendo à variação de potencial hídrico associada, pressupõe alguma elasticidade dos tecidos, mesmo no tronco de plantas lenhosas. A existência desta elasticidade permite utilizar a medição da variação da dimensão dos órgãos para aceder ao estado hídrico da planta. A relação entre o diâmetro do tronco e o potencial hídrico do xilema, ao nível diário, apresenta uma histerese apreciável (Genard *et al.*, 2001), o que dificulta a inferência do estado hídrico da planta de forma contínua a partir do diâmetro do tronco.

Com base na curva de variação diária do diâmetro do órgão medido, são obtidos três índices<sup>5</sup>: diâmetro máximo diário do órgão (MxD, (daily) maximum diameter), diâmetro mínimo diário do órgão (MnD, (daily) minimum diameter) e amplitude de variação diária do diâmetro do órgão (MDS, (daily) maximum diameter shrinkage), como a diferença entre MxD e MnD. É também obtido um quarto índice baseado na variação entre dois máximos diários consecutivos (OGR, (daily) organ growth rate), associado à taxa de crescimento do órgão.

Num estudo conduzido por Ortuño *et al.* (2005b) em *Citrus limon* L., o índice microdendrométrico MDS apresentou uma sensibilidade de resposta à variação do estado hídrico da planta superior à redução verificada na condutância estomática, na fotossíntese líquida, no fluxo de seiva e no potencial hídrico mínimo, apenas superado pelo potencial hídrico do ramo. Com a vantagem de MDS responder mais cedo à imposição de restrições hídricas à cultura, tal como também observado por Goldhamer *et al.* (1999). Goldhamer e Fereres (2004) testaram em amendoeira (*Prunus dulcis* Mill.) um método de gestão da rega totalmente baseado no índice MDS

---

<sup>5</sup> Geralmente o método é aplicado sobre o tronco das plantas pelo que os índices são comumente definidos em relação a este órgão. Neste estudo, por se ter aplicado o método em dois órgãos diferentes (tronco e ramo) foi necessário utilizar uma designação mais abrangente, reportando-se ao órgão.

consistindo em iterativamente aumentar ou reduzir em 10% a dotação de rega em função de um determinado nível de referência do sinal de MDS. Contudo, encontraram fortes limitações na definição do nível de referência devido à dependência de MDS quer das condições do solo, quer da procura evaporativa da atmosfera. Para obviar este inconveniente, Ferreira *et al.* (1996) tinham antes utilizado em *Prunus persica* MDS relativo (RDTS, relative daily trunk shrinkage) com vantagens mas apresentando alguma instabilidade.

De referir que os sistemas de fitomonitorização comercialmente disponíveis se baseiam essencialmente nesta técnica e em medições do fluxo de seiva.

#### CAVITAÇÃO DO XILEMA

De acordo com a teoria actualmente fundamentada para a ascensão e fluxo da seiva nas plantas, a seiva em condições normais encontra-se em pressão negativa (tracção) no interior do sistema condutor. À medida que o défice hídrico da planta aumenta, a tracção no xilema aumenta, aumentando a ruptura das colunas de água no xilema – cavitação (Jones, 2004). Esta cavitação é um processo abrupto, acompanhado pela formação de bolhas de ar, podendo ser detectada acusticamente (Tyree e Dixon, 1986; Tyree *et al.*, 1986). Apesar da medição das emissões acústicas, provocadas pela cavitação das colunas de água no xilema, revelar ser válida para estudos do sistema vascular das plantas, houve poucos progressos para a utilização desta medição para a gestão da rega (Jones, 2004).

#### OUTROS ÍNDICES

Diferentes variáveis relacionadas com a reflectância dos copados têm sido testadas para monitorizar a actividade da planta. A grande vantagem deste tipo de métodos é a possibilidade de utilização em diferentes escalas, incluindo a detecção remota (aérea e por satélite). Em Penuelas e Filella (1998) e Cifre *et al.* (2005) podem-se encontrar os principais índices desenvolvidos nesta área. Juntamente com os índices relacionados com a reflectância do copado, os índices desenvolvidos com base na fluorescência da clorofila são promissores para uma utilização futura (Cifre *et al.*, 2005).

### **3.2.2 Previsão numérica do tempo**

A agricultura é uma das actividades económicas mais dependentes das condições meteorológicas pelo que, tem havido um progressivo desenvolvimento tecnológico com o objectivo de eliminar ou mitigar eventuais perdas devido aos factores ambientais. Neste domínio, destaca-se a utilização de estações meteorológicas para monitorização das variáveis meteorológicas e tomada de decisão sobretudo em rega e protecção das culturas. No entanto, a observação das condições meteorológicas apesar de muito úteis para caracterizar o estado passado e actual do sistema (cálculo de integrais térmicos, execução de modelos de previsão de pragas e doenças, estudo da

fisiologia vegetal, conhecimento do clima da região, etc.), pouca ou nenhuma informação fornece em relação às condições futuras da atmosfera (além da previsível evolução nas próximas horas com base no nosso conhecimento empírico). Atendendo a esta falta de alcance da meteorologia presente, esta informação é frequentemente conjugada com a informação climática da região (normal climática), prevendo-se estocasticamente a possibilidade de se verificarem determinadas condições atmosféricas.

Para a gestão da maioria das práticas agronómicas (mobilizações, sementeiras, tratamentos fitossanitários, fertilização, rega, etc.) será mais vantajoso adquirir conhecimento sobre as condições meteorológicas futuras. Apesar dos significativos avanços tecnológicos na previsão do tempo, existe um grande desfasamento entre a informação que é disponibilizada pelos nossos serviços meteorológicos (Instituto de Meteorologia, IP Portugal - IM) e a informação que a gestão da actividade agrícola necessita. Considere-se por exemplo a área em estudo nesta tese, a gestão da rega. O conhecimento antecipado da precipitação e da evapotranspiração de referência para os dias seguintes permitirá uma indubitável melhoria da gestão da rega.

O estado actual de desenvolvimento das previsões numéricas do tempo pode ser um instrumento muito útil quer para a gestão da rega convencional, facultando uma restituição da água ao solo em função das condições meteorológicas expectáveis de forma, quer a minimizar as perdas por saturação do solo, quer em regimes de rega deficitária para facilitar o controlo do estado hídrico dentro da gama de valores pretendidos.

A base da previsão numérica do tempo (PNT) foi formalizada por Vilhelm Bjerkness em 1919 (Persson e Grazzini, 2007) que aludiu que a previsão do tempo deveria ser vista como um problema de condições iniciais, isto é, se nós conseguirmos caracterizar o estado presente da atmosfera e se soubermos as equações matemáticas que governam o movimento, então a previsão correcta seria possível daquele ponto para a frente.

A primeira pessoa a tentar a simulação numérica do movimento da atmosfera seriamente foi Lewis Fry Richardson. No entanto, o seu trabalho, levado a cabo principalmente durante a segunda década do século passado, não teve sucesso na altura porque requeria um grande número de condições iniciais e exigia uma enorme carga de trabalho computacional para realizar uma previsão de 24 horas. Apenas em 1962 foi lançado o primeiro modelo operacional pelos Estados Unidos da América (EUA), seguido pela Inglaterra em 1965 (Persson e Grazzini, 2007). Em 1966, os EUA lançaram o primeiro modelo global, com uma resolução horizontal de 300 km e 6 níveis verticais (Persson e Grazzini, 2007). A nível europeu os maiores avanços nesta área surgiram após a criação

do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts<sup>6</sup> (ECMWF) em 1971 e que produziu a sua primeira previsão a 1 de Agosto de 1979.

Hoje em dia, a PNT é uma parte integrante das actividades operacionais da maioria dos serviços meteorológicos de todo o mundo (IM). Contudo, as previsões globais, para um alcance de 7 a 15 dias são feitas por apenas alguns centros mundiais, produzindo muitos países previsões regionais ou locais de alcances mais curtos. Os principais centros meteorológicos que se destacam na área encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Lista dos principais centros que se dedicam à realização de previsões numéricas do tempo.

Centro	País
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	Consórcio Europeu (Reino Unido)
National Centers for Environmental Prediction (NCEP/NOAA)	Estados Unidos da América
Hadley Centre for Climate Prediction and Research	Reino Unido
Max Planck Institute for Meteorology	Alemanha
Meteo France	França
Japan Meteorological Agency	Japão
Bureau of Meteorology	Austrália
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canadá
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos	Brasil

Em todos os modelos de PNT a qualidade da informação obtida é condicionada pelas incertezas inerentes ao conhecimento do estado actual da atmosfera a que se somam as limitações impostas pelos modelos de previsão (Tomé, 2004). As incertezas inerentes às observações atmosféricas e a utilização de observações irregularmente distribuídas sobre o globo são factores de erro introduzidos na análise (definição do estado inicial da atmosfera); as aproximações aplicadas às equações e a discriminação espaço-temporal, condicionada pela capacidade dos computadores utilizados, são exemplos de factores de erro introduzidos nos modelos (IM).

### 3.2.2.1. Classificação dos modelos

Os modelos de PNT existentes podem-se dividir em dois tipos: modelos globais e modelos locais.

#### ▪ Modelos globais

Os modelos globais são constituídos por um modelo de circulação geral, um modelo dos oceanos (ondulação), um sistema de assimilação de dados (análise do estado inicial) e recentemente na maioria dos casos por um sistema de previsão por conjuntos<sup>7</sup>. Como tradicionalmente estavam mais vocacionados para identificar o comportamento geral da atmosfera e

<sup>6</sup> Em 1971 foi tomada a decisão de criar o European Centre for Medium-Range Weather Forecasts que se veio a concretizar em 1973 com a adesão inicial de 19 países europeus ao consórcio (Áustria, Dinamarca, Bélgica, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Irlanda, Itália, Luxemburgo, Holanda, Noruega, Portugal, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e ex-Jugoslávia).

<sup>7</sup> Tradução da designação anglo-saxónica “ensemble forecast”.

identificar fenómenos meteorológicos de larga escala são também designados por modelos sinópticos.

Estes modelos dividem-se em duas categorias: modelos de previsão determinísticos e modelos de previsões por conjuntos. Os primeiros advêm da origem da PNT e correspondem à aplicação às condições iniciais da atmosfera das equações diferenciais que descrevem os diversos processos que determinam o estado do tempo futuro. Deste modo, apesar da reconhecida natureza caótica do movimento da atmosfera, estes modelos produzem uma única previsão, para cada instante, de acordo com a análise efectuada do estado inicial. Um problema associado a estes modelos é o seu variável grau de precisão. Períodos de relativamente boas previsões são seguidos por períodos curtos ou longos de previsões de fraca qualidade (Persson e Grazzini, 2007). A estes aspectos, juntam-se outros de carácter operacional, tais como, a existência de uma rede de observação com resolução espacial e temporal limitada, especialmente sobre as grandes massas de água como o Oceano Pacífico, que introduzem incerteza nas condições iniciais da atmosfera (Persson e Grazzini, 2007). Para lidar com estas limitações foram introduzidas as previsões por conjuntos que correspondem à realização de várias previsões com ligeiras perturbações nas condições iniciais (Persson e Grazzini, 2007). A previsão é o resultado da média do conjunto de previsões realizadas e o grau de concordância das várias previsões do modelo, designadas por membros do conjunto, permite inferir uma probabilidade de ocorrência de determinadas condições atmosféricas. A Figura 3.2 representa as previsões realizadas por um modelo deste tipo, no qual as condições iniciais foram ligeiramente perturbadas de acordo com o mesmo algoritmo.

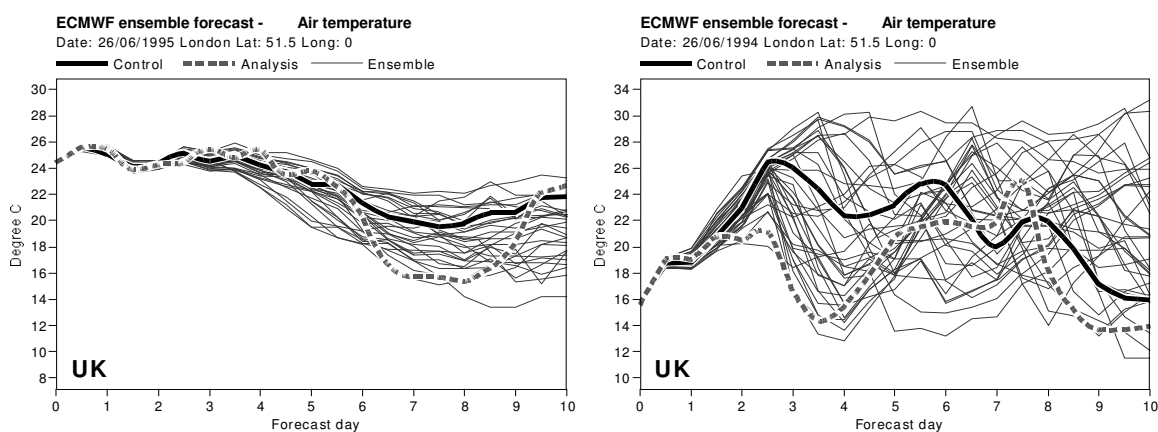


Figura 3.2 – Ilustração da dispersão obtida com um modelo de previsão por conjuntos: previsões da temperatura do ar (extraído de Persson e Grazzini, 2007).

Na previsão realizada no dia 26/06/1995 a atmosfera estava num estado mais predizível, obtendo-se pela perturbação das condições iniciais da atmosfera uma menor dispersão das previsões, do que em 26/06/1994. Esta menor dispersão das previsões correspondeu neste caso a uma boa previsão da temperatura até 6 dias de avanço em oposição aos dois dias na outra situação.

A conjugação dos modelos determinísticos de previsão do tempo com os modelos de previsão por conjuntos tem vantagens, especialmente a partir do 2º-3º dia por permitirem atribuir às previsões uma probabilidade de se verificarem (Persson e Grazzini, 2007). Com o contínuo progresso da capacidade computacional, as previsões por conjuntos tendem a substituir as previsões determinísticas para alcances mais longos (previsões mensais e sazonais) por permitirem integrar melhor o carácter estocástico da atmosfera (Persson e Grazzini, 2007).

- **Modelos locais**

Os modelos locais ou regionais, também designados de mesoscala, usam como condições iniciais de fronteira as previsões previamente realizadas por um modelo global de previsão do tempo, são limitados a uma determinada zona do globo e apresentam geralmente uma resolução horizontal superior aos modelos globais. Com resolução espacial de alguns metros a cerca de 50 km, visam identificar com maior detalhe o comportamento da atmosfera sobre uma região específica, sendo capazes de identificar fenómenos meteorológicos de pequena escala (ditos de mesoscala; IM).

### **3.2.2.2. Modelos de mesoscala**

Em Portugal existem alguns modelos de mesoscala implementados e a produzir previsões diariamente. O Grupo de Meteorologia e Climatologia da Universidade de Aveiro (Clim@UA) tem implementado um modelo numérico de previsão de tempo, designado Weather Research and Forecasting (WRF)<sup>8</sup>. O Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa disponibiliza previsões do tempo utilizando o modelo de mesoscala MM5 da PSU/NCAR (Pennsylvania State University / National Centre for Atmospheric Research). As condições iniciais e de fronteira utilizadas por estes modelos (WRF e MM5) consistem em previsões previamente realizadas pelo modelo global de previsão de tempo designado Global Forecasting System (GFS). O IM tem implementado uma versão operacional do modelo ALADIN<sup>9</sup>, com um período de integração de 48 horas, numa área geográfica de aproximadamente 1050 km por 1050 km, com 31 níveis verticais e com uma resolução horizontal de 12.7 km. Contudo, não disponibiliza dados deste modelo para o público em geral.

---

<sup>8</sup> Modelo desenvolvido em conjunto pelas seguintes entidades (EUA): National Center for Atmospheric Research; National Oceanic and Atmospheric Administration (National Centers for Environmental Prediction); Forecast Systems Laboratory; Air Force Weather Agency; Naval Research Laboratory; Oklahoma University; Federal Aviation Administration.

<sup>9</sup> Modelo de previsão numérica do tempo de mesoescala desenvolvido por vários grupos de previsão numérica da Europa e do Norte de África, através do Projecto Internacional ALADIN, sob a coordenação do Météo-France.

### 3.2.2.3. Modelos globais

Embora os diferentes organismos apresentados na Tabela 3.1 disponham de modelos globais próprios, os modelos globais mais difundidos em todo o mundo são os modelos do ECMWF e do NOAA/NCEP. Os modelos destes organismos apresentam alguns aspectos similares, tais como a forma de representação da atmosfera terrestre (domínio do sistema). À superfície utilizam uma representação do mesmo tipo da usada em cartografia (grelha de latitude e longitude sobre o globo). No entanto, a rápida convergência dos meridianos para os pólos, reduzindo a distância Este-Oeste poderia provocar instabilidade numérica perto dos pólos, além da redundância de dados devido à elevada representação (Persson e Grazzini, 2007), pelo que utilizam uma chamada representação Gaussiana reduzida, que é praticamente regular em latitude, mantendo a distância Este-Oeste quase constante, reduzindo o número de elementos da matriz em direcção aos pólos em todas as latitudes. Usam uma matriz regular apenas na zona central do globo.

O domínio vertical dos modelos é dividido em vários níveis com uma resolução vertical maior na camada limite planetária e menor na estratosfera e mesosfera. Os níveis são definidos por uma função que tem como parâmetro a pressão atmosférica, considerando estes modelos também níveis no solo.

#### ▪ Modelos do ECMWF

Actualmente o ECMWF utiliza várias versões diferentes do mesmo modelo para produzir previsões com alcances temporais diferentes:

- A versão TL799L91, que corresponde a uma resolução à superfície de aproximadamente 0.5 x 0.5 graus latitude/longitude para latitudes médias (aproximadamente 40 km na nossa região) e 91 níveis verticais, utiliza um intervalo de simulação de 12 minutos e é usada para fazer previsões até 10 dias.
- A versão TL399/L62, que corresponde a uma resolução à superfície de aproximadamente 1.0 x 1.0 graus latitude/longitude para latitudes médias e 62 níveis verticais, utiliza um intervalo de simulação de 30 minutos e é usada para fazer previsões por conjuntos até 15 dias. Este modelo é composto por um controlo e 50 membros (simulações sujeitas a perturbação das condições iniciais).
- As versões TL255L62 e TL159L62 utilizam intervalos de simulação de 60 minutos e são usadas para fazer previsões mensais e sazonais, respectivamente. Estas simulações são actualmente também realizadas com previsões por conjuntos com perturbação das condições iniciais.

#### ▪ Modelos NOAA/NCEP

O modelo global principal do NCEP (EUA) é designado por GFS (Global Forecast System), a versão actual T382L64 (introduzida em 31/05/2005) usa uma matriz de representação horizontal Gaussiana com 768x384 elementos, equivalente a aproximadamente a 0.5 x 0.5 graus de latitude/longitude, para latitudes médias. O domínio vertical do modelo é dividido em 64 níveis,

apresentando para uma pressão de superfície de 1000 hPa, o nível inferior a 997.3 hPa e o nível superior a 0.27 hPa. Este modelo é executado com um intervalo de integração principal de 7.5 minutos, um passo de 3 horas para o cálculo da radiação de longo comprimento de onda e de uma hora para a radiação de curto comprimento de onda. Esta configuração do modelo é utilizada para produzir previsões até 180 h de avanço, com um intervalo de 3 h.

Uma versão com uma resolução mais baixa, actualmente a T190L64 (aproximadamente 70 km na nossa região) é designada de GFSx. Esta versão é usada para estender as previsões efectuadas pelo modelo GFS até 384 h, com um intervalo de 6 h.

Os modelos GFS e GFSx são executados diariamente às 0:00, 6:00, 12:00 e 18:00 UTC e as previsões são guardadas em arquivo com uma resolução de apenas 1 x 1 grau até 180 horas de avanço.

Este organismo também dispõe de previsões por conjuntos, modelo designado por GFSE, com 14 membros. Este modelo está a usar a representação T126L28 e produz previsões com um alcance de 384 h.

#### **3.2.2.4. Métodos de avaliação das previsões**

A forma de avaliação da saída dos modelos depende da escala a que se está a trabalhar. Para avaliar o desempenho dos modelos no seu domínio de aplicação são geralmente comparados os dados da análise (estado inicial da atmosfera) com as previsões anteriormente realizadas, com diferentes tempos de avanço. Para avaliar em relação a um ponto ou zona limitada do globo são geralmente comparados com os dados de observações meteorológicas locais para diferentes tempos de avanço. Em qualquer das situações há um conjunto de índices estatísticos que são geralmente aplicados como o erro viés (BE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o erro médio absoluto (MAE; Anexo II).

### **3.3 Imperativos actuais da gestão da rega**

A água é o factor mais limitante para a produção vegetal na região Mediterrânica onde a precipitação é irregularmente distribuída ao longo do ano sendo escassa no Verão (Cifre *et al.*, 2005), aspecto que se poderá agravar no futuro devido às alterações climáticas. Segundo os resultados do projecto SIAM<sup>10</sup> (Santos *et al.*, 2002) irá ocorrer uma redução da precipitação sobre o território nacional e um aumento da temperatura, o que levará a um agravamento da situação actual. A nível mundial, a quantidade de água doce disponível para agricultura está a diminuir pelo que, para fazer face a esta redução e atendendo ao contínuo aumento da necessidade de alimentos, é necessário melhorar a eficiência de uso deste recurso, quer pelo melhoramento

<sup>10</sup> Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts, and Adaptation Measures – SIAM.

genético das espécies vegetais cultivadas, quer pela melhoria da gestão hídrica em regadio, quer pela melhoria das restantes praticas agrícolas (Naor, 2006). A este objectivo global, junta-se o objectivo do agricultor, do aumento do rendimento económico, o que pressupõe o aumento da produtividade das culturas e/ou a melhoria da qualidade dos produtos, com o menor custo de produção possível.

Tradicionalmente, a gestão da rega nas culturas tinha como propósito a manutenção das plantas em pleno conforto hídrico ao longo de todo o ciclo cultural. No entanto, o benefício de controlar o desenvolvimento vegetativo em algumas culturas, levou ao desenvolvimento do conceito da rega deficitária (Chalmers *et al.* 1981, 1986), como um modo de gestão do fornecimento de água ao solo para impor períodos predeterminados de défice hídrico às plantas, que podem resultar em algum benefício económico. Este conceito de gestão da rega é praticado actualmente segundo várias abordagens de que destacamos: rega deficitária controlada (RDI, *regulated deficit irrigation*) e rega parcial do sistema radicular (PRD, *partial rootzone drying*). A gestão da rega em RDI pressupõe o controlo do estado hídrico da planta com indução de períodos de stress em fases predeterminadas do ciclo cultural. O modo de gestão com PRD, necessita de um sistema de rega dual que permita humedecer dois volumes de solo distintos (explorados pelo sistema radicular), sendo a rega realizada alternadamente em cada um dos volumes com controlo do estado hídrico da planta.

O estado hídrico afecta o desempenho das plantas através de dois mecanismos: pelo efeito na condutância estomática e através da turgescência e expansão dos tecidos (Naor, 2006). Com a rega deficitária, em certas culturas, é possível obter benefícios económicos superiores aos obtidos com a gestão da rega convencional, através de uma melhor repartição dos fotoassimilados, melhor qualidade dos produtos obtidos e economia de água e outros factores de produção. Neste tipo de gestão da rega é possível estabelecer inúmeros planos de gestão de acordo com as disponibilidades hídricas, o tipo de cultura, a valorização dos produtos e os parâmetros de qualidade. Verifica-se que a resposta das plantas ao estado hídrico a que estão sujeitas depende da fase do ciclo fenológico em que se encontram e da sensibilidade diferenciada dos processos ao estado hídrico (Ton e Kopyt, 2004; Naor, 2006). Em geral a rega deficitária é mais profícua em fruteiras onde o desenvolvimento vegetativo e dos frutos está em grande medida separado no tempo (Tromp *et al.*, 2005). Nestes casos, a redução do fornecimento de água durante a primeira fase reduz o crescimento vegetativo mas tem pouco impacto no crescimento dos frutos. A rega deve ser restabelecida após a fase de rápido crescimento vegetativo a partir da qual o desenvolvimento dos frutos é dominante. Como o crescimento dos frutos é menos sensível à carência hídrica do que o desenvolvimento vegetativo, a rega deficitária pode também ser benéfica nas culturas onde o

desenvolvimento vegetativo e dos frutos se sobrepõe parcialmente (Naor, 2006). Em videiras, um curto período de stress hídrico após o vingamento (alimpa) permite reduzir o tamanho dos bagos e potenciar a qualidade das uvas para vinificação (Dry *et al.*, 2001). A rega deficitária origina também uma redução do crescimento do sistema radicular ainda que em menor escala do que a redução do crescimento vegetativo. A restrição do crescimento radicular é um aspecto importante e vantajoso para o controlo do porte de algumas árvores para as quais ainda não se dispõe de porta-enxertos de vigor adequado e em regiões onde o controlo do crescimento vegetativo através da aplicação de reguladores de crescimento não é permitido por lei (Tromp *et al.*, 2005).

Apesar de haver alguma divergência nos resultados obtidos em RDI podem-se indicar alguns casos nos quais os resultados da aplicação de estratégias de RDI foram de algum modo positivos: promoção da qualidade dos frutos em macieira (Proebsting *et al.*, 1984), economia de água em citrinos (Goldhamer e Salinas, 2000), qualidade dos frutos e economia de água em prunóideas (Goldhamer *et al.*, 1994), economia de água em olival (Moriani *et al.* 2003), qualidade de uvas para vinificação (Medrano *et al.*, 2003; Dry *et al.*, 2001).

Além de conhecer a fisiologia das plantas (fases do ciclo e níveis de stress) é importante dispor de condições para fazer variar o seu estado hídrico (Matthews *et al.*, 1987). Isto é facilitado em solos pouco profundos, com baixa capacidade de retenção hídrica e com a utilização de sistemas de rega localizados que humedecem pequenos volumes de solo, promovendo-se deste modo a concentração do sistema radicular. Em termos de implementação de RDI, a maior dificuldade é a necessidade de manter o estado hídrico das plantas numa gama de valores muito estreita; qualquer excesso de aplicação de água inviabiliza o seguimento da estratégia de rega e pode anular os benefícios anteriores; uma carência hídrica superior ao pretendido pode originar perdas avultadas de produtividade e qualidade (Jones, 2004). Os problemas que subsistem nos sistemas de rega instalados na maioria dos pomares podem ser facilmente solucionados, pelo que o factor limitante para a aplicação com sucesso de estratégias de rega em RDI é a capacidade de gestão da rega ou em sentido mais abrangente a gestão hídrica através das diversas operações culturais. A grande maioria dos pomares instalados actualmente tem um sistema de rega com cobertura total, com rega localizada por microaspersão ou gota-a-gota. Deste modo, a afectação dos recursos hídricos existentes à cultura é feita de forma simples, deixando de ter grande impacto em termos de custos a frequência de rega, além do impacto que tem na fracção de água perdida por evaporação.

Os conceitos de rega deficitária apresentados neste ponto têm apenas como objectivo contextualizar as exigências colocadas actualmente à gestão da rega, podendo-se encontrar mais elementos sobre esta temática p. ex. em Naor (2006), Kriedemann e Goodwin (2003) ou no Boletim

22 da FAO (2000). As exigências da gestão da rega também aumentaram nas últimas décadas devido à instalação de culturas em solos menos férteis e menos profundos (menor capacitância hídrica) e regados com sistemas de rega localizada e em geral com a intensificação cultural. Um aspecto associado à gestão da rega deficitária é o risco acrescido de haver perdas de rendimento das culturas. Para colocar as culturas em stress hídrico é necessária alguma depleção da água do solo, pelo que, atendendo à redução acentuada da condutividade hidráulica do solo em função do seu estado hídrico, facilmente são ultrapassados os limites definidos para o estado hídrico das plantas. Outro risco está associado à indução do stress hídrico no momento oportuno do ciclo cultural e na duração adequada. Esta tarefa é facilitada em sistemas culturais em solos com reduzido armazenamento hídrico (solos arenosos ou pouco profundos), com plantas com sistemas radiculares pouco extensos, geralmente obtidos com sistemas de rega localizada. No entanto, estas características ao reduzir o “poder tampão” do solo/sistema radicular aumentam as exigências da gestão da rega. O risco está também associado à previsibilidade climática, sendo a operação de gestão facilitada em regiões climáticas áridas onde a quase totalidade da água é aplicada através da rega.

Para dar resposta às novas exigências da gestão da rega, controlo do estado hídrico das plantas (rega deficitária) e redução dos desperdícios de água e nutrientes (rega convencional), a rega de precisão baseada nas necessidades fisiológicas da planta, passou a ter destaque na economia de água em agricultura (Haiyie *et al.*, 2003). A ideia subjacente é inovar dos métodos tradicionais de gestão da rega para métodos baseados em informação das necessidades reais da planta, no instante e quantidade adequados (Haiyie *et al.*, 2003). A comunidade científica, no que concerne à gestão dos recursos hídricos em agricultura, está actualmente a desenvolver novas abordagens e tecnologias para a optimização da gestão da rega. Entre estas, as baseadas na monitorização directa da planta aparecem como as mais promissoras por integrarem, numa única medição, as condições edafoclimáticas prevalentes e os efeitos da regulação hídrica da própria planta. A temperatura do copado, as variações do diâmetro do tronco e o fluxo de seiva, são consideradas as variáveis de medição automatizável mais promissoras para utilização na gestão da rega, (analisados em 3.2.1.1).

Atendendo ao conhecimento empírico e científico sobre o funcionamento hídrico da cultura e integrando aspectos inerentes à unidade de produção (práticas culturais, sistema de rega, disponibilidade de água, etc.), deverá ser traçado um plano de gestão hídrica tendo como objectivo a gestão do estado hídrico das plantas ao longo do ciclo cultural. Será conveniente usar uma escala temporal que traduza a sequência de estados fenológicos da planta porque só assim se conseguirá adequar o plano de gestão à actividade da planta e obter os resultados desejados.

### **3.4 ISIS – Integrated System for Irrigation Scheduling**

O sistema objecto de desenvolvimento nesta tese pretende integrar o conhecimento científico sobre o funcionamento hídrico das plantas/culturas, tirando partido das tecnologias disponíveis de monitorização vegetal e previsões numéricas do tempo. O intuito desta integração é fazer face aos novos desafios colocados à gestão da rega no dia-a-dia, como brevemente exposto em 3.3 e sistematizado em pré-requisitos em 3.4.1. O desenvolvimento de um sistema de suporte à decisão (para a gestão da rega) não deverá envolver nova investigação. Necessitará, no entanto, da articulação do conhecimento fisiológico (fisiologia vegetal aplicada) e fitotécnico, juntamente com o conhecimento e experiências locais, a que se juntará a experiência do agricultor utilizador do sistema, para resolver eventuais falhas do sistema (Naor, 2006). A orientação para o desenvolvimento do sistema era que fosse um sistema o mais portátil possível de forma a ser aplicável a outros locais e culturas com o mínimo de ajustamentos (parâmetros). Como apresentado em 2.1, o funcionamento hídrico das plantas é entendido quase completamente com base em princípios físicos, subsistindo contudo algumas dificuldades na percepção dos processos de absorção radicular e regulação da transpiração, devido à complexidade destes processos. O desenvolvimento de um sistema totalmente baseado em princípios fundamentados cientificamente de momento não é possível, sendo necessário para alguns dos processos considerar uma abordagem conceptual (simplificação da complexidade dos processos) ou empírica.

Qualquer tentativa de modelação dos processos biológicos tem de lidar com um elevado número de factores e interacções entre os factores envolvidos. Para dar resposta a esta complexidade a tendência é de criar modelos também bastante complexos, que necessitam da medição de muitas variáveis, quer para a sua parametrização, quer para a sua execução. Tendo em mente a vertente prática deste trabalho, o sistema a desenvolver deverá cumprir os pré-requisitos definidos com o conjunto mínimo de parâmetros e medições sobre os processos. Para facilidade de referência ao longo do documento, o sistema em desenvolvimento é designado pelo acrónimo ISIS (Integrated System for Irrigation Scheduling).

#### **3.4.1 Pré-requisitos do sistema**

Atendendo às singularidades das diferentes culturas e modos de produção vegetal, pretende-se especificar os pré-requisitos a que um sistema de determinação das necessidades hídricas deverá obedecer, conforme referido em 1.2. Ao projectar um sistema para integrar numa ferramenta de apoio à gestão da rega é necessário considerar as características a que este deverá atender para ser aplicável. Jones (2004) sistematizou os seguintes aspectos principais:

- Sensível a pequenas variações nas condições do meio;

- Rápida resposta às alterações para permitir uma rápida actuação;
- Responder à alteração das condições meteorológicas atempadamente;
- Facilmente adaptável a diferentes culturas/estados fenológicos, com calibrações mínimas;
- Passível de automatização;
- Robusto, sem necessitar de muita formação dos operadores e baixa quantidade de medições manuais para parametrização;
- Acessível, quer na aquisição, quer em termos de operação.

O consumo hídrico das culturas, como apresentado em 3.1, corresponde à ETc. No entanto, como também exposto em 3.1, a transpiração reveste-se de maior importância e é geralmente o processo evaporativo dominante nas condições Mediterrânicas, no Verão.

Considerando que na gestão da rega, em especial na rega deficitária, o objectivo último é a manutenção do estado hídrico das culturas num determinado nível, é fundamental aceder a esta variável, pelo que deverá constituir um pré-requisito a determinação do estado hídrico das plantas.

Do ponto de vista prático da condução da rega, um sistema de suporte a esta actividade deverá inferir a evolução do estado hídrico da planta, a partir do conhecimento do seu estado hídrico actual para permitir algum planeamento. Este objectivo compreende a previsão do regime hídrico da atmosfera (poder evaporativo e precipitação) e inferência da evolução da disponibilidade hídrica do solo para a planta em resultado do regime hídrico imposto. Dependendo do tipo de plantas em consideração, quanto ao tipo de regulação hídrica, a quantificação da transpiração ao longo do dia poderá também ser necessária para identificar a regulação estomática e manutenção do estado hídrico em plantas isohídricas, o que limitaria o uso de potencial hídrico como indicador do estado hídrico.

A nível sazonal, como referido no ponto anterior, é preciso atender às fases do ciclo cultural para obter as respostas desejadas através da manipulação do estado hídrico das plantas. Desta forma, é preciso considerar o momento da recorrência de eventos biológicos das plantas e as causas do seu acontecimento em relação a aspectos bióticos e abióticos – a fenologia.

Do ponto de vista operacional, o sistema deverá ainda considerar os seguintes pré-requisitos:

- Resolução espacial ajustada à aplicação em unidades de produção de características homogéneas (talhões ou sectores de rega);
- Longevidade equiparável às unidades de produção perenes (10 a 30 anos), admitindo-se a substituição de alguns elementos do sistema (sensores), desde que o seu custo seja compatível com a manutenção de baixos custos de operação;
- Ser totalmente automatizável ao nível da aquisição de dados, processamento e extracção de informação e conhecimento, ainda que com supervisão de operadores qualificados.

Como síntese deste ponto, pretende-se especificar um sistema para apoio à gestão da rega em culturas lenhosas que permita:

- Quantificar o consumo actual da cultura (transpiração);
- Quantificar o estado hídrico actual da cultura com resolução e precisão suficiente para identificar ligeiras variações;
- Prever a evolução da transpiração e respectivo estado hídrico da cultura a partir da caracterização do estado actual do sistema.

### 3.4.2 Modelo do processo

Para o desenvolvimento de um sistema de monitorização e controlo sobre processos industriais ou biológicos é necessário ter um bom conhecimento do seu funcionamento. Foi com base na planta que a estrutura do sistema ISIS foi definida, como posteriormente apresentado no arquétipo do sistema. Procurou-se a forma mais simples de representar a complexidade do funcionamento hídrico das plantas, considerando-se o conceito SPAC (Figura 3.3). Este esquema permite representar o fluxo de água desde o solo, através da planta, até à atmosfera, como apresentado em 2.1 e desenvolver uma abordagem integrada do funcionamento hídrico da planta.

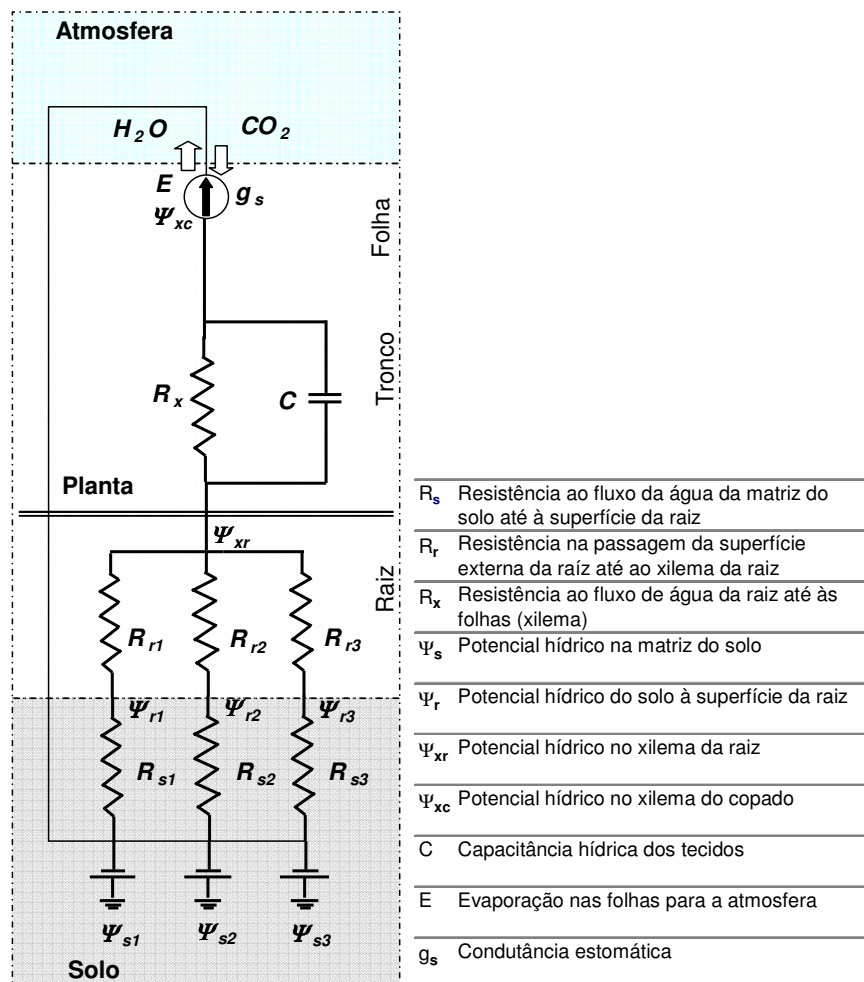


Figura 3.3 Diagrama do sistema SPAC considerado para a representação dos processos hídricos do sistema vegetal, ao nível da planta.

O diagrama da Figura 3.3 representa o sistema radicular da planta dividido em três partes, como utilizado na versão final do modelo SPAC constituinte do sistema ISIS. Em termos conceptuais esta representação considera três macrorraízes ligadas em paralelo.

### 3.4.3 Formulação do sistema ISIS

A abordagem ao problema, considerando os pré-requisitos apresentados em 3.4.1, e atendendo às especificidades das culturas lenhosas, considera três componentes principais que se integram:

- **Subsistema de monitorização vegetal** (fitomonitorização) para caracterizar o estado actual da cultura, através de medições realizadas numa amostra de plantas representativas da cultura. A caracterização contempla a quantificação da transpiração do coberto e a determinação do seu estado hídrico;
- **Modelo SPAC** para descrever o funcionamento hídrico da planta, nomeadamente os processos de extracção radicular, fluxo de água na planta e regulação estomática da transpiração. Esta componente faz a integração com as outras duas componentes do sistema;
- **Previsão da evapotranspiração de referência** a curto/médio prazo, variável preditora do funcionamento hídrico do sistema solo/planta.

A integração destas componentes utiliza a monitorização vegetal para caracterizar o estado actual da cultura e para adquirir conhecimento sobre o seu funcionamento hídrico (base de conhecimento). O conhecimento resulta essencialmente da análise do binómio transpiração/estado hídrico em relação à evapotranspiração de referência e ao tempo fisiológico (fenologia). Utilizando a terminologia da metodologia FAO (Allen *et al.*, 1998), corresponde à determinação da curva do coeficiente cultural basal ( $K_{cb}$ ), para as condições locais. Desta análise resulta também o conhecimento sobre o funcionamento/controlo estomático da planta, necessário para o ajustamento de parâmetros de uma função que descreva convenientemente o seu funcionamento.

O conhecimento do estado hídrico actual da cultura, apesar de importante, é insuficiente para a gestão da rega. Tradicionalmente aplica-se o balanço hídrico do solo, considerando a evapotranspiração futura determinada com base na normal climática da região, para prever a data da próxima rega. Este processo é simulado à escala diária sem descrever a evolução do estado hídrico da cultura, apenas considerando um factor de ajustamento da depleção máxima admissível da reserva utilizável do solo para considerar o efeito da redução do estado hídrico das plantas em períodos de maior evapotranspiração imposta pelas condições do meio. Ora, no sistema aqui apresentado definiu-se como pré-requisito a determinação quantitativa da evolução do estado hídrico da cultura a curto/médio prazo. O sistema utiliza um modelo SPAC para modelar o funcionamento hídrico da planta e com base nas previsões da evapotranspiração de referência ( $ET_{op}$ ), simular a evolução do estado hídrico da planta, com uma resolução temporal horária. O

modelo SPAC faz a integração das medições realizadas pelo sistema de monitorização vegetal, o conhecimento sobre o funcionamento das plantas, utilizando a  $ET_{op}$  como elemento predictor. A representação geral do sistema está materializada no diagrama da Figura 3.4.

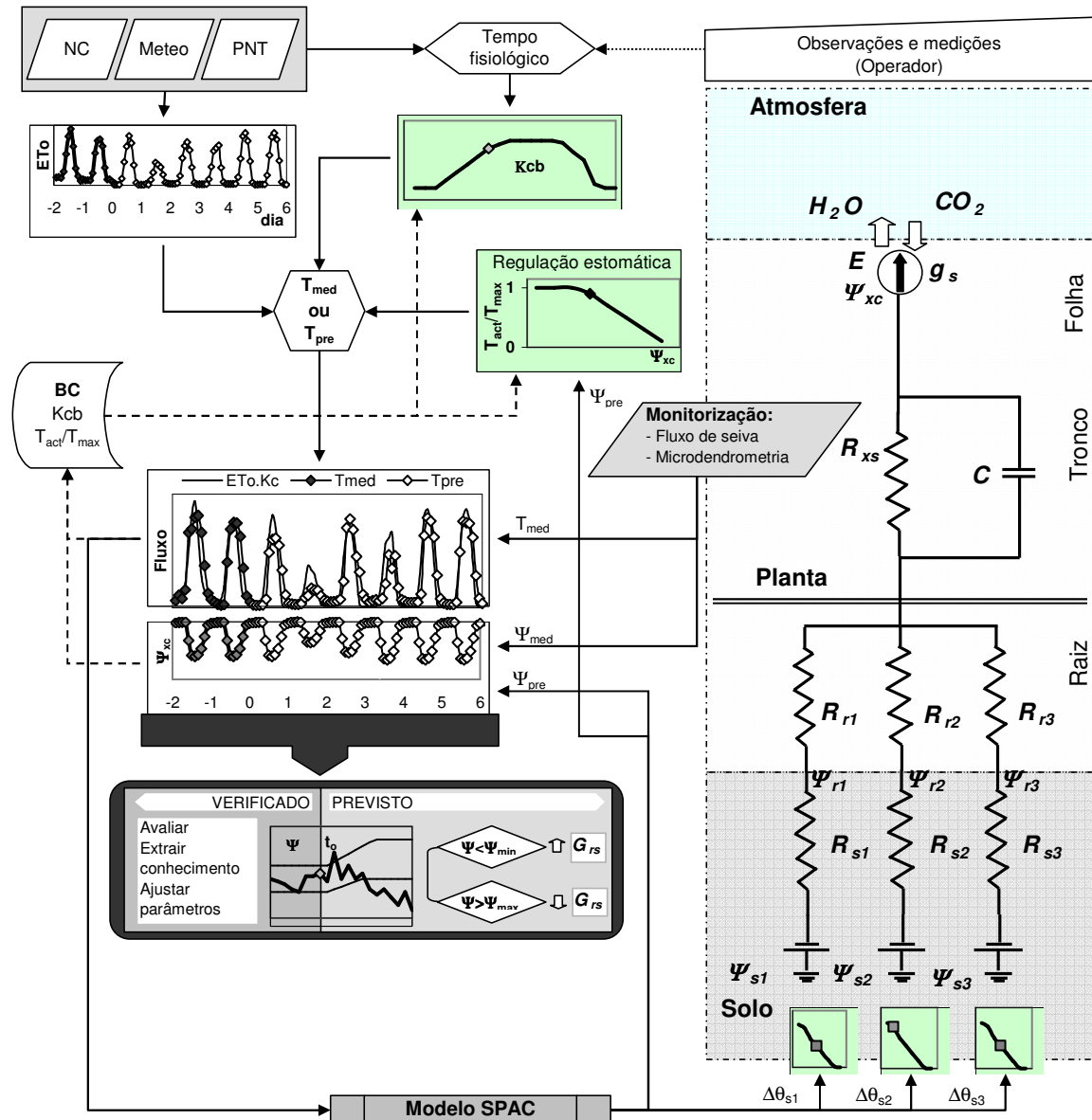


Figura 3.4 – Arquétipo do sistema formalizado para a determinação (estado actual) e previsão a curto/médio prazo da transpiração e estado hídrico da cultura

Com base na revisão efectuada sobre os possíveis fitomonitoradores, apresentada em 3.2.1.1, a fitomonitorização considera a observação do fluxo de seiva e observações microdendrométricas para a determinação da transpiração cultural e estado hídrico da planta. Pretende-se com estas duas medições, em amostragem representativa do coberto vegetal, caracterizar o estado actual do sistema vegetal, obtendo a taxa de transpiração do coberto e o correspondente estado hídrico. A evaporação, quando necessária, será determinada por um modelo do processo.

A caracterização do estado actual do sistema, feita através de monitorização, tem de ser contextualizada face às condições do meio. Considerando as restrições impostas às medições a realizar para tornar o sistema utilizável, não é exequível monitorizar o estado hídrico do solo. No entanto, os dados meteorológicos, de um modo geral, estão disponíveis através de redes meteorológicas públicas. Os modelos de previsão numérica do tempo (PNT) têm registado progressos notáveis pelo que, esta é uma fonte de informação a considerar. As PNT caracterizam, quer o estado presente da atmosfera, quer a sua evolução a curto prazo, devendo nos próximos anos substituir a utilização da normal climática da região para prever as necessidades hídricas a curto/médio prazo. Deverão também relegar os dados meteorológicos para análises posteriores dos dados com vista à sua avaliação e extracção de conhecimento, deixando de ser tão necessário dispor destes dados em tempo real.

Na estrutura do sistema ISIS, a variável forçante do funcionamento do modelo SPAC é a  $ET_0$ , determinada com base nos diferentes tipos de dados disponíveis, meteorologia, PNT e normal climática da região (clima), dependendo do alcance temporal pretendido. Estas fontes de informação meteorológica são também usadas para, em conjugação com a monitorização vegetal e informações inseridas pelo operador do sistema, determinar a fase do ciclo cultural (fenologia).

A informação recolhida pelo sistema de monitorização vegetal deverá ser sintetizada a um único valor por variável observada, por unidade de observação (valor médio e indicador de dispersão/confiança), para ser integrável no restante sistema e depois facilmente acessível. Deverá também ser armazenada a  $ET_0$  e o tempo fisiológico da cultura (estado fenológico). Esta informação deverá ser analisada em duas fases: em tempo de execução para identificar um desenvolvimento da cultura diferente do normal e ajustar parâmetros; anualmente para ajustar a curva do coeficiente cultural usada caso se verifiquem desvios sistemáticos em relação à curva introduzida (extracção de conhecimento), o que acontecerá pelo menos durante as fases de formação dos cobertos e na fase de declínio de produção.

O sucesso deste sistema para prever a evolução da transpiração e do estado hídrico das culturas, depende da capacidade de determinar a condutância hidráulica do sistema radicular da planta e de modelação do comportamento estomático. O seu conhecimento permitirá, pela resolução das equações que descrevem o fluxo de água no sistema SPAC, simular a variação do potencial hídrico na folha originada pelo fluxo, em função da procura evaporativa da atmosfera e da disponibilidade hídrica do solo (Figura 3.5).

A implementação do sistema ISIS requer o uso de métodos numéricos que simulem o fluxo hídrico no sistema SPAC (Figura 3.5). O fluxo é determinado pela  $ET_0$ , considerando o desenvolvimento da cultura ( $K_{cb}$ ) e ajustado pela regulação estomática ( $T_r$ ). O fluxo originado na

folha (transpiração) é propagado no sistema vascular da planta à raiz onde ocorre absorção radicular ( $Q_{rs}$ ). Neste processo ao ocorrer variação do potencial hídrico do xilema, em qualquer parte da planta, ocorre variação do armazenamento hídrico dos tecidos adjacentes ao sistema vascular ( $Q_{sto}$ ). O fluxo no sistema radicular, considerando  $G_{rs}$ , será conseguido através de uma quebra de potencial hídrico entre o solo e o xilema da raiz, ao qual acresce a quebra de potencial do restante percurso na planta até às folhas para determinar o novo valor de  $\Psi_{xc}$ . A extracção total de água será particionada pelos três volumes de solo em função da condutância hidráulica de cada conjunto solo/raiz e de  $\Psi_s$  de cada um dos volumes de solo. Esta extracção irá determinar um novo estado hídrico do solo, no caso de não haver outros fluxos (rega, precipitação, etc.).

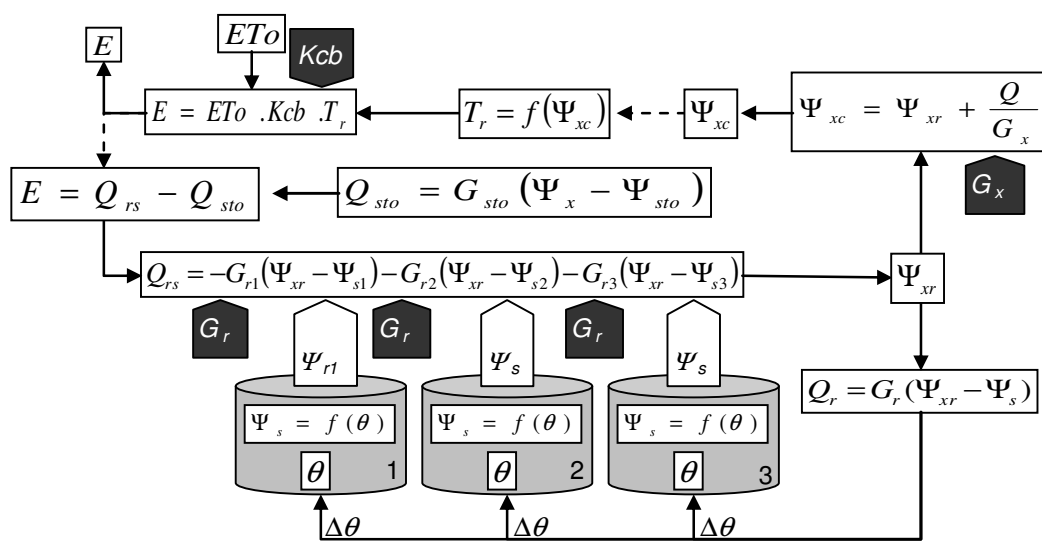


Figura 3.5 – Formulação algébrica simplificada do modelo SPAC, considerado na formulação inicial do sistema ISIS.

A disponibilidade hídrica do solo para a planta depende da distribuição das raízes no solo, da distribuição do teor de água e das propriedades hidráulicas do solo, especialmente na proximidade das raízes. A disponibilidade hídrica para o sistema radicular pode ser determinada por modelos do fluxo de água no solo (vd. 2.1.1.1). No entanto, o sistema radicular de plantas perenes é irregular e geralmente ocupa um volume de solo não uniforme (com espaços não explorados) e que é superior ao volume de solo abrangido pelo sistema de rega (Naor, 2006). Atendendo a esta limitação, a modelação do processo de extracção radicular é bastante complexa e mesmo a monitorização directa do estado hídrico do solo neste tipo de culturas é problemática sendo difícil de estabelecer relações, mesmo que estatísticas, com o estado hídrico da planta. No entanto, para tornar o sistema operacional, o solo terá de ser modelado de forma a permitir considerar as características fundamentais que afectam a extracção de água pelas plantas. O solo foi compartimentado em três volumes que pretendem representar todo o volume de solo explorado pelas plantas (directamente e através dos movimentos internos de água no solo): (1) um volume representa a zona de solo com

elevada densidade radicular e que é sujeito a rega e precipitação directamente, pelo que representa a água do solo facilmente disponível para a planta, estando geralmente associado a um volume de solo confinado, nos sistemas de rega localizada; (2) um volume correspondente a uma situação de moderada disponibilidade hídrica por apresentar uma densidade radicular mais baixa, não sujeito a rega directamente, tendo como principal entrada a precipitação e (3) um volume considerável de solo de baixa densidade radicular e portanto de baixa disponibilidade hídrica para a planta mas de elevada persistência e que permitirá considerar fluxos como a ascensão capilar de forma simples, ao considerar nestes casos uma capacitância hídrica infinita, abaixo de determinada carga. Considerou-se também aqui a terminologia usada para descrever o sistema SPAC, por analogia a circuitos eléctricos. Cada uma destas zonas será caracterizada por um volume, funções hidrodinâmicas (potencial hídrico e condutividade hidráulica não saturada em função do teor de água) e uma densidade radicular. Apesar do aparente aumento de complexidade do sistema por considerar três volumes de solo ligados em paralelo, pensa-se que esta configuração permitirá uma melhor modelação da geometria da maioria dos sistemas radiculares. Outro aspecto que esteve subjacente à consideração deste tipo de abordagem foi o facto de permitir facilmente englobar os sistemas de rega deficitária com rega parcial do solo (PRD), considerando nesse caso dois volumes iguais sujeitos a rega alternada e o efeito que esse modo de rega tem na condutância hidráulica do solo/sistema radicular. Em termos de parametrização, as funções hidrodinâmicas existentes na bibliografia para as diferentes classes de textura do solo deverão ser suficientes para descrever convenientemente o comportamento hídrico do solo (retenção, potencial hídrico e condutividade hidráulica). Os volumes e as densidades radiculares deverão ser atribuídos tendo por base o compasso da plantação, o perfil do solo e o conhecimento existente sobre o sistema radicular da espécie vegetal em consideração. A modelação conveniente do fluxo de água no solo, originado pela extracção radicular, permitirá obter a resistência do fluxo solo-raiz.

Embora não considerado tradicionalmente, a manutenção do estado hídrico das plantas na gama de valores admissíveis no plano de gestão hídrica preestabelecido, poderá implicar outras operações culturais para além da rega, tais como: poda de raízes, cobertura do solo (cultura de revestimento), mobilizações, drenagem, etc. É por este motivo que no diagrama do sistema da Figura 3.4 se considera tanto o aumento de  $G_{rs}$  como a sua redução.

Em termos operacionais, o sistema definido apresenta redundância na caracterização do estado actual da cultura, através da monitorização vegetal e através do sistema SPAC pela previsão num momento anterior, do estado presente. Isto possibilita verificar a consistência da parametrização em uso e o funcionamento do sistema ISIS. Em caso de disparidade sistemática entre as duas vias, o funcionamento do sistema deverá ser reavaliado.

# CAPÍTULO 4

## MATERIAIS E MÉTODOS



### SUMÁRIO

Neste capítulo são caracterizados os casos de estudo, apresentados os materiais e métodos usados nos trabalhos experimentais, caracterizadas as fontes de dados externas, terminando com a sistematização dos dispositivos e actividades experimentais realizadas ao longo dos trabalhos, em cada um dos dispositivos experimentais definidos.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MEIOS EXPERIMENTAIS

##### 4.1.1 Pomar de Briteiros

##### 4.1.2 Lisímetro

#### 4.2 MONITORIZAÇÃO E MEDIÇÃO

##### 4.2.1 Estado hídrico do solo

##### 4.2.2 Estado hídrico da planta

##### 4.2.3 Fluxo de seiva

##### 4.2.4 Componentes do balanço de energia do coberto

##### 4.2.5 Evapotranspiração do estrato inferior

#### 4.3 FONTES DE DADOS EXTERNAS

##### 4.3.1 Climatologia

##### 4.3.2 Meteorologia

##### 4.3.3 Previsões numéricas do estado do tempo

#### 4.5 DISPOSITIVOS E PROTOCOLOS EXPERIMENTAIS UTILIZADOS

##### 4.5.1 Dispositivo I (pomar - 2003 a 2006)

##### 4.5.2 Dispositivo II (lisímetro - 2005)

##### 4.5.3 Dispositivo III (pomar - 2006)

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização dos meios experimentais

#### 4.1.1 Pomar de Briteiros

Na âmbito do projecto Agro 288<sup>11</sup>, que estava em curso à data de início do programa de trabalhos desta tese, a maioria dos ensaios experimentais, em especial de fitomonitorização, tiveram lugar num pomar de actinidia localizado em S. Salvador de Briteiros, concelho de Guimarães, latitude de 41° 31' N, longitude de 8° 27' W, 147 m de altitude. Este pomar tem uma área total de cerca de 17 ha, em dois blocos contíguos conforme apresentado na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Fotografia do pomar actinidia localizado em S. Salvador de Briteiros, concelho de Guimarães (latitude 41° 31' N, longitude 8° 27' W, altitude 147 m), com indicação da zona onde decorreram as medições directas.

<sup>11</sup> Projecto AGRO nº 288, “Demonstração do uso de sensores e procedimentos experimentais para a determinação da quantidade e oportunidade de rega em Actinidia”, Medida 8, Acção 8.1 - Desenvolvimento Experimental e Demonstração (DE&D); parceiros do projecto: ISA-DER e Direcção Regional de Agricultura de Entre-Douro e Minho – Divisão de Viticultura e Fruticultura.

O clima da região é caracterizado no capítulo seguinte, em 5.1.1.

O pomar foi plantado em 1989, com a orientação NW – SE (no bloco onde decorreram as medições), com um compasso de plantação das fêmeas de 5 x 5 m e dos machos de 20 x 5 m (intercalados com as fêmeas de 20 em 20 metros nas linhas). O pomar, durante o período dos ensaios, estava conduzido em cruzeta de 3 fios a 1.8 m de altura (fêmeas), com os machos (polinizadores) a um nível superior num fio transversal de suporte a 2.4 m do solo (Figura 4.2), tendo sido posteriormente reconvertido para o sistema de pergola. As plantas instaladas são de *Actinidia deliciosa* cv. Hayward e os polinizadores são das cultivares *Matua* e *Tomuri*.



Figura 4.2 – Fotografias do aspecto do pomar de actinidia em S. Salvador de Briteiros, Guimarães.

O pomar tem instalado um sistema de rega por microaspersão sob o copado e um sistema de rega anti-geada por aspersão sobre o copado. O sistema de microaspersão tem um compasso dos emissores de 5 por 5 m, estando instalados na proximidade das plantas fêmeas. Os emissores (microaspersores) foram alterados no decurso do ensaio (decisão do proprietário do pomar) estando instalados até ao Inverno de 2004/2005 emissores com um débito de 120 l h<sup>-1</sup> e um raio de cobertura de 2 m (área regada de cerca de 12.5 m<sup>2</sup> por microaspersor). Na modificação do sistema foram instalados microaspersores com um débito de 40 l h<sup>-1</sup> e uma superfície regada de secção rectangular com uma área aproximada de 6 m<sup>2</sup> (3 x 2 m).

Para facilidade de referenciação dos trabalhos realizados neste local, definiu-se a grelha apresentada na Figura 4.3, que corresponde à zona identificada na Figura 4.1.

Os solos da parcela apresentam uma textura franco-arenosa. Segundo a carta de solos da região, esta mancha de solos é classificada, pela classificação de solos da FAO, como um Antrossolo cumúlico dístrico (ATcd.g) (DRAEM, 1995). Em Agosto de 2003, na zona onde decorreram as medições directas foram abertos dois perfis até à profundidade de 250 cm tendo-se observado o seguinte:

- Ap1 (0-50 cm) – pardo escuro, franco, com muitas raízes finas e médias, transição nítida;
- Ap2 (50-120 cm) – pardo, franco arenoso, poucas raízes finas, transição nítida;
- 2Ab (120-170 cm) – pardo avermelhado escuro, franco, algumas raízes finas (jovens) e algumas médias, transição gradual;
- 2Bwb (170-250) – pardo escuro, franco, sem observação de raízes.

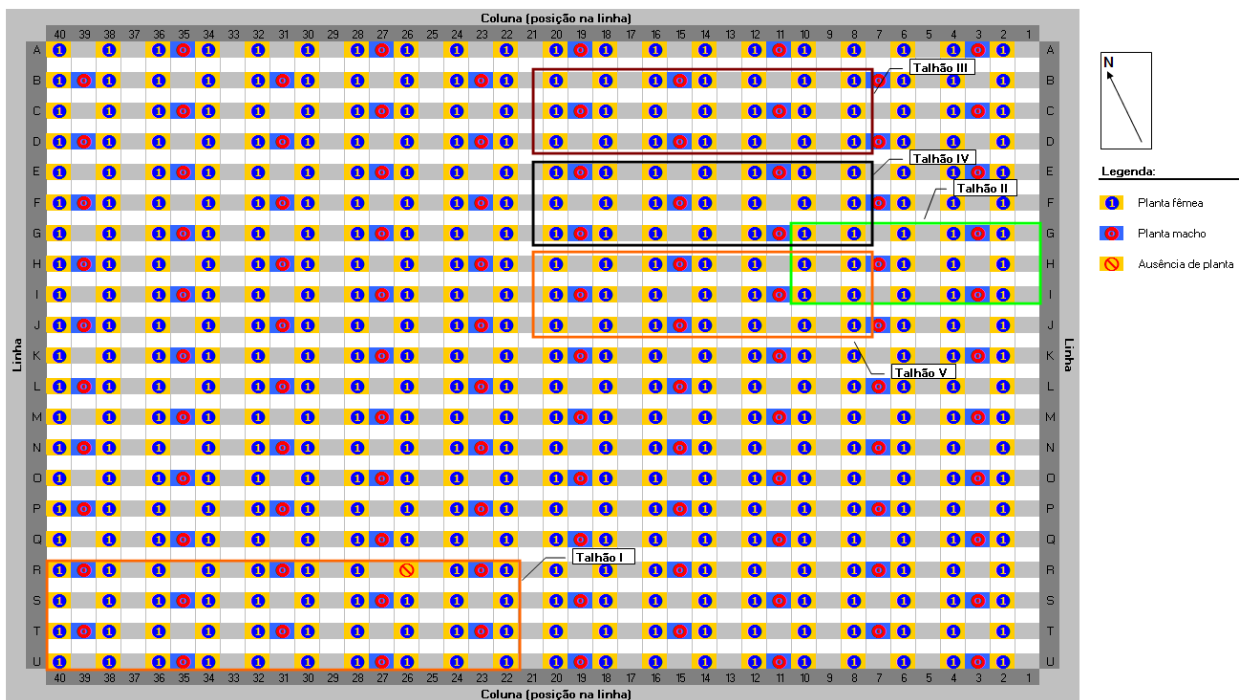


Figura 4.3 – Grelha usada para a referência das actividades e medições realizadas no interior do pomar de actinidia em S. Salvador de Briteiros, Guimarães.

#### 4.1.2 Lisímetro

Durante o ano de 2005 para aferir a calibração do método de medição de fluxo de seiva de *Granier*, com o objectivo de quantificar a transpiração, bem como facilitar a interpretação dos resultados dos métodos de determinação do estado hídrico do sistema solo-planta, desenvolveram-se alguns estudos num lisímetro de pesagem.

Apesar das limitações que os lisímetros apresentam, estes constituem uma ferramenta útil no estudo das relações hídricas das plantas, uma vez que se conhece com exactidão a variação do armazenamento hídrico do solo e permitem desta forma aceder com precisão ao consumo das plantas instaladas.

O lisímetro foi construído especificamente para estes ensaios, sendo composto por: quatro sapatas de betão para suporte; uma base também de betão para instalação da unidade de pesagem; duas peças metálicas (alavancas) para reduzir a carga sobre a unidade de pesagem; uma balança (máx. 150 kg, min 0.05 kg,  $d=0.001$  kg,  $e=0.01$  kg; multirange ID1 PlusMinus, Mettler Toledo GmbH, Suíça) e uma estrutura metálica de suporte para um contentor plástico de 0.525 m<sup>3</sup> (80 cm de profundidade, 85 cm de diâmetro na base e 97.5 cm de diâmetro no topo). A montagem deste dispositivo foi realizada junto a um pequeno pomar de actinidia da Quinta das Fontainhas, no concelho de Vila Verde, a uma latitude de 41° 36' N, longitude de 8° 28' W e altitude de 21 m, como apresentado nas fotografias da Figura 4.4.

Atendendo à capacidade máxima da unidade de pesagem disponível (150 kg) e à massa expectável do contentor (estrutura, contentor, solo, água e planta) o factor de redução do lisímetro no projecto para a sua construção foi de 6.3, pelo que a balança utilizada como unidade de registo permitiria ler uma carga máxima de 945 kg no lisímetro. Atendendo a este factor de escala, o erro associado à unidade de pesagem (balança) terá de ser multiplicado pelo mesmo factor. Terá ainda de ser majorado devido à utilização do sistema de alavancas que têm apoios com algum atrito, torção das peças de suporte e possíveis diferenças de comprimento entre os 6 braços que constituem o sistema de alavancas.



Figura 4.4 – Fotografias do lisímetro de pesagem instalado na Quintas das Fontainhas (latitude 41° 36' N, longitude 8° 28' W, altitude 21 m) com uma planta de *Actinidia deliciosa* cv. Hayward, com 8 anos.

No fundo do contentor foi colocado um tubo de drenagem de 50 mm de diâmetro, segundo o maior diâmetro, uma camada de gravilha com cerca de 4 cm de espessura e uma tela geotêxtil a cobrir a camada de gravilha. O tubo de drenagem estava ligado através de uma válvula ao orifício inferior visível na fotografia da direita da Figura 4.4. Deste modo, era possível abrir e fechar o sistema de drenagem consoante a necessidade de retirar o possível excesso de água do solo ou isolar o sistema para eliminar esta componente da equação do balanço hídrico do lisímetro – Eq. [4.1]. Para um determinado intervalo de tempo, considerou-se:

$$\Delta m = R + I - ET - DP \quad [4.1]$$

onde,

$\Delta m$  variação da massa no lisímetro (kg);

P quantidade de precipitação (kg);

I quantidade de rega aplicada (kg);

ET evapotranspiração, à superfície do lisímetro (evaporação) e na planta (transpiração) (kg);

DP fluxo de drenagem do lisímetro (kg).

No final de Março de 2005 foi transplantada para o contentor uma planta de *Actinidia deliciosa* cv. Hayward, com 8 anos, arrancada do pomar contíguo e colocada no contentor com um volume aproximado de terra de 0.45 m<sup>3</sup>. Na operação de transplantação escavou-se uma vala à

volta da planta, cortaram-se as raízes que excediam as dimensões do contentor, arrancou-se a planta e colocou-se no contentor. Nesta operação a raiz foi mantida com terra pelo que, depois de colocada no interior do contentor apenas foi necessário acrescentar alguma terra (do mesmo local) para preencher os espaços junto à parede do contentor. O pomar contíguo ao lisímetro, apesar de possuir algumas plantas mais jovens (como a utilizada no lisímetro) foi instalado em 1990, com um compasso de 6 m por 4 m (linha/entrelinha), com plantas *Actinidia deliciosa* cv. Hayward e polinizadores das cultivares Matua e Tomuri.

Devido às dificuldades de estimar a evaporação à superfície do lisímetro, optou-se por isolar toda a superfície do contentor com um material plástico (Figura 4.4). Sobre esta cobertura colocou-se uma placa de esferovite e uma rede de sombreamento para minimizar o aquecimento do contentor. Como o contentor não estava totalmente cheio com solo havia alguma reserva de ar à superfície (cerca de 0.05 m<sup>3</sup>), sendo o lisímetro regularmente aberto para permitir a renovação de ar e deste modo assegurar condições satisfatórias para o metabolismo da rizosfera.

## 4.2 Monitorização e medição

Neste ponto apresentam-se os diversos métodos de observação e a respectiva instrumentação de suporte. A descrição da sua aplicação prática é apresentada no ponto 4.4.

### 4.2.1 Estado hídrico do solo

Para a monitorização do estado hídrico do solo, utilizaram-se de acordo com os objectivos da medição, os sensores indicados na Tabela 4.1, para o teor de humidade ( $\theta_s$ ) e pressão efectiva de água no solo ( $h$ ).

Tabela 4.1 - Listagem dos sensores utilizados na monitorização do estado hídrico do solo.

Parâmetro	Sensor	Modelo	Fabricante
$\theta_s$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	ThetaProbe (FDR)	ML2x	DELTA-T Devices, Cambridge, U.K
$h$ (kPa)	Tensiómetro	30, 55, 80 e 100 cm	SDEC, França

A instalação das ThetaProbes obedeceu às instruções fornecidas pelo fabricante (manual do utilizador), utilizando-se sempre a instalação horizontal, à excepção das leituras pontuais realizadas à superfície do solo para a determinação da capacidade térmica mássica do solo (4.2.4.3), nas quais o sensor foi inserido na vertical.

A instalação e manutenção dos tensiómetros foram realizadas de acordo com as indicações gerais para o manuseamento deste tipo de sensores. No entanto, como alguns sensores foram instalados na zona de influência directa dos microaspersores foi colocado um plástico nas canas dos tensiómetros, como apresentado na Figura 4.5. Esta protecção tinha como finalidade impedir o

escoamento preferencial de água da pluviometria de rega ao longo da cana e desta forma reduzir a perturbação das observações pela rega.



Figura 4.5 – Fotografia da protecção plástica colocada nos tensiómetros para impedir o escoamento preferencial de água ao longo da cana dos sensores.

## 4.2.2 Estado hídrico da planta

### 4.2.2.1. Potencial hídrico

Como apresentado em 2.1, o potencial hídrico está fortemente apostado ao funcionamento hídrico das plantas e conseqüentemente à sua actividade metabólica. Desta forma, a medição do potencial hídrico da planta constitui um bom indicador do estado hídrico do sistema SPAC. O potencial hídrico varia ao longo do sistema SPAC e no tempo. Em cada instante e posição, o potencial apresenta um gradiente em função do fluxo verificado, das resistências impostas ao longo do percurso e do potencial hídrico do solo. Quanto à variação temporal, apresenta ciclos determinados pelo ciclo circadiano e sazonal. Por apresentar um ciclo de variação diária é preciso atender ao momento em que é realizada a medição para que os resultados sejam válidos e comparáveis. De acordo com a altura do dia e a forma como é realizada a medição este recebe diferentes designações: potencial hídrico de base ( $\Psi_{pd}$ , *predawn plant water potential*) se medido no período que antecede o nascer do dia em folhas não isoladas; potencial mínimo ( $\Psi_{md}$ , *midday plant water potential*) quando medido por volta do meio-dia solar em folhas não isoladas; potencial hídrico da folha ( $\Psi_l$ , *leaf water potential*) e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ , *stem water potential*) quando medido em qualquer altura do dia, em folhas não isoladas e isoladas previamente, respectivamente.

O potencial hídrico de base corresponde ao estado hídrico das plantas ao fim da noite (antes do nascer do sol) quando o fluxo de seiva é praticamente nulo ou mesmo nulo. Esta medição infere sobre o estado hídrico do solo na zona explorada pelas raízes, uma vez que, ao fim da noite, o estado hídrico da planta é frequentemente considerado em equilíbrio com o estado hídrico do solo explorado pelo sistema radicular (Katerji e Hallaire, 1984). Este pressuposto tem também suporte nos princípios base que regem os movimentos de água no sistema SPAC (vd. 2.1). Como o fluxo é reduzido ou nulo, a quebra de potencial hídrico no percurso solo-folha é mínimo ou nulo e deste modo o potencial medido é praticamente igual ao potencial hídrico do solo. No entanto, em certas condições de humedecimento heterogéneo do perfil do solo (Ameglio, 1992; Ameglio *et al.*, 1997) e em plantas com reservas hídricas internas apreciáveis, nomeadamente em árvores (Granier e Berger, 1987; Donovan *et al.*, 2001), o equilíbrio entre a planta e o solo pode não ser alcançado ao fim do período nocturno (Tardieu *et al.*, 1990). De igual forma, a agitação e o deficit hídrico da atmosfera (VPD) originam alguma transpiração nocturna sustentada pela energia armazenada, pelo que, a condição de fluxo nulo não se verifica e o potencial medido integra também o gradiente de potencial hídrico necessário para manter o fluxo no sistema (Donovan *et al.*, 2001; Donovan *et al.*, 2003). Em situações onde existe transferência de água no solo através do sistema radicular (*hydraulic lift*), foram observados desequilíbrios entre o potencial de base medido e o estado hídrico do solo (Donovan *et al.*, 2003). Apesar destas limitações,  $\Psi_{pd}$  continua a ser considerado um bom indicador do estado hídrico do solo na zona radicular e do estado hídrico das plantas.

O potencial foliar medido durante o dia e em particular, o potencial mínimo, medido próximo do meio-dia solar, reflecte a combinação de vários factores: procura evaporativa, particularmente em relação à folha medida resultado do seu microclima (VPD, radiação interceptada pela folha), disponibilidade de água do solo, condutividade hidráulica interna da planta e regulação estomática (Choné *et al.*, 2000). A diferença entre os valores extremos diários de potencial foliar ( $\Psi_{pd} - \Psi_{md}$ ) está bem correlacionado com as perdas de água e permite detectar situações de fecho estomático, relacionadas por exemplo, com défices hídricos (Damesin e Rambal, 1995).

O potencial hídrico do ramo é actualmente considerado por muitos autores um melhor indicador hídrico da planta do que o potencial hídrico da folha (Naor, 2000; Choné *et al.*, 2000), com a vantagem de apresentar menor variabilidade das medições da amostra (Naor, 2006) e de apresentar maior sensibilidade a situações de stress ligeiro (Choné *et al.*, 2000). O invólucro impermeável impede as trocas gasosas da folha e deste modo a folha isolada ao fim de alguns minutos cessa as trocas gasosas adquirindo o equilíbrio hídrico com o sistema vascular do ramo a que está ligada (Choné *et al.*, 2000). Contudo inconsistências de procedimento no isolamento das

folhas para medição e antecedência em relação à medição (Fulton *et al.*, 2001) bem como a taxa de variação de pressão na câmara (Naor e Peres, 2001), podem afectar a variabilidade das medições.

Atendendo ao gradiente de potencial hídrico no tronco, que pode ser superior a 0.2 MPa m<sup>-1</sup> em algumas circunstâncias (Garnier e Berger, 1986), as medições de potencial hídrico devem ser efectuadas sistematicamente na mesma posição no copado em relação ao sistema vascular da planta (Naor, 2006). O seguimento desta indicação é facilitado na medição do potencial hídrico do ramo, dado que as medições devem ser efectuadas em folhas de sombra, próximas do tronco.

Por se tratar, em qualquer uma das alternativas, de uma medição por amostragem é necessário realizar várias medições para captar a variabilidade da medição.

Nos estudos conduzidos, as medições do potencial hídrico foliar foram realizadas com uma câmara de pressão do tipo Scholander, de acordo com as recomendações para os diferentes tipos de observações. Para o isolamento das folhas para a medição do potencial hídrico do ramo utilizaram-se sacos plásticos com fecho rápido (*zip lock bags*) revestidos com um material reflector da radiação (capa de sobrevivência), como apresentado na Figura 4.6, com uma antecedência de 90 min. Desta forma, foi possível efectuar a operação de isolamento das folhas para observação num curto intervalo de tempo e de forma sistemática, reduzindo-se significativamente as possíveis diferenças entre medições devido a este factor.



Figura 4.6 – Fotografias dos sacos utilizados para o isolamento das folhas para a medição do potencial hídrico do ramo.

As medições foram realizadas na mesma posição no copado: nas plantas do pomar a cerca de metade do comprimento dos eixos principais (o tronco divide-se em dois eixos); no lisímetro a cerca de metade do comprimento do único eixo (prolongamento do tronco onde se inserem os ramos).

#### **4.2.2.2. Condutância estomática**

Como referido em 2.1.3, o fluxo de vapor de água entre a fonte (cavidade subestomática) e a camada turbulenta da atmosfera é determinado pela diferença de pressão parcial do vapor de água entre esses dois níveis e pelas resistências interpostas ao fluxo nesse percurso.

A condutância estomática está directamente relacionada com a fotossíntese, transpiração e estado hídrico da planta. Contudo, de acordo com Goldhamer (2003), a redução da abertura estomática apenas ocorre abaixo de determinado valor de stress hídrico da planta pelo que, este indicador é considerado menos sensível que o potencial hídrico para a gestão da rega. A resposta estomática depende da espécie vegetal, podendo-se identificar dois tipos: isohídrico e anisohídrico. As plantas com comportamento isohídrico tendem a manter o potencial hídrico da folha acima de determinado valor, restringindo a condutância estomática em situações de carência hídrica do solo e/ou procura evaporativa elevada. Este facto torna a utilização do potencial hídrico da folha um mau indicador do estado hídrico nestas plantas, sendo preferível a utilização do potencial hídrico de base ou do ramo (Choné et al., 2001).

A medição da condutância estomática ( $g_s$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) foi realizada com um porómetro de difusão (*steady state porometer*; LI-COR 1600M, Licor, Inc., Lincoln, EUA), com uma janela circular de  $2 \text{ cm}^2$  de abertura na câmara. A descrição do princípio de funcionamento deste equipamento pode-se encontrar no manual do aparelho fornecido pelo fabricante ou p. ex. em Campbell (1975). As leituras foram efectuadas na face abaxial de folhas totalmente desenvolvidas, bem expostas à radiação solar directa (procurando-se a orientação perpendicular à radiação incidente), com um tempo de estabilização de cerca de 10 s antes de realizar as leituras. A operação e manutenção do porómetro obedeceram às instruções fornecidas pelo fabricante no manual de utilização do equipamento. Juntamente com esta medição foi medida a transpiração ( $\text{mg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), a radiação fotossinteticamente activa (PAR,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), a humidade relativa do ar (%) e as temperaturas da folha ( $^{\circ}\text{C}$ ) e da cuvete ( $^{\circ}\text{C}$ ).

#### **4.2.2.3. Microdendrometria**

Neste estudo a variação do diâmetro de órgãos da planta foi usada com o intuito de aceder ao estado hídrico da planta, podendo também ser usada para registar o crescimento de órgãos (tronco, frutos, etc.). Em relação à utilização da câmara de pressão, para aceder ao estado hídrico da planta, a dendrometria tem a vantagem de fornecer uma medição contínua, automática e bastante sensível (Van Leeuwen *et al.*, 2001; Ton e Kopyt, 2004).

Como referido em 3.2.1.1, os valores tradicionalmente usados são o MxD, MnD e os índices MDS e OGR. A interpretação destes índices depende da evolução registada nos dias anteriores. É para fazer face a esta forte limitação do método que nesta tese foram realizados estudos com vista

a desenvolver um índice mais robusto e que se possa converter num valor quantitativo do estado hídrico da planta.

Segundo alguns autores MnD e MDS são os índices mais sensíveis e que fornecem melhores resultados apesar de serem influenciados pelas condições meteorológicas (Moreno *et al.*, 2006; Ortuño *et al.*, 2005a). O índice MDS constitui um bom indicador hídrico quando o solo não apresenta fortes restrições hídricas, situação na qual o sinal do índice estabiliza ou diminui (Ferreira *et al.* 1996), apresentando também a limitação de não ser aplicável a órgãos com rápido crescimento (Goldhamer e Fereres 2001; Ortuño *et al.*, 2004).

Os LVDTs (*linear variable displacement transducers*) são o tipo de sensor mais usado para a medição da variação da dimensão de órgãos em plantas. Atendendo a limitações financeiras, optou-se por adquirir sensores de uso industrial, indicados na Tabela 4.2. Esta solução é bastante comum neste tipo de medições, sendo no entanto necessário construir a estrutura de suporte para acoplar o sensor ao órgão a medir.

Tabela 4.2 – Lista de sensores usados em observações microdendrométricas.

Variável	Sensor	Modelo	Fabricante
D	LVDT	DF 2.5g	Solartron Metrology, Bognor Regis, UK

O ponto de instalação dos sensores na planta foi analisado, procedendo-se ao teste de várias soluções ao longo dos ensaios quanto ao ponto de medição mais sensível à variação do estado hídrico da planta (tronco e ramo) e quanto à estrutura de suporte do sensor (Figura 4.7).

Tradicionalmente estes sensores são aplicados no tronco das plantas, em princípio por razões de ordem prática, tais como a facilidade de fixação e protecção. No entanto, analisando o sistema SPAC constata-se que a maior variação de potencial hídrico ocorre na proximidade das folhas; os ramos jovens têm menos tecido lenhoso, pelo que deverão ser mais elásticos devendo reflectir melhor a variação de potencial hídrico da planta; a medição neste ponto terá também maior correspondência com o potencial hídrico do ramo; desta forma procedeu-se à análise da instalação do sensor sobre ramos.

Como a variação diária do diâmetro do tronco ou ramos é pequena, é preciso utilizar sensores de medição com boa resolução e precisão e reduzir os efeitos térmicos no sensor e na estrutura de suporte (Goldhamer, 2003).

Utilizaram-se duas estruturas de suporte diferentes (Figura 4.7) em resultado de observações experimentais que mostraram que a peça móvel interposta entre o LVDT e o tronco das plantas para facilitar a fixação do sensor à planta (Figura 4.7 a e c) retirava alguma sensibilidade e esporadicamente ficava bloqueada. Optou-se então pela instalação exibida na Figura 4.7 b e d. Além deste aspecto, na aplicação do sensor a ramos relativamente jovens de pequeno diâmetro e

ainda bastante herbáceos, a pressão exercida pelas duas molas laterais atenuava a variação registada pelo sensor.

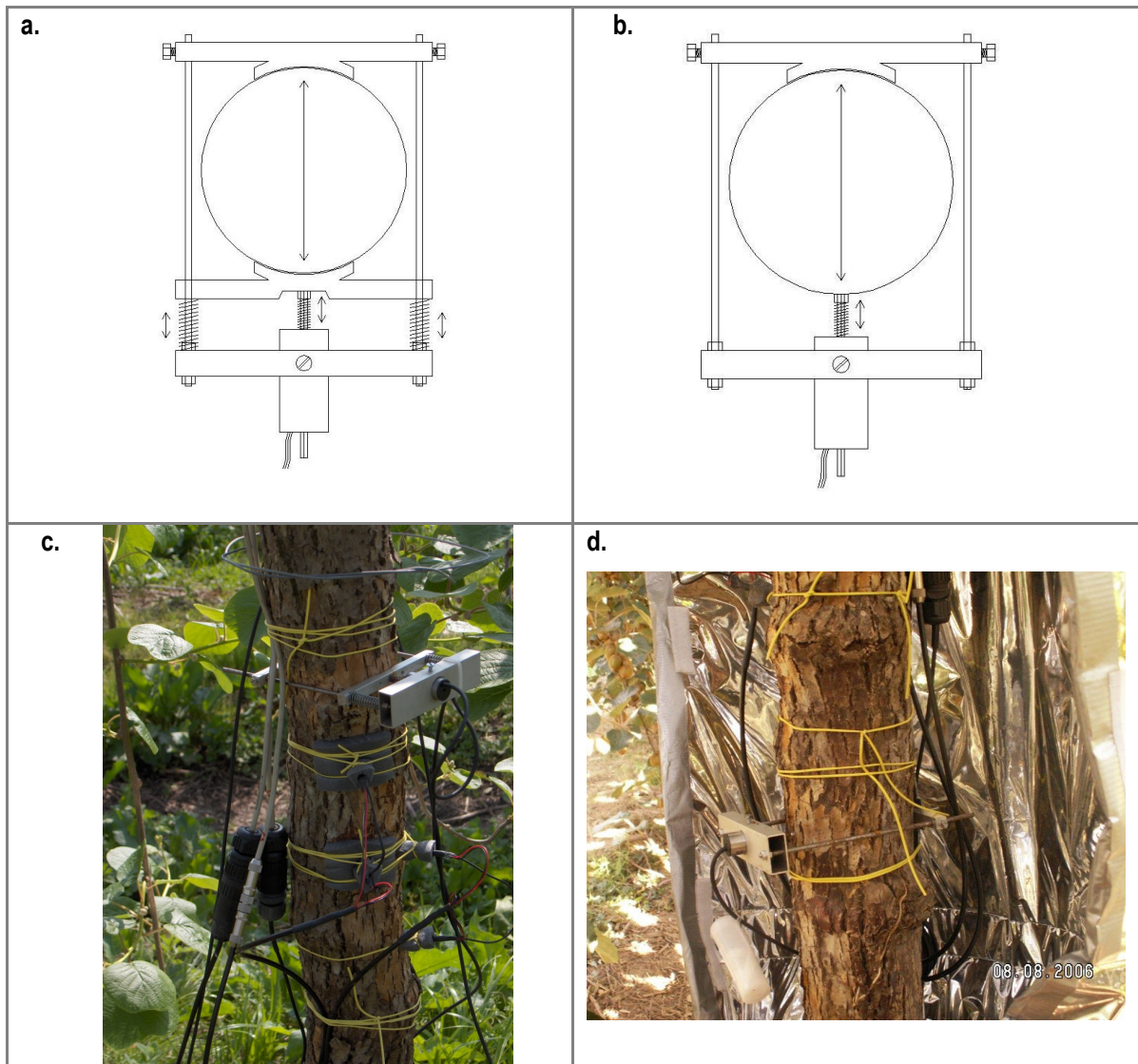


Figura 4.7 – Esquemas (a. e b.) e fotografias (c. e d.) dos suportes usados para fixação dos sensores: a. e c. suporte do tipo I, b. e d. suporte do tipo II.

Para minimizar o efeito térmico sobre a dilatação dos materiais do suporte (reduzida pela utilização de INVAR<sup>12</sup> nas peças longitudinais) os sensores foram isolados da radiação com material reflector e isolante (Figura 4.7d).

### 4.2.3 Fluxo de seiva

A medição do fluxo de seiva foi utilizada para quantificar a transpiração do coberto por integração das medições da densidade de fluxo de seiva pontuais. Havia também o intuito de testar a utilização desta medição para inferir o estado hídrico da planta, quer em relação às condições meteorológicas presentes, quer em conjugação com as medições microdendrométricas.

<sup>12</sup> Liga metálica de ferro com 36% de níquel apresentando um coeficiente de dilatação térmica inferior a  $1.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

O método de medição do fluxo de seiva utilizado neste trabalho foi o método de aquecimento constante e pontual, vulgarmente conhecido por “método de *Granier*”. Este é o método que envolve menor custo por árvore ou planta amostrada e permite portanto, maior intensidade de amostragem associada a maior representatividade da amostra. Este aspecto é particularmente relevante quando se pretendem obter estimativas de transpiração à escala do coberto (Diawara *et al.*, 1991).

▪ **Método de Granier:**

A descrição detalhada e o princípio de funcionamento do método podem-se encontrar em Granier (1985, 1987). O sistema de medição do fluxo de seiva no tronco consiste num sensor térmico composto por duas sondas cilíndricas de 2 mm de espessura e de comprimento variável (geralmente compreendido entre 10 e 20 mm). Estas sondas são inseridas radialmente no borne com uma distância entre elas na direcção do fluxo (vertical) suficiente para evitar que o aquecimento da sonda superior influencie a sonda de referência (sonda inferior). Para que as características do material lenhoso, nos dois locais de inserção das sondas, sejam o mais semelhante possível e para minimizar o efeito dos gradientes térmicos naturais (GTN) deve-se reduzir a distância. Simulações efectuadas com o método das diferenças finitas permitiram identificar uma influência do aquecimento na sonda de referência a uma distância inferior a 7.5 cm (Thomsen e Ferreira, 2003).

O método baseia-se numa relação (Eq. [4.2]) que contém parâmetros empíricos, validada para algumas espécies lenhosas florestais pelo autor do método (Granier, 1985). Esta equação relaciona a densidade de fluxo de seiva no ponto de medição com a diferença de temperatura verificada entre as duas sondas do sensor ( $\Delta T$ ).

$$\nu = 0.119 \cdot k^{1.231} \quad [4.2]$$

onde,

$\nu$  densidade de fluxo ( $\text{mm s}^{-1}$  ou  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^2$  de área de xilema  $\cdot \text{s}^{-1}$ );

$k$  índice de fluxo, determinado de acordo com a Eq. [4.3].

$$k = \frac{\Delta T_x - \Delta T}{\Delta T} \quad [4.3]$$

onde,

$\Delta T_x$  diferença de temperatura verificada em ausência de fluxo ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\Delta T$  diferença de temperatura regista pelo sensor ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Para obter o fluxo de seiva no ponto de medição,  $\nu$  é multiplicada pela área da secção condutora no ponto de medição, obtendo-se o fluxo ( $Q$ ,  $\text{mm}^3 \text{ s}^{-1}$ ). Para obter uma estimativa da transpiração do coberto é usual multiplicar  $\nu$  pela área da secção condutora por unidade de área de superfície de terreno ( $A_{sw}$ ), para obter a transpiração ( $T$ ,  $\text{mm s}^{-1}$  ou  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^2$  de área de terreno  $\cdot \text{s}^{-1}$ ).

Para além da verificação da calibração do método, para assegurar exactidão no fluxo medido, é necessário fazer uma boa amostragem ao povoamento. Com base nesta amostragem é possível tratar as séries de dados obtidas estatisticamente e eliminar “outliers”, determinar a transpiração do coberto (média das séries não rejeitadas nos testes estatísticos) e a precisão da estimativa.

Este método apesar de ser de aplicação expedita e económica, por se basear numa calibração empírica não verificada localmente (Granier, 1985), pode fornecer em alguns casos medições, que apesar de consistentes, subestimam significativamente o fluxo real. Alguns exemplos de subestimativas consideráveis foram reportados por: Lundblad *et al.* (2001) em *Picea abies* e *Pinus sylvestris*; Clearwater *et al.* (1999) em ensaios laboratoriais; Reis *et al.* (2006) em papaia (*Carica papaya* L.); Silvestre (2003) em vinha; e Paço (2003) em pessegueiros.

Recentemente surgiram algumas alterações ao método original. Ao nível do sensor, Lu (1997) apresentou uma construção que permite ligar dois ou mais sensores ao mesmo canal analógico de leitura, obtendo-se directamente o valor médio do sinal dos sensores. Lundblad *et al.* (2001) utilizou uma construção com 4 sondas, possibilitando o registo dos gradientes térmicos naturais (GTN) na zona de medição. Ao nível da calibração do método têm sido apresentadas várias variantes à equação original como forma de solucionar a subestimativa do método em certas condições de aplicação (Lundblad *et al.*, 2001; Reis *et al.*, 2006).

A análise física realizada por Tatarinov *et al.* (2005), usando a resolução numérica da equação da condução de calor com um sistema tridimensional cilíndrico, demonstrou que existe uma forte relação entre o fluxo de seiva e a temperatura dos tecidos em pontos na zona afectada pelo aquecimento do sensor ( $r^2 \geq 0.99$ ). Contudo, em comparação com os outros métodos térmicos de aquecimento constante, o método de Granier pelo menor volume aquecido revelou-se mais sensível a factores de incerteza (condutividade térmica dos tecidos, fluxo não homogéneo do perfil radial de seiva e GTN).

Neste estudo, nos ensaios realizados foram utilizados sensores de Granier com 10 e 20 mm de comprimento, conforme as especificações do método (Tabela 4.3). O comprimento dos sensores origina uma diferente integração do perfil radial da densidade do fluxo de seiva no ponto de medição, como confirmado por Silva (2002), nesta espécie lenhosa, com a aplicação de indicadores corantes. No entanto, ao longo dos ensaios houve necessidade de recorrer a sensores que foi possível recuperar de estudos anteriores e que tinham diferentes comprimentos.

Tabela 4.3 – Lista de sensores de Granier usados nos ensaios.

Variável	Sensor	Modelo	Fabricante
$\Delta T$	Granier	10 mm	UP GmbH (Alenhanha)
$\Delta T$	Granier	20 mm	UP GmbH (Alenhanha)
$\Delta T$	GTN		UP GmbH (Alenhanha)

Para minimizar os efeitos dos GTN, que alteram o regime térmico imposto pelo aquecimento do sensor, os sensores foram protegidos da radiação, conforme ilustrado na Figura 4.8.

Os sensores de medição dos GTN, referidos na Tabela 4.3, são constituídos por duas sondas iguais às dos sensores de Granier, com 10 ou 20 mm, nas quais não é aplicada potência de aquecimento, captando assim o gradiente térmico natural verificado no tronco. A sua utilização permite manter os sensores de Granier sempre com aquecimento, reduzindo desta forma as falhas de dados, ao mesmo tempo que permite avaliar o estado de isolamento térmico dos sensores de Granier activos, por estarem instalados nas mesmas condições.

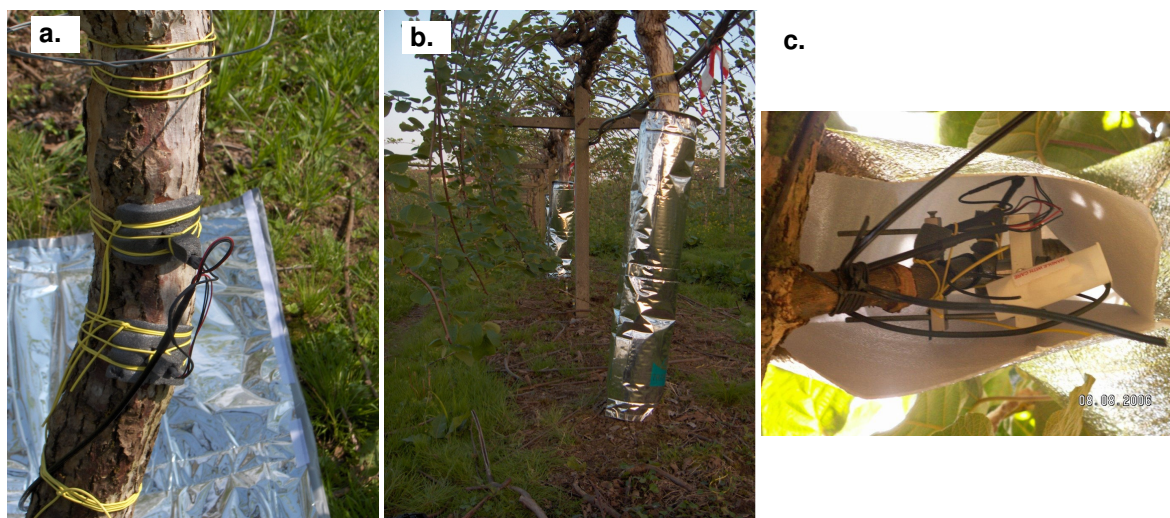


Figura 4.8 – Fotografias do isolamento dos sensores de Granier: a. isolamento térmico ao nível do sensor, b. isolamento exterior da radiação solar usado nos sensores do tronco, c. protecção usada para a radiação solar nos sensores instalados em ramos.

#### 4.2.4 Componentes do balanço de energia do coberto

Neste estudo a medição das componentes do balanço energético teve como objectivo principal a determinação da evapotranspiração do coberto que corresponde ao fluxo de calor latente. As restantes componentes do balanço simplificado ( $R_n$ ,  $H$  e  $G_{sfc}$ ) foram medidas com o propósito de verificar o fecho da equação do balanço de energia do coberto que é uma forma de aferir o funcionamento do método utilizado para medir LE.

##### 4.2.4.1. Medição de LE e H – método das flutuações instantâneas

###### ▪ Princípio de funcionamento do método

O método das flutuações instantâneas, aqui abreviado por EC (*Eddy Covariance*) é um método micrometeorológico que permite medir fluxos de calor, vapor de água,  $CO_2$  e outros gases (p. ex. metano). Este método baseia-se em princípios físicos sólidos e apresenta uma formulação matemática complexa, mas desde que garantidas certas condições na instalação, processamento

dos dados e realizadas as correcções necessárias, fornece bons resultados (Burba e Anderson, 2007).

O método mede os fluxos directamente por análise das propriedades dos pacotes de ar em fluxo turbulento (*eddies*) à medida que estes passam pelo nível de leitura (Oke, 1990). O método é válido para medições na região dos fluxos constantes da atmosfera, das variações instantâneas da entidade que se pretende medir (Campbell e Unsworth, 1979; Tanner, 1984). Quando observados os pressupostos teóricos do método permite determinar os fluxos que ocorrem numa superfície com base na correlação das flutuações da velocidade vertical do vento, com as flutuações na concentração da entidade transportada (calor sensível, vapor de água, CO<sub>2</sub>, etc.). As flutuações que ocorrem nas componentes escalares medidas correspondem ao fluxo turbulento de pacotes de ar. Como as variações de concentração, densidade ou temperatura são pequenas, os instrumentos de medição do vento e das entidades escalares deverão ser capazes de responder a flutuações de alta-frequência e com grande precisão. Os equipamentos de aquisição e processamentos de dados deverão amostrar as leituras dos sensores rápida e frequentemente para evitar a distorção do sinal e realizar médias sobre períodos suficientemente longos para captar todos os contributos para o fluxo da entidade medida, ou seja, os pacotes de menor frequência.

Ao aplicar o método é assumido que a densidade média do fluxo vertical é perpendicular às linhas de fluxo horizontal do vento. Deste modo, a velocidade média vertical do ar deverá ser nula. Na prática, podem verificar-se fluxos nesta componente vertical do vento devido ao mau alinhamento do sensor de medição do vento, declives do terreno e variações da densidade do ar.

#### ▪ **Condições de aplicação**

Para a validade deste método existe um conjunto de condições que devem ser observadas na sua aplicação: (1) as medições realizadas no ponto de medição representam uma área a barlavento dos sensores; (2) as medições têm de ser realizadas dentro da zona turbulenta de influência; (3) *fetch/footprint* são adequados (os fluxos são medidos apenas na área de interesse); (4) o fluxo é totalmente turbulento, a maioria da transferência vertical é feita por pacotes de ar; (5) o terreno é horizontal e uniforme, a média das flutuações verticais do vento é nula; (6) os sensores conseguem detectar variações muito pequenas e com alta-frequência (Burba e Anderson, 2007). Alguns destes pressupostos dependem de uma correcta selecção das condições de instalação mas alguns dependem largamente das condições da atmosfera.

As condições de instalação dependem da disponibilidade de uma área a medir homogénea, plana e suficientemente extensa, pelo menos na direcção dos ventos dominantes, para garantir que

os fluxos medidos no ponto de medição correspondem aos fluxos originados na superfície que se pretende medir.

A altura de instalação da instrumentação de medida depende das características da superfície (altura e rugosidade) e determina a área de influência dos fluxos medidos. A altura máxima de instalação é restringida pela distância (*fetch*), na direcção do vento, entre o ponto de medição e o limite da área a medir. Como regra geral, a altura de medição deve ser 100 vezes inferior ao *fetch* disponível. Contudo, durante períodos de estabilidade da atmosfera (baixa velocidade do vento e durante a noite) esta relação pode aumentar de 1:100 para 1:500 (Burba e Anderson, 2007). Pelo contrário, sensores instalados baixo de mais observam uma pequena área, podem não representar convenientemente a área e podem não registar a totalidade do espectro de transferência de pacotes de ar. A altura mínima recomendada obriga a que os sensores estejam instalados acima da sub-camada rugosa da superfície, idealmente ao dobro da altura do coberto e no caso de cobertos muito irregulares esta relação deve aumentar para 5 vezes a altura do coberto (Burba e Anderson, 2007).

A relação entre a altura de instalação dos sensores e a área da qual são provenientes os fluxos medidos é geralmente estudada através da análise de pegada (*footprint*) (Figura 4.9). Em termos gerais, a pegada é a área “vista” pelos instrumentos de medição colocados na torre de observações e a contribuição relativa dessa área em função da distância ao ponto de medição na direcção do vento (*fetch*).

Existem alguns métodos para avaliar a contribuição dos fluxos originados em função da distância ao ponto de medição, na direcção do vento. Para condições próximas da estabilidade da atmosfera, o método proposto por Schuepp *et al.* (1990) permite estimar a contribuição cumulativa normalizada dos fluxos medidos (CNF) através da Eq. [4.5].

$$CNF(x_L) = -\int_0^{x_L} \frac{U(z-d)}{u_* k x^2} e^{-\frac{U(z-d)}{u_* k x}} dx = e^{-\frac{U(z-d)}{u_* k x_L}} \quad [4.4]$$

onde,

*CNF* contribuição cumulativa normalizada do fluxo medido até à distância  $x_L$  (%);

$x_L$  distância ao ponto de medição (m);

$U$  velocidade média do vento ( $m\ s^{-1}$ );

$z$  altura de medição (m);

$u_*$  velocidade de atrito ( $m\ s^{-1}$ );

$d$  altura de deslocação do plano de referência (m);

$k$  constante de von Karman (0.4).

A pegada dos fluxos depende da altura de medição, rugosidade da superfície e da estabilidade térmica da atmosfera. O tamanho da pegada aumenta com o aumento da altura de

medição, com o decréscimo da rugosidade da superfície e com a alteração do perfil térmico da atmosfera de instável para estável.

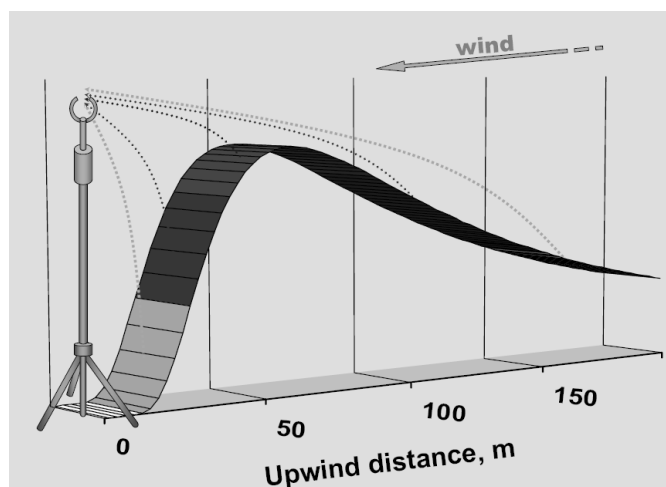


Figura 4.9 – Representação esquemática da proveniência dos fluxos medidos pelos sensores colocados na torre de observações no método das flutuações instantâneas, (extraído de Burba e Anderson, 2007).

#### ▪ Fontes de erro e correções

A avaliação da precisão do método de EC é complicada porque diversos factores contribuem para a introdução de erros nos dados. Há um conjunto de erros geralmente designados por erros de frequência de resposta. De acordo com Burba e Anderson (2007), estes incluem erros devido ao tempo de resposta da instrumentação usada, separação dos sensores, integração da medição escalar ao longo da distância entre as janelas de medição do sensor, perda dos fluxos de alta e baixa frequência, sincronismo dos sensores usados e amostragem digital. Em adição a estes erros, outras fontes de erro incluem picos e ruído no sinal dos sensores, nivelamento dos sensores, variação da densidade do ar, erros na medição do fluxo de calor sensível através da temperatura obtida pelo anemómetro sónico, sobreposição de bandas de absorção e erros de preenchimento de falhas (Burba e Anderson, 2007; Tabela 4.4).

#### ▪ Controlo da qualidade dos dados

A remoção de dados de má qualidade assegura que os resultados não apresentam desvios ou erros devido a causas evidentes ou comuns. De um modo geral, os dados são considerados de má qualidade devido às seguintes razões: mau funcionamento dos sensores, as condições ambientais não satisfazem os requisitos do método, os ventos não são da zona com pegada de interesse, ocorrência de fortes chuvadas. Para este processo os dados nocturnos são geralmente considerados separadamente. É necessária atenção especial nestes períodos devido à reduzida velocidade do vento usualmente verificada, estratificação da atmosfera e ausência de turbulência da atmosfera. Com estas condições, o fluxo pode tornar-se não estacionário e os processos de advecção, drenagem, fluxo convergente ou divergente podem tornar-se dominantes (Burba e

Anderson, 2007). A pegada pode também aumentar substancialmente devido às condições estáveis e integrar fluxos exteriores à zona de interesse.

Tabela 4.4 – Fontes de erro inerentes ao método micrometeorológico das flutuações instantâneas (Burba e Anderson, 2007).

Causas de erro	Fluxos afectados	Gama	Solução
Frequência de resposta	Todos	5-30 %	Correcções para a frequência de resposta
Sincronismo	Todos	5-15 %	Ajuste para os atrasos
Picos, ruído	Todos	0-15 %	Remoção de picos
Nivelamento	Todos	0-25 %	Rotação de coordenadas
Flutuações de densidade	H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	0-50 %	Correcção de Webb-Pearman-Leuning
Temperatura sónica	Calor sensível	0-10 %	Correcção da temperatura sónica
Oxigénio no percurso	H <sub>2</sub> O	0-10 %	Correcção para o oxigénio
Falhas de dados	Todos	0-20 %	Técnicas de preenchimento de falhas

Para além destes filtros, que permitem aumentar a segurança nos resultados obtidos, é possível aplicar a equação do balanço de energia do coberto para validar os fluxos medidos com o método de EC. Para tal, é necessário proceder à medição em simultâneo das restantes componentes do balanço de energia, R<sub>n</sub> e G. Aplicando a equação do balanço e se o erro de fecho do balanço for nulo ou diminuto, verifica-se a conservação de energia e ganha-se alguma garantia de que os fluxos de calor sensível e latente foram medidos correctamente.

- **Condições de instalação e instrumentação utilizada**

Para a instalação da instrumentação de medição (caso de estudo do pomar) foi colocada uma torre com 6 m de altura, na posição K15 da grelha de referenciação definida na Figura 4.3. Esta posição fornece um *fetch* de 150 a 350 m, dependendo do azimute de N a SSE, conforme representado na Figura 4.10.

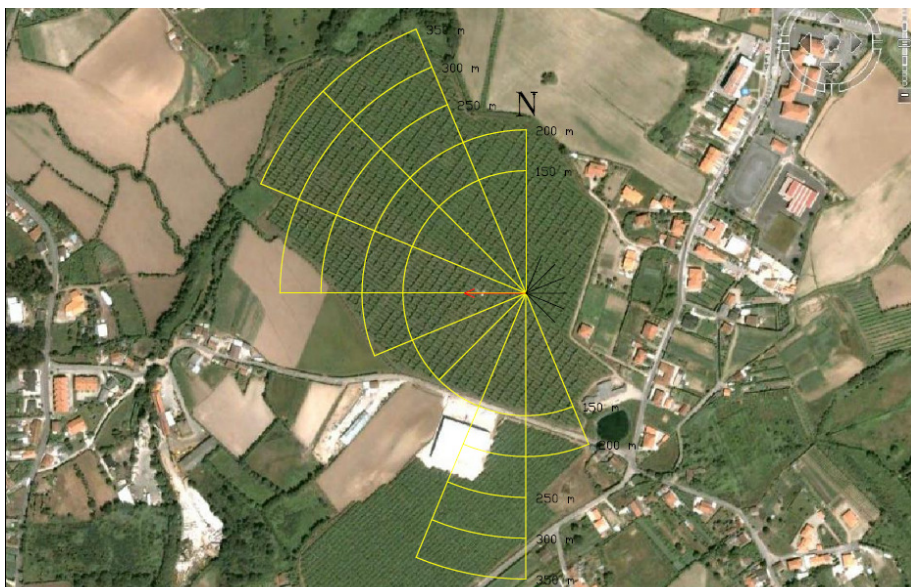


Figura 4.10- Localização da torre de observações micrometeorológicas no pomar de Briteiros com indicação do *fetch* nos azimutes considerados na validação dos dados.

A posição para instalação da torre foi seleccionada atendendo à direcção dos ventos dominantes, tendo-se posteriormente instalado os sensores direccionados para essa direcção (oeste). Desta forma, minimizou-se a interferência do corpo dos sensores nas medições.

Na Tabela 4.5 estão indicados os sensores usados nestas medições ao longo dos ensaios e na Figura 4.11 mostram-se fotografias da sua instalação no pomar.

Tabela 4.5 – Lista de sensores usados nas observações com o método das flutuações instantâneas.

Variável	Sensor	Modelo	Fabricante
$u_x, u_y, u_z$	Anemómetro sónico tridimensional	CSAT3	Campbell Scientific Inc, Logan, EUA
$\rho_v$	Higrómetro de Kripton	KH20	Campbell Scientific Inc, Logan, EUA
$\rho_v, \rho_{CO_2}, P_{atm}$	IRGA	LI-7500	LI-COR, Lincoln, EUA

Os sensores foram instalados a 6 m de altura, o que corresponde aproximadamente ao dobro da altura do estrato superior do coberto (as plantas polinizadores estão instaladas acima das restantes o que origina um coberto algo heterogéneo).



Figura 4.11 – Fotografias da instalação dos sensores do método das flutuações instantâneas na torre de observações micrometeorológicas, no pomar de Briteiros.

#### 4.2.4.2. Radiação líquida

A radiação líquida ( $R_n$ ) foi medida no topo da torre de observações micrometeorológicas a 6.5 m, a cerca de 2 m do eixo da torre, com o sensor orientado para sul para reduzir a interferência da torre no balanço de radiação. Os sensores usados ao longo dos ensaios estão indicados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Lista de sensores usados na medição da radiação líquida do coberto.

Variável	Sensor	Modelo	Fabricante
$R_n$	Pirradiómetro	S-1	Swissteco Instruments, Oberriet, Suíça
$R_n$	Pirradiómetro	Q7.1	Rebs, Seattle, EUA

#### 4.2.4.3. Fluxo de calor à superfície do solo

O fluxo de calor à superfície do solo é determinado através da medição do fluxo de calor a uma determinada profundidade no solo, ao qual se soma a variação de energia acumulada entre esse nível e a superfície, nível ao qual se pretende aplicar a Eq. [2.12]. Para o cálculo da variação

de armazenamento é necessário conhecer a capacidade térmica mássica do solo e a variação de temperatura do solo ocorrida no intervalo de tempo de integração. A capacidade térmica mássica ( $C_s$ ) do solo húmido é determinada pela Eq. [4.5].

$$C_s = \rho_b (C_d + \theta_m C_w) \quad [4.5]$$

onde,

$C_s$  capacidade térmica mássica do solo húmido ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$\rho_b$  massa volúmica aparente do solo ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$C_d$  capacidade térmica mássica do solo seco ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$\theta_m$  teor de água do solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ );

$C_w$  capacidade térmica mássica da água ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).

A variação do armazenamento térmico é calculada pela Eq. [4.6].

$$\Delta S = \frac{\Delta T_s C_s d}{t} \quad [4.6]$$

onde,

$\Delta S$  variação do armazenamento de calor acima do ponto de medição do fluxo ( $\text{W m}^{-2}$ );

$\Delta T_s$  variação da temperatura do solo ocorrida no intervalo  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$  ou  $\text{K}$ );

$C_s$  capacidade térmica mássica do solo (Eq. 4.5,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ );

$d$  profundidade de medição do fluxo de calor (m);

$t$  intervalo de tempo de integração (s).

O fluxo transposto para a superfície do solo é obtido pela aplicação da Eq. [4.7].

$$G_{sfc} = G_d + \Delta S \quad [4.7]$$

onde,

$G_{sfc}$  fluxo de calor à superfície do solo ( $\text{W m}^{-2}$ );

$G_d$  fluxo de calor medido à profundidade  $d$  ( $\text{W m}^{-2}$ );

$\Delta S$  variação do armazenamento térmico do solo entre a superfície e a profundidade  $d$  ( $\text{W m}^{-2}$ ).

Neste estudo para a medição do fluxo de calor à superfície do solo ( $G_{sfc}$ ) foram usadas as placas de medição de fluxo de calor indicadas na Tabela 4.7. Estes sensores foram instalados a 5 cm de profundidade com um termopar de cobre-constantan associado a cada placa a 2.5 cm de profundidade. Para determinar a variação do armazenamento térmico na camada de solo foi também necessário medir o teor de água presente no solo, como referido em 4.2.1.

Tabela 4.7 - Lista de sensores usados para quantificar o fluxo de calor à superfície do solo.

Variável	Sensor	Modelo	Fabricante
$G_d$	Placa de fluxo de calor HFT-3.1		Rebs, Seattle, EUA
$\theta_s (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$	ThetaProbe (FDR)	ML2x	DELTA-T Devices, Cambridge, U.K
T	Termopar cobre-cons	-	-

#### 4.2.5 Evapotranspiração do estrato inferior

Para a medição desta componente da evapotranspiração do coberto, usou-se um método lisimétrico com recurso a lisímetros de pequenas dimensões, designados por mini-lisímetros (ML). Estes lisímetros são constituídos por dois cilindros: o exterior é instalado no solo na posição onde se pretende medir o fluxo, com a face superior ao nível do terreno. Retira-se a totalidade do solo do seu interior para permitir a colocação do segundo cilindro; o cilindro interior é inserido no solo num local equivalente, face à geometria do copado, retirado cheio de solo (não perturbado), fechado na sua base para bloquear o fluxo de água nesta extremidade, determinada a sua massa e colocado no interior do cilindro exterior. O fluxo de água verificado (evaporação e transpiração) é determinado pela variação de massa ocorrida num determinado período de tempo (geralmente um dia).

Os ML usados neste estudo eram de PVC, com 0.12 m de altura e 0.15 m de diâmetro interno, o que corresponde a uma área de superfície de  $1.77 \times 10^{-2} \text{ m}^2$  (Figura 4.12).

Estes ML interrompem o fluxo de água no solo pelo que a sua utilização implica a substituição frequente do solo para que a dessecação não altere significativamente o perfil de humidade face às condições circundantes. Boast e Robertson (1982) analisaram o erro de medição de ML com 0.07 m de comprimento obtendo erros inferiores a  $0.5 \text{ mm dia}^{-1}$ , para fluxos de 2 a  $9 \text{ mm dia}^{-1}$ , com substituição do solo a cada 1 ou 2 dias, dependendo do estado inicial do solo, húmido ou seco, respectivamente. Neste estudo, por se terem utilizado ML com 0.12 m de comprimento, o erro associado a depleção de água no solo deverá ser menor.



Figura 4.12 - Fotografias da instalação dos mini-lisímetros no pomar.

### 4.3 Fontes de dados externas

#### 4.3.1 Climatologia

Neste tipo de estudos, o conhecimento do clima da região é de particular importância para antever o regime geral dos diferentes elementos climáticos (valores normais para a época do ano) e enquadrar os resultados obtidos em função do estado do tempo verificado.

Segundo a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) as series de dados meteorológicos para se efectuar uma caracterização climática deverão ter cerca de 30 anos de duração. A estação

de Braga/Posto Agrário é a estação que respeita esta condição e que está mais próxima dos dois locais experimentais, distando do local experimental da Quinta das Fontainhas (lisímetro) cerca de 8.0 km para SE e da Quinta das Picas (pomar) cerca de 7.5 km para NW (Figura 4.13). Devido à falta de dados de insolação nesta estação e a falhas pontuais noutras variáveis teve-se de recorrer a outras estações para a obtenção dos dados necessários. Na Tabela 4.8 apresentam-se as propriedades das estações consideradas e na Figura 4.13 a sua localização na região.

Tabela 4.8 – Estações meteorológicas da rede do Instituto de Meteorologia usadas na caracterização climática da região dos ensaios (vd. 5.1.1).

Nome	Latitude (N)	Longitude (W)	Altitude (m)
Braga/Posto Agrário	41° 33' N	8° 24' W	190
Cabril/S.Lourenço	41° 43' N	8° 01' W	585
Monção/Valina	42° 04' N	8° 23' W	80
Paços de Ferreira	41° 16' N	8° 23' W	320
Porto/S.Gens	41° 11' N	8° 39' W	90
Régua	41° 10' N	7° 48' W	65
Santo Tirso	41° 21' N	8° 28' W	60
Viana do Castelo	41° 42' N	8° 48' W	16

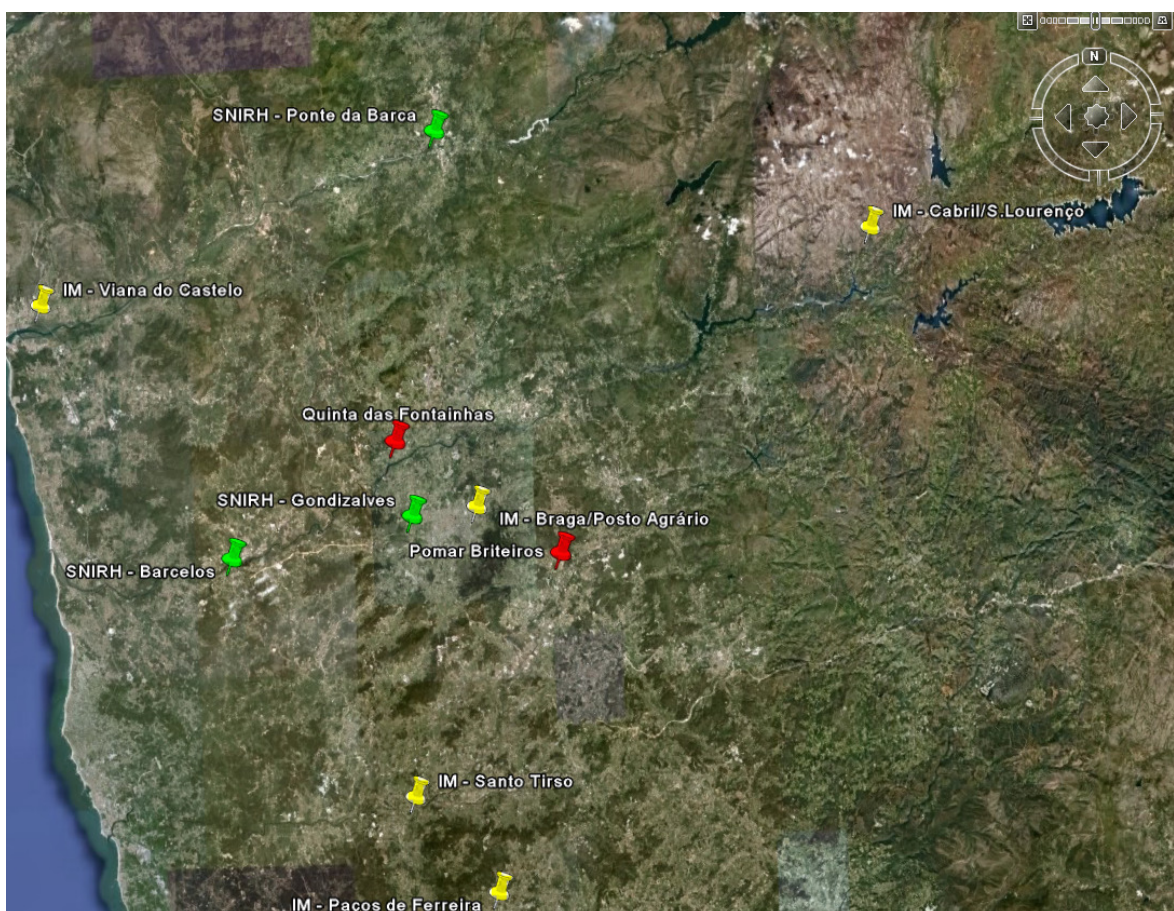


Figura 4.13 – Imagem de satélite da região do Entre Douro e Minho com a localização das principais estações meteorológicas usadas e dos locais experimentais (Google Earth).

### 4.3.2 Meteorologia

Neste estudo recorreu-se às observações das estações meteorológicas da rede do SNIRH<sup>13</sup>, por este organismo disponibilizar os dados horários das observações gratuitamente na sua página *web* e em tempo oportuno. Esta utilização foi facilitada por existir uma estação bastante próxima da considerada para efectuar a caracterização climática da região. A estação de Gondizalves dista cerca de 1.0 km da estação de Braga / Posto Agrário (IM). Na Tabela 4.9, apresenta-se a caracterização da estação de Gondizalves e das restantes estações da rede do SNIRH usadas para o preenchimento de falhas nos dados.

Estas estações da rede do SNIRH disponibilizam dados horários da temperatura média do ar, radiação solar média, humidade relativa média do ar, velocidade média e máxima do vento, direcção do vento (direcção mais frequente) e precipitação total. A velocidade do vento é medida a 2 m de altura do solo nas três estações utilizadas.

Tabela 4.9 - Localização das estações meteorológicas da rede do SNIRH usadas no estudo.

Nome	Latitude (°N)	Longitude (°W)	Altitude (m)
Barcelos	41° 32' N	8° 37' W	36
Gondizalves	41° 32' N	8° 27' W	90
Ponte da Barca	41° 48' N	8° 25' W	39

### 4.3.3 Previsões numéricas do estado do tempo

Como apresentado em 3.2.2, existem dois tipos de modelos em relação à escala de aplicação, modelos globais e locais. Apesar de existirem implementações de modelos locais sobre o território nacional não foi possível obter dados destes modelos. Sendo assim, apesar da melhor resolução horizontal que os modelos locais apresentam, face aos modelos globais, teve-se de recorrer a um modelo global.

Dos modelos globais mais difundidos (modelos do ECMWF e do NOAA/NCEP), os dados dos modelos do ECMWF são pagos (à excepção de alguns campos) pelo que se utilizaram os dados do modelo GFS do NOAA/NCEP, que são acessíveis gratuitamente<sup>14</sup>, apesar dos estudos comparativos demonstrarem um melhor desempenho dos modelos do centro Europeu.

A versão actual do modelo GFS (T382L64, introduzida em 31/05/2005), para a nossa latitude, tem uma resolução aproximada de 0.5 x 0.5 graus de latitude/longitude. No entanto, devido à elevada quantidade de dados gerados pelo modelo são arquivados numa resolução de 1.0 grau, equivalente a uma matriz com 70 km de lado. Como referido em 3.2.2.3 este modelo é executado diariamente às 0:00, 6:00, 12:00 e 18:00 UTC, sendo arquivadas as previsões até 180 horas de avanço, com um intervalo de 3 h.

<sup>13</sup> Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos, organismo do Instituto da Água (INAG, I.P.)

<sup>14</sup> <http://nomads.ncdc.noaa.gov/>

## 4.4 Dispositivos e protocolos experimentais utilizados

Apresentam-se as caracterizações dos dispositivos experimentais e protocolos de medição utilizados nos ensaios efectuados. Fez-se uma divisão em 4 pontos que correspondem a diferentes locais experimentais ou a alterações significativas no dispositivo experimental e objectivos. O delineamento experimental, o respectivo dispositivo experimental de suporte e os protocolos de medição, resultaram de várias etapas de desenvolvimento e experimentação que ocorreram ao longo do estudo.

### 4.4.1 Dispositivo I (pomar - 2003 a 2006)

Este dispositivo experimental, instalado no local experimental caracterizado em 4.1.1, resulta das actividades desenvolvidas no âmbito do projecto Agro 288.

Neste local instalou-se um conjunto de sensores para observação meteorológica que tinha também como objectivo verificar a representatividade, nas condições locais, dos dados recolhidos pelas estações da rede do SNIRH (vd. 5.1.2). Esta estação foi instalada sobre o copado, no interior do pomar, na posição S31 da grelha definida na Figura 4.3. Os sensores utilizados encontram-se na Tabela 4.10. Esta estação foi instalada em Abril de 2003 e esteve a funcionar até ao término dos ensaios no pomar, ainda que com algumas falhas de funcionamento, principalmente em relação à observação da humidade atmosférica. Para a aquisição, processamento e armazenamento de dados foi utilizado um SAD (Sistema de Aquisição de Dados; CR10X, Campbell Sci., Leicestershire, UK), programado para efectuar leituras em intervalos de 20 s e guardar as estatísticas descritivas em intervalos de 30 min e 24 h.

Durante o período de 2003 a 2005, o delineamento experimental foi definido principalmente em função dos objectivos do projecto Agro 288 que contemplavam a determinação das necessidades hídricas da actinidia e a definição de indicadores hídricos para a gestão da rega na cultura, para além de outros objectivos sem interesse para este estudo (formação, divulgação, etc.).

Tabela 4.10 – Lista de variáveis meteorológicas observadas e equipamentos de medição usados na estação meteorológica instalada no pomar de Briteiros (41° 31' N, 8° 27' W, 147 m).

Variável	Sensor	Modelo	Fabricante
Rs	Piranómetro	CM3b	Kipp & Zonen, Delft, Holanda
T <sub>a_dry</sub> , T <sub>a_wet</sub>	Psicrómetro	H301	Vector Instruments, Rhyl, U.K.
T <sub>a_dry</sub> , RH	Sensor capacitivo	SKH 2072	SKYE Instruments Ltd Llandrindod Wells, UK
u <sub>v</sub>	Anemómetro	A100R	Vector Instruments, Rhyl, U.K.
u <sub>d</sub>	Catavento	W200P	Vector Instruments, Rhyl, U.K.
R	Udómetro	-	-

Para determinar as necessidades hídricas da cultura pretendia-se utilizar o método de Granier (4.2.3) para quantificar a transpiração e estimar através de métodos complementares a evapotranspiração do estrato inferior e desta forma estimar a evapotranspiração cultural. Esta

metodologia permitiria, com um custo relativamente baixo, quantificar as necessidades hídricas da cultura ao longo de todo o ciclo, ainda que, com uma maior imprecisão durante a época das chuvas devido à maior importância da evapotranspiração do estrato inferior durante estes períodos e à maior dificuldade de estimativa em condições de humedecimento frequente e com um padrão de humedecimento do solo distinto do originado pelo sistema de rega.

Como estudos anteriores, desta e outras equipas, indicavam que o método de Granier subestima fortemente a transpiração em algumas culturas, pretendia-se fazer a verificação da calibração do método através de conjugação de técnicas. A forma encontrada constituiu na medição da evapotranspiração do coberto através do método das flutuações instantâneas e da evapotranspiração do estrato inferior com recurso a pequenos lisímetros de pesagem (ML). Deste modo, por diferença foi possível obter a transpiração do coberto, confrontando-se estes valores com os obtidos pela integração das medições do fluxo de seiva para o nível do coberto.

Para a realização destas actividades procedeu-se à instalação de dois grupos de sensores de Granier, talhões T-I e T-II identificados no esquema da Figura 4.3, constituindo dois blocos experimentais. A instalação de T-I tinha como principal objectivo a determinação das necessidades hídricas da cultura em condições de pleno conforto hídrico. O talhão T-II tinha como principal objectivo a submissão e observação das plantas em condições de carência hídrica e de forma a iniciar os estudos sobre o comportamento hídrico da actinidia e a definição de indicadores para a gestão da rega. Foram instalados os sensores indicados na Tabela 4.11, ligados a SADs (CR10, CR10X e 21X, Campbell Sci., Logan, EUA) com um intervalo de leitura de 20 s e registo da média aritmética simples de 30 min destes valores. O talhão T-I, para atender a alguma possível heterogeneidade do pomar foi instalado a montante da torre de observações micrometeorológicas na direcção do maior *fetch* das observações micrometeorológicas. O talhão T-II, como havia o intuito de submeter as plantas a stress hídrico, foi instalado a sotavento da torre de observações micrometeorológicas para não influenciar os fluxos medidos. Os sensores foram instalados de acordo com o descrito em 4.2.3 quanto à instalação na planta e isolamento térmico.

A medição das componentes do balanço de energia do coberto, conjuntamente com a medição do evapotranspiração do estrato inferior com recurso a ML, ao contrário das medições de fluxo de seiva, decorreu apenas durante curtos períodos de tempo. Em 2003 as medições decorreram de 5 a 25 de Agosto e em 2004 decorreram de 3 a 18 de Julho. Tal como descrito em 4.2.4, para a medição das componentes H e LE do balanço de energia do coberto recorreu-se ao método das flutuações instantâneas: em 2003 usaram-se dois sensores para a medição das flutuações da densidade de vapor de água na atmosfera (Kripton e LI-7500) e em 2004 apenas o Kripton. A aquisição e o processamento dos dados foram realizados em linha com um SAD CR23X

e CR10X (Campbell Sci., EUA) em 2003 e 2004, respectivamente; o programa utilizado foi o FLX103\_1.CSI, desenvolvido pela Campbell Sci. (em 2003 o programa foi alterado para funcionar com os dois sensores de medição das flutuações da concentração de vapor de água na atmosfera). A frequência de leitura utilizada foi de 10 Hz e 8 Hz em 2003 e 2004, respectivamente. As estatísticas finais do método foram determinadas em intervalos de 30 min.

Tabela 4.11 – Lista de sensores de Granier e GTN usados no Dispositivo Experimental I (pomar), durante o período de 2003 a 2006.

Localização		Sensor			Instalação			Orgão	Distância (cm)	Azimute
Talhão	Ref.	Tipo	Modelo	Série	Activa.	Desactiva.	Altura (cm)			
1	S38	Granier	10 mm	Gra_01	16-04-03	final	120	tronco	7.5	NW
1	S35	Granier	10 mm	Gra_02	16-04-03	30-06-04	130	tronco	7.5	NW
1	S34	Granier	10 mm	Gra_03	16-04-03	final	70	tronco	7.5	SW
1	S34	Granier	10 mm	Gra_04	16-04-03	30-06-04	130	tronco	7.5	NE
1	S32	Granier	20 mm	Gra_05	16-04-03	final	95	tronco	7.5	N
1	S32	Granier	10 mm	Gra_06	16-04-03	final	130	tronco	7.5	N
1	S30	Granier	10 mm	Gra_07	16-04-03	30-06-04	100	tronco	7.5	SE
1	S30	Granier	20 mm	Gra_08	16-04-03	30-06-04	150	tronco	7.5	NW
1	T30	Granier	10 mm	Gra_09	16-04-03	30-06-04	110	tronco	7.5	E
1	T28	Granier	10 mm	Gra_10	16-04-03	final	120	tronco	7.5	W
1	T26	Granier	20 mm	Gra_11	16-04-03	final	120	tronco	7.5	NE
1	T24	Granier	20 mm	Gra_12	16-04-03	final	120	tronco	7.5	SW
2	H8	Granier	10 mm	Gra_13	04-08-03	18-12-03	120	tronco	7.5	N
2	H7	Granier	10 mm	Gra_14	04-08-03	18-12-03	120	tronco	7.5	N
2	H6	Granier	20 mm	Gra_15	04-08-03	18-12-03	70	tronco	7.5	NW
2	H6	Granier	10 mm	Gra_16	04-08-03	18-12-03	140	tronco	7.5	NE
2	H4	Granier	20 mm	Gra_17	04-08-03	18-12-03	70	tronco	7.5	NE
2	H4	Granier	20 mm	Gra_18	04-08-03	18-12-03	140	tronco	7.5	NW
2	H2	Granier	10 mm	Gra_19	04-08-03	18-12-03	120	tronco	7.5	N
1	S30	Granier	10 mm	Gra_20	09-08-03	30-06-04	-	ramo	7.5	-
1	S32	GTN	10 mm	GTN_01	09-08-03	30-06-04	120	tronco	7.5	N
2	H2	GTN	10 mm	GTN_02	09-08-03	18-12-03	120	tronco	7.5	N
2	H4	Granier	10 mm	Gra_21	09-08-03	18-12-03	-	ramo	7.5	-
1	S36	Granier	20 mm	Gra_22	01-07-04	final	120	tronco	7.5	N
1	S34	Granier	10 mm	Gra_23	01-07-04	final	120	tronco	7.5	N
1	T26	Granier	10 mm	Gra_24	01-07-04	final	130	tronco	7.5	NW
1	T23	Granier	10 mm	Gra_25	01-07-04	final	120	tronco	7.5	N
1	S34	GTN	10 mm	GTN_03	01-07-04	final	90	tronco	7.5	N
1	T26	GTN	10 mm	GTN_04	01-07-04	final	100	tronco	7.5	S

Para a medição do fluxo de calor à superfície do solo, usaram-se 5 placas de fluxo de calor instaladas a 5 cm de profundidade, com um termopar associado a 2.5 cm de profundidade. Em 2003 este dispositivo foi instalado segundo uma diagonal entre as posições S30-S28; em 2004 instalou-se segundo uma diagonal entre as posições J18-L16. A medição da humidade do solo à superfície (junto às placas) foi realizada periodicamente (geralmente com uma frequência diária).

Para a medição da evapotranspiração do estrato inferior foram usados 8 ML, referidos em 4.2.5. Estes lisímetros foram instalados segundo uma malha regular, com 4 posições sob o copado (a uma distância inferior a 100 cm da linha) e 4 posições na entrelinha. Quer em 2003, quer em

2004, fez-se a instalação dos ML a montante da torre das flutuações instantâneas na direcção do maior *fetch*.

Para assegurar que os fluxos hídricos medidos no coberto correspondiam à situação de pleno conforto hídrico, houve necessidade de medir esporadicamente o estado hídrico das plantas (potencial hídrico e condutância estomática). Em 2003, durante o mês de Agosto a rega no talhão T-II foi interrompida com o propósito de submeter as plantas a um stress hídrico. Desta forma, durante este mês foram realizadas algumas medições do potencial hídrico (de base e mínimo) e da condutância estomática, realizando-se em alguns dias ciclos (cinéticas) de medição destes indicadores.

Em consequência dos resultados obtidos durante os anos de 2003 e 2004, nos quais a calibração do método de Granier para quantificação da transpiração da cultura não foi plenamente conseguida e para facilitar/acelerar o processo de desenvolvimento de um indicador do estado hídrico das plantas, de medição contínua e automatizável, foi decidido realizar ensaios num lisímetro durante o ano 2005 (vd. 4.4.2). No entanto, tirando partido do dispositivo já instalado neste local, optou-se por manter em funcionamento todo o dispositivo experimental relativo às medições extensivas (fluxo de seiva e meteorologia). Estas medições, concretamente as de fluxo de seiva, permitiriam mais tarde, estender as séries de dados relativas às necessidades hídricas da cultura e desta forma aumentar o histórico.

#### **4.4.2 Dispositivo II (lisímetro - 2005)**

Na sequência dos trabalhos realizados no pomar de Briteiros durante os anos de 2003 e 2004, houve necessidade de proceder à realização de estudos em condições mais controladas para permitir um estudo pormenorizado do comportamento dos sensores de Granier. A solução encontrada, por necessitar de menos instrumentação face à realização de estudos em campo, foi a construção de um lisímetro de pesagem. Este lisímetro permitiria em simultâneo o estudo e desenvolvimento de indicadores do estado hídrico da planta por facilitar a sujeição da planta instalada no contentor, em curtos intervalos de tempo, a diferentes estados hídricos devido ao menor volume de solo explorado pelo sistema radicular. Estes estudos decorreram durante o ano de 2005, em simultâneo com os realizados no pomar de Briteiros referidos em 4.4.1.

Os principais aspectos a explorar com este dispositivo experimental eram a verificação da calibração do método de Granier<sup>15</sup>, para estimativa da transpiração da actinidia e ensaio da utilização de medições microdendrométricas como indicador do estado hídrico da planta.

---

<sup>15</sup> Em 2003, também no âmbito do Projecto Agro 288, foi realizado um estudo em lisímetro com uma planta de Actinidia com 3 anos. No entanto, devido à curta duração deste estudo, na altura não foi possível a calibração do método.

Paralelamente pretendia-se analisar as causas das flutuações sazonais de  $\Delta T_m$  do método de Granier.

Para a realização dos objectivos definidos construiu-se o lisímetro de pesagem referido em 4.1.2 e transplantou-se uma planta de actinidia para o contentor do lisímetro. No solo e na planta instalaram-se os sensores indicados na Tabela 4.12. Como o lisímetro estava instalado na proximidade de um pomar de actinidia (vd. 4.1.2) instalaram-se alguns sensores numa planta desse pomar, que funcionaria como referência na interpretação dos resultados. Os sensores foram ligados a um SAD (CR10, Campbell Sci., EUA), realizadas leituras a cada 10 s e registadas as médias de 30 min de todas as séries de dados.

A primeira etapa a realizar foi a calibração do próprio lisímetro. Esta tarefa foi realizada no dia 1 de Agosto de 2005 e consistiu em colocar peças de massa conhecida sobre o contentor e registar o valor do sistema de pesagem do lisímetro. As peças colocadas foram pesadas na própria balança do lisímetro.

Tabela 4.12 - Lista de sensores instalados no Dispositivo Experimental II (lisímetro).

Lis/Pomar	Sensor		Instalação							
	Tipo	Modelo	Série	Activa.	Desactiva.	Altura (cm)	Orgão	Perímetro (cm)	Distância (cm)	Azimute
Lisímetro	Granier	10 mm	Gra_01	16-06-05	28-12-05	40	tronco	18.0	13.0	SW
Lisímetro	Granier	10 mm	Gra_02	16-06-05	28-12-05	130	tronco	17.1	13.0	NE
Lisímetro	Granier	10 mm	Gra_03	16-06-05	28-12-05	-	eixo	12.7	13.0	-
Lisímetro	GTN	10 mm	GTN_01	16-06-05	28-12-05	30	tronco	-	8.0	S
Lisímetro	GTN	10 mm	GTN_02	16-06-05	28-12-05	125	tronco	-	8.0	NW
Lisímetro	GTN	10 mm	GTN_03	16-06-05	28-12-05	-	eixo	-	8.0	-
Pomar	Granier	10 mm	Gra_04	26-06-05	28-12-05	120	tronco	32.0	13.0	NW
Pomar	GTN	10 mm	GTN_04	26-06-05	28-12-05	110	tronco	-	8.0	N
Lisímetro	LVDT	2.5g / l	Dia_01	16-06-05	28-12-05	40	tronco	18.0	13.0	-
Lisímetro	LVDT	2.5g / l	Dia_02	16-06-05	28-12-05	130	tronco	17.1	13.0	-
Lisímetro	LVDT	2.5g / l	Dia_03	02-08-05	28-12-05	-	eixo	12.7	13.0	-
Pomar	LVDT	2.5g / l	Dia_04	02-08-05	28-12-05	129	tronco	32.0	13.0	-
Lisímetro	Termopar	Cu-Co	Ts_01	16-06-05	28-12-05	-25	solo	-	-	-
Lisímetro	ThetaProbe	ML2x	Theta_01	16-06-05	28-12-05	-25	solo	-	-	-

Para testar a utilização das medições microdendrométricas para avaliar o estado hídrico das plantas era necessário usar métodos de referência. Fizeram-se medições do potencial hídrico (de base e do ramo) e da condutância estomática. Estas medições incidiram sobre a planta do lisímetro e sobre uma planta do pomar contíguo. Devido à necessidade de realizar medições sobre as mesmas plantas durante vários dias, a amostragem por medição do potencial hídrico foi reduzida, utilizando-se apenas 2 folhas/planta por medição.

Para averiguar a condição de existência de fluxo nulo durante a noite, condição necessária para a determinação de  $\Delta T_m$  no método de Granier, foi inicialmente previsto isolar com um plástico a copa da planta do lisímetro durante algumas noites e posteriormente analisar se essas noites correspondiam sistematicamente a valores mais elevados de  $\Delta T$ . No entanto, era pouco exequível ao final do dia realizar esta operação devido às dimensões da planta e aos danos que iria provocar.

Desta forma, a solução foi instalar um sistema de nebulização sobre a planta e ligar este sistema ao final do dia (21:00 - 1:00), durante curtos intervalos de tempo (5 min). Ao nebulizar a planta as folhas da planta ficavam com um filme de água, anulando-se desta forma a transpiração para promover a hidratação dos tecidos acima do ponto de medição do fluxo de seiva e garantir a condição de fluxo nulo ao final da noite. Este procedimento só foi aplicado após a recolha de dados para a calibração do método *de Granier*.

#### **4.4.3 Dispositivo III (pomar - 2006)**

Durante o período de 2003 a 2005 realizou-se a calibração do método de Granier para a quantificação da transpiração da actinidia (em campo e em lisímetro) e foi testada a utilização de medições microdendrométricas para a determinação do estado hídrico da planta (apenas em lisímetro). Como um dos objectivos principais do sistema em desenvolvimento era a determinação do estado hídrico da planta/cultura, era pertinente testar a utilização do dispositivo experimental desenvolvido em lisímetro em condições de campo. O lisímetro construído, pelo pequeno volume de solo e pelo corte de parte do sistema radicular da planta, quando da instalação no lisímetro, originou respostas evidentes à variação do estado hídrico, quer do solo, quer da atmosfera (poder evaporativo).

Atendendo à sequência de trabalhos já realizados, pretendia-se nesta altura testar a utilização de um dispositivo experimental piloto que permitisse monitorizar as necessidades hídricas da cultura (transpiração) e o seu estado hídrico em contínuo. A conjugação destas medições permitiria obter a fitomonitorização necessária para o posterior desenvolvimento e validação do sistema ISIS.

Para a prossecução dos objectivos definidos, atendendo à instrumentação disponível, foram definidos três talhões experimentais no pomar de Briteiros (4.1.1). Nestes talhões pretendia-se impor diferentes regimes hídricos às plantas através do controlo da rega. Os novos talhões definidos correspondem aos talhões T-III, T-IV e T-V, apresentados na grelha da Figura 4.3.

Atendendo às restrições materiais, as modalidades (talhões) foram realizadas sem repetição, com excepção de T-IV que se pode considerar nas mesmas condições de T-I. Este aspecto é comum em estudos com utilização deste tipo de instrumentação e nos quais se dá mais importância ao número de observações dentro da mesma modalidade para captar a variabilidade da amostra. De qualquer forma, o objectivo deste dispositivo era o estudo dos indicadores hídricos e não a realização dos típicos ensaios de rega com a variação da quantidade de água aplicada à cultura. Deste modo, a submissão das plantas a diferentes regimes hídricos tinha como principal finalidade o

estudo da sensibilidade dos indicadores a diferentes níveis de estado hídrico e o uso de água pelas plantas, nesses estados.

O delineamento experimental para os talhões T-III, T-IV e T-V contemplou a instalação de 5 sensores de Granier, 2 sensores para observação dos GTN e 2 LVDTs (Tabela 4.13). No entanto, ao longo do ensaio verificou-se que seria conveniente aumentar a amostragem por talhão das medições microdendrométricas para permitir a instalação de sensores também em ramos (estudo da localização dos sensores). Pela impossibilidade de dispor de mais sensores, fez-se a opção de desinstalar os LVDTs do talhão T-V e instala-los nos talhões T-III e T-IV, ficando estes talhões com três sensores cada.

Tabela 4.13 – Lista de sensores de Granier, GTN e LVDTs usados no Dispositivo Experimental III (pomar – 2006).

Localização		Sensor			Instalação					
Talhão	Ref.	Tipo	Modelo	Série	Activa.	Desactiva.	Altura (cm)	Orgão	Distância (cm)	Azimute
3	C10	Granier	20 mm	Gra_26	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
3	C12	Granier	20 mm	Gra_27	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
3	C14	Granier	20 mm	Gra_28	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
3	C16	Granier	20 mm	Gra_29	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
3	C14	GTN	10 mm	GTN_05	13-04-06	final	90	tronco	10.0	NE-NW
3	C16	GTN	10 mm	GTN_06	13-04-06	final	90	tronco	10.0	NE-NW
4	F10	Granier	20 mm	Gra_30	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
4	F12	Granier	20 mm	Gra_31	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
4	F14	Granier	20 mm	Gra_32	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
4	F16	Granier	20 mm	Gra_33	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
4	F10	GTN	10 mm	GTN_07	13-04-06	final	90	tronco	10.0	NE-NW
4	F12	GTN	10 mm	GTN_08	13-04-06	final	90	tronco	10.0	NE-NW
5	I10	Granier	20 mm	Gra_34	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
5	I12	Granier	20 mm	Gra_35	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
5	I14	Granier	20 mm	Gra_36	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
5	I16	Granier	20 mm	Gra_37	13-04-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
5	I14	GTN	20 mm	GTN_09	13-04-06	final	90	tronco	10.0	NE-NW
5	I16	GTN	20 mm	GTN_10	13-04-06	final	90	tronco	10.0	NE-NW
3	C14	LVDT	2.5g / l	Dia_01	18-04-06	24-07-06	110	tronco	-	-
4	F10	LVDT	2.5g / l	Dia_02	18-04-06	24-07-06	110	tronco	-	-
3	C16	LVDT	2.5g / l	Dia_03	14-06-06	27-07-06	110	tronco	-	-
4	F12	LVDT	2.5g / l	Dia_04	14-06-06	27-07-06	110	tronco	-	-
5	I14	LVDT	2.5g / l	Dia_05	14-06-06	04-07-06	110	tronco	-	-
5	I16	LVDT	2.5g / l	Dia_06	14-06-06	04-07-06	110	tronco	-	-
3	D12	LVDT	2.5g / l	Dia_07	05-07-06	26-07-06	110	tronco	-	-
4	E12	LVDT	2.5g / l	Dia_08	05-07-06	26-07-06	110	tronco	-	-
3	C14	LVDT	2.5g / l	Dia_09	24-07-06	26-07-06	-	ramo	-	-
4	F10	LVDT	2.5g / l	Dia_10	24-07-06	26-07-06	-	ramo	-	-
3	D12	Granier	10 mm	Gra_38	26-07-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
3	D12	Granier	10 mm	Gra_39	26-07-06	final	-	ramo	10.0	-
3	C14	LVDT	2.5g / l	Dia_11	26-07-06	01-08-06	110	tronco	-	-
3	D12	LVDT	2.5g / l	Dia_12	26-07-06	final	-	ramo	-	-
4	E12	Granier	10 mm	Gra_40	26-07-06	final	100	tronco	10.0	NE-NW
4	E12	Granier	10 mm	Gra_41	26-07-06	final	-	ramo	10.0	-
4	F10	LVDT	2.5g / l	Dia_13	26-07-06	final	110	tronco	-	-
4	E12	LVDT	2.5g / l	Dia_14	26-07-06	final	-	ramo	-	-
3	C16	LVDT	2.5g / l	Dia_15	27-07-06	final	110	tronco	-	-
4	F12	LVDT	2.5g / l	Dia_16	27-07-06	01-08-06	110	tronco	-	-
3	C14	LVDT	2.5g / l	Dia_17	01-08-06	final	-	ramo	-	-
4	F12	LVDT	2.5g / l	Dia_18	01-08-06	final	-	ramo	-	-

Atendendo ao objectivo fundamental dos ensaios nesta fase, era necessário, tal como foi realizado durante o ano 2005 no lisímetro, monitorizar o estado hídrico das plantas através dos

métodos de referência: potencial hídrico e condutância estomática. Deste modo, durante o período correspondente à submissão das plantas a regimes hídricos diferenciados, observou-se o estado hídrico das plantas através dos métodos de referência. Com base nos resultados anteriores em lisímetro (ano 2005), não se fez a medição do potencial hídrico de base usando-se extensivamente as medições ao longo do dia do potencial hídrico do ramo e da condutância estomática. Neste caso, a amostragem realizada foi de 5 folhas para a medição do potencial hídrico do ramo e de 6 para a medição da condutância estomática, por observação.

Como forma de caracterizar os regimes hídricos a que as plantas estiveram submetidas ao longo do ciclo cultural, observaram-se as dotações de rega fornecidas a cada um dos talhões, a pressão efectiva da água no solo em alguns pontos nos talhões T-III, T-IV e T-V e o teor de água do solo em dois pontos de T-III (Figura 4.14), para além da precipitação. Os sensores foram colocados ao longo das linhas, com os sensores a menor profundidade mais próximos das plantas e os restantes distribuídos com um espaçamento regular, ficando o sensor de 100 cm a meia distância entre duas plantas na linha, como mostrado na Figura 4.5.

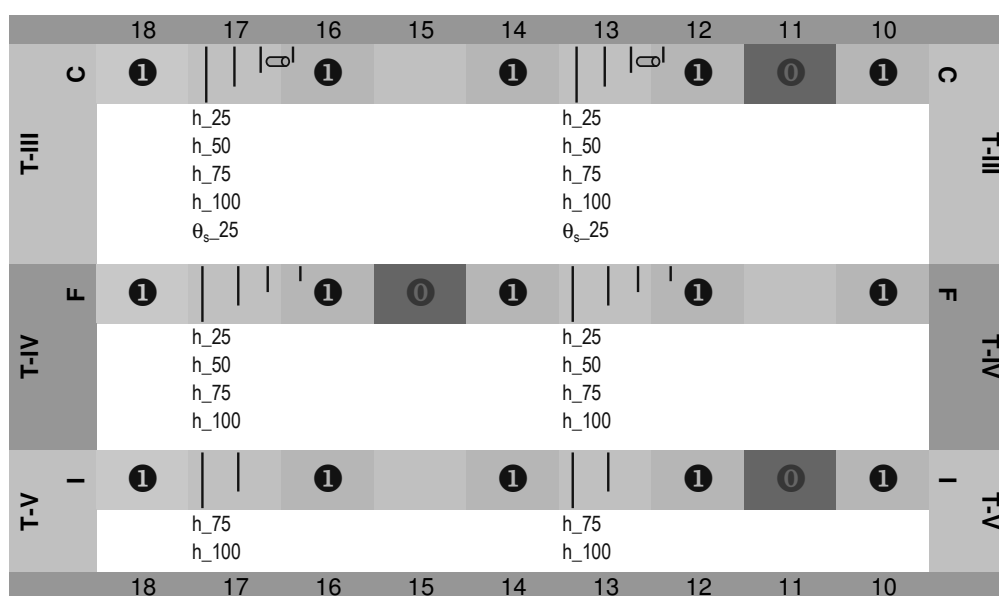


Figura 4.14 – Sensores instalados para a monitorização do estado hídrico do solo: h\_25, h\_50, h\_75 e h\_100 pressão efectiva de água no solo medida com tensiómetros a 25, 50, 75 e 100 cm, respectivamente; θs\_25 teor de água no solo medido com ThetaProbes a 25 cm.

Tirando partido dos diferentes regimes hídricos impostos à cultura durante este ensaio, procedeu-se à medição do crescimento dos frutos. Desta forma, aproveitou-se este estudo também para avaliar o impacto do estado hídrico no crescimento dos frutos nos três talhões.

Para completar o estudo da calibração do método de Granier em condições de campo, nomeadamente a verificação da calibração do método em períodos de baixo fluxo, fez-se novamente a medição das componentes do balanço de energia do coberto, conjuntamente com a medição do evapotranspiração do estrato inferior com recurso a ML, de 6 a 24 de Novembro de

2006. Para aplicação do método de EC foi utilizado o mesmo equipamento que em 2004 (vd. 4.4.1) e a mesma configuração do SAD. A medição do fluxo de calor à superfície do solo ( $G_{sfc}$ ) e de  $E_{Tei}$ , com recurso a ML, foram realizadas seguindo a mesma metodologia que em 2003 e 2004, com a medição de  $G_{sfc}$  realizada na diagonal K16-K18.



## CAPÍTULO 5

### TRATAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS



#### SUMÁRIO

Começa-se por apresentar a análise da normal climatológica da região e o resumo climático do tempo verificado ao longo do período de ensaios. Na parte central são apresentados e analisados os principais resultados obtidos em cada um dos dispositivos experimentais e que objectivaram o desenvolvimento e validação de fitomonitores da actividade da planta, nomeadamente a quantificação da transpiração e do estado hídrico. Deu-se particular importância à calibração do método de Granier e ao desenvolvimento e validação de um indicador hídrico de medição automática e contínua, baseado em observações microdendrométricas. No último ponto são analisadas as PNT por comparação com os dados meteorológicos observados na região e a qualidade da previsão de ETo com base nestas previsões do estado do tempo.

#### 5.1 ANÁLISE CLIMATOLÓGICA

- 5.1.1 Caracterização climática da região
- 5.1.2 Resumo climático dos anos de 2003 a 2006

#### 5.2 DISPOSITIVO II (LISÍMETRO - 2005)

- 5.2.1 Calibração do sistema de pesagem
- 5.2.2 Balanço hídrico
- 5.2.3 Transpiração – método de Granier
- 5.2.4 Condutância estomática e potencial hídrico da planta
- 5.2.5 Microdendrometria para a determinação do estado hídrico da planta

#### 5.3 DISPOSITIVO I (POMAR - 2003 A 2006)

- 5.3.1 Observação do estado hídrico das plantas
- 5.3.2 Balanço energético do coberto
- 5.3.3 Método de Granier para a quantificação da transpiração
- 5.3.4 Componentes do balanço hídrico do coberto

#### 5.4 DISPOSITIVO III (POMAR - 2006)

- 5.4.1 Regime e estado hídrico do solo
- 5.4.2 Estado hídrico da planta
- 5.4.3 Medições do fluxo de seiva
- 5.4.4 Microdendrometria para a determinação do estado hídrico da planta
- 5.4.5 Crescimento dos frutos

#### 5.5 PREVISÃO NUMÉRICA DO ESTADO DO TEMPO

- 5.5.1 Avaliação dos nós da grelha sobre a região dos ensaios
- 5.5.2 Avaliação da previsão das variáveis meteorológicas
- 5.5.3 Previsão da evapotranspiração de referência

## 5 TRATAMENTO DOS DADOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 Análise climatológica

#### 5.1.1 Caracterização climática da região

##### ▪ Resumo climático

Como apresentado em 4.3.1, a região onde decorreram os trabalhos experimentais foi caracterizada com base nos dados climáticos da estação de Braga/Posto Agrário, do período de 1958 a 1988 (31 anos). Na Tabela 5.1 apresenta-se um resumo climático das principais variáveis meteorológicas. Como referido, esta estação não disponibiliza dados de insolação, pelo que os dados apresentados foram estimados com base nos dados das estações de Monção/Valina, Santo Tirso e Viana do Castelo (Anexo III).

Tabela 5.1 – Resumo climático da região (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988; à excepto da insolação – Anexo III).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
T <sub>a<sub>n</sub></sub> °C	4.6	5.1	5.9	7.1	9.2	11.6	13.5	12.7	12.2	9.7	6.5	4.7	<b>8.6</b>
T <sub>a<sub>m</sub></sub> °C	8.8	9.4	10.8	12.4	14.7	18.3	20.1	19.9	18.7	15.4	11.4	9.1	<b>14.1</b>
T <sub>a<sub>x</sub></sub> °C	13.1	13.9	15.4	17.7	20.3	24.4	26.9	27.1	24.9	21.0	16.3	13.5	<b>19.5</b>
u <sub>v2</sub> m s <sup>-1</sup>	1.2	1.3	1.3	1.2	1.0	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.8	1.0	<b>0.9</b>
RH %	86.8	83.8	78.5	76.4	74.2	73.8	74.3	76.0	80.6	84.0	86.5	87.4	<b>80.2</b>
P mm	217.0	207.6	153.7	119.1	102.7	68.1	20.7	27.4	80.0	145.1	166.6	214.9	<b>1523</b>
R01 d	15.3	13.6	13.5	11.1	10.6	6.8	3.6	3.8	6.9	9.7	12.1	13.4	<b>120</b>
R10 d	8.4	7.9	6.1	5.0	4.4	2.7	1.1	1.0	3.0	5.2	6.0	8.6	<b>59</b>
In h	110.6	121.6	167.7	206.1	239.4	262.5	303.6	292.5	211.6	174.5	130.6	110.5	<b>2331</b>

T<sub>a<sub>n</sub></sub>, T<sub>a<sub>m</sub></sub>, T<sub>a<sub>x</sub></sub> – médias das temperaturas do ar mínima, média e máxima diária, respectivamente; u<sub>v2</sub> - velocidade média do vento reportada a 2 m de altura; RH – humidade relativa média do ar; P – precipitação total; R01 e R10 – número de dias com precipitação total diária superior a 1 e 10 mm, respectivamente; In – horas de insolação solar.

As Figura 5.1 e 5.2 fornecem alguma informação gráfica sobre o clima desta região (cruzamento de variáveis). Os gráficos evidenciam uma sazonalidade climática da região com uma estação relativamente quente e moderadamente seca por oposição a uma estação fria e chuvosa.

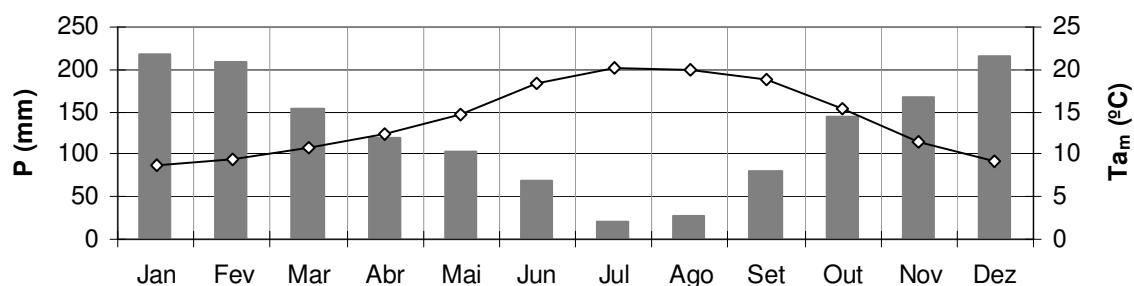


Figura 5.1 – Diagrama ombrotérmico da estação meteorológica de Braga/Posto Agrário: linha, temperatura média do ar; colunas, valores médios mensais de precipitação (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988). Nota: as escalas da precipitação e da temperatura não respeitam a relação 2:1 do diagrama ombrotérmico de Gausсен.

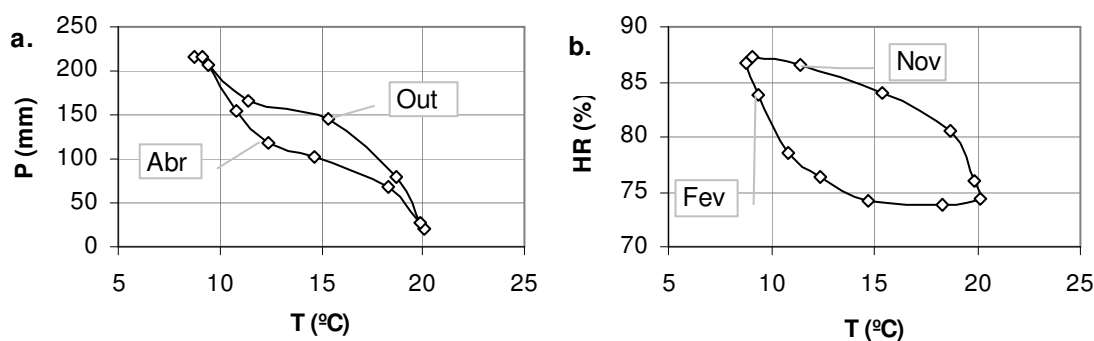


Figura 5.2 – Cruzamento de variáveis meteorológicas: a. relação entre a temperatura média mensal do ar e a precipitação total mensal; b. relação entre a temperatura média mensal e a humidade relativa do ar média mensal (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988).

#### ▪ Evapotranspiração de referência e balanço hídrico

Com base nos dados mensais da estação meteorológica de Braga/Posto Agrário determinou-se a ETo pelo método de Penman-Monteith (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Valores médios mensais de ETo do período de 1958 a 1988 (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Ano
ETo mm d <sup>-1</sup>	0.9	1.4	2.1	2.8	3.5	4.0	4.2	3.8	2.7	1.8	1.1	0.8	<b>2.4</b>
ETo mm mês <sup>-1</sup>	29	39	65	85	107	121	132	119	80	54	32	26	<b>889</b>

#### ▪ Balanço hídrico pelo método de Thornthwaite-Mather

O balanço hídrico de Thornthwaite-Mather é geralmente associado à caracterização climática de uma região, uma vez que fornece uma boa indicação do regime hídrico do meio. Neste estudo elaborou-se o balanço considerando um armazenamento de água no solo de 100 mm e os valores de ETo e precipitação apresentados neste ponto, anteriormente. Este balanço permite ter uma percepção geral acerca da variação de água no solo ao longo do ano em condições normais. O balanço de Thornthwaite-Mather assume que a taxa de perda de água é directamente proporcional ao estado do armazenamento de água no solo ( $A=U \exp(-L/U)$ ), em que  $U$  é o armazenamento máximo de água no solo (neste caso de 100 mm) e  $L$  é a perda potencial acumulada de água do solo. Na Figura 5.3 apresenta-se graficamente o balanço. Nesta região, apenas durante os meses de Julho e Agosto ocorre uma restrição significativa à evapotranspiração, em condições naturais. A Figura 5.4 evidencia o excesso de precipitação de Novembro a Março. Fica também visível que nos meses de Maio e Setembro, em média, os valores de precipitação tendem a estar balanceados com a procura evaporativa da atmosfera e em Outubro o excesso de precipitação é geralmente usado na reposição da reserva hídrica do solo.

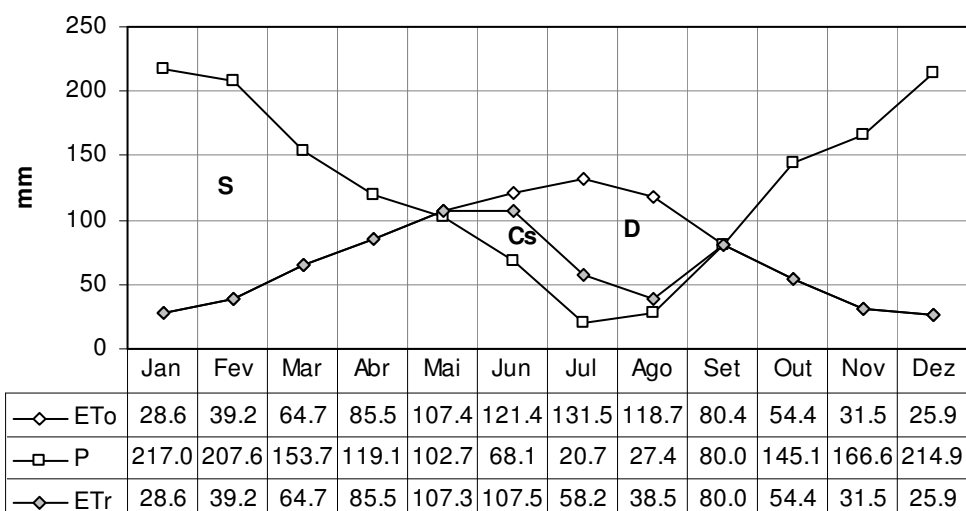


Figura 5.3 – Balanço hídrico de Thornthwaite-Mather (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988).

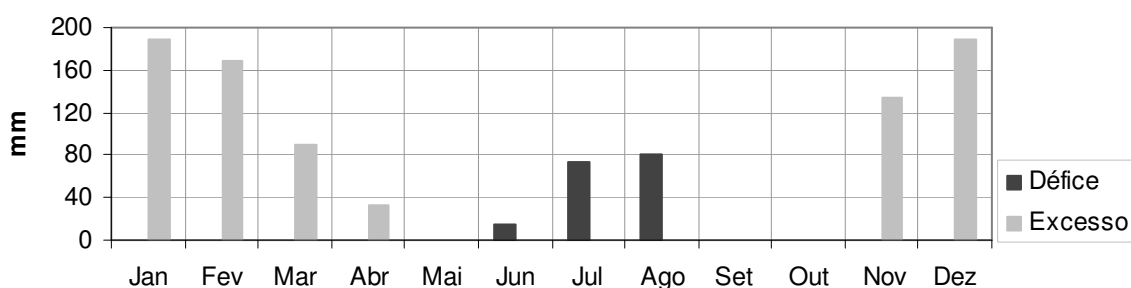


Figura 5.4 - Períodos com excesso ou carência hídrica do Balanço hídrico de Thornthwaite-Mather (normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário: 1958 a 1988).

▪ **Classificação**

Segundo a classificação climática de Köppen esta região apresenta um clima temperado (mesotérmico) húmido, com estação seca no Verão e com Verão quente (Csb).

De acordo com a classificação climática de Thornthwaite é um clima húmido mesotérmico, com moderada deficiência de água no Verão (B<sub>3</sub>B<sub>3</sub>'sa').

**5.1.2 Resumo climático dos anos de 2003 a 2006**

Neste ponto faz-se uma breve análise das condições meteorológicas verificadas durante a realização dos ensaios experimentais. Para sintetizar e facilitar a apresentação da informação utilizou-se a escala mensal, apesar de se perder alguma resolução. Tirando partido da informação sintetizada pelas normais climatológicas da região, nos gráficos seguintes (Figura 5.5) é possível observar os valores mensais das principais variáveis meteorológicas no período 2003 a 2006 e enquadramento em relação à normal. Os dados foram observados na estação meteorológica de Gondizalves, como referido em 4.3.2.

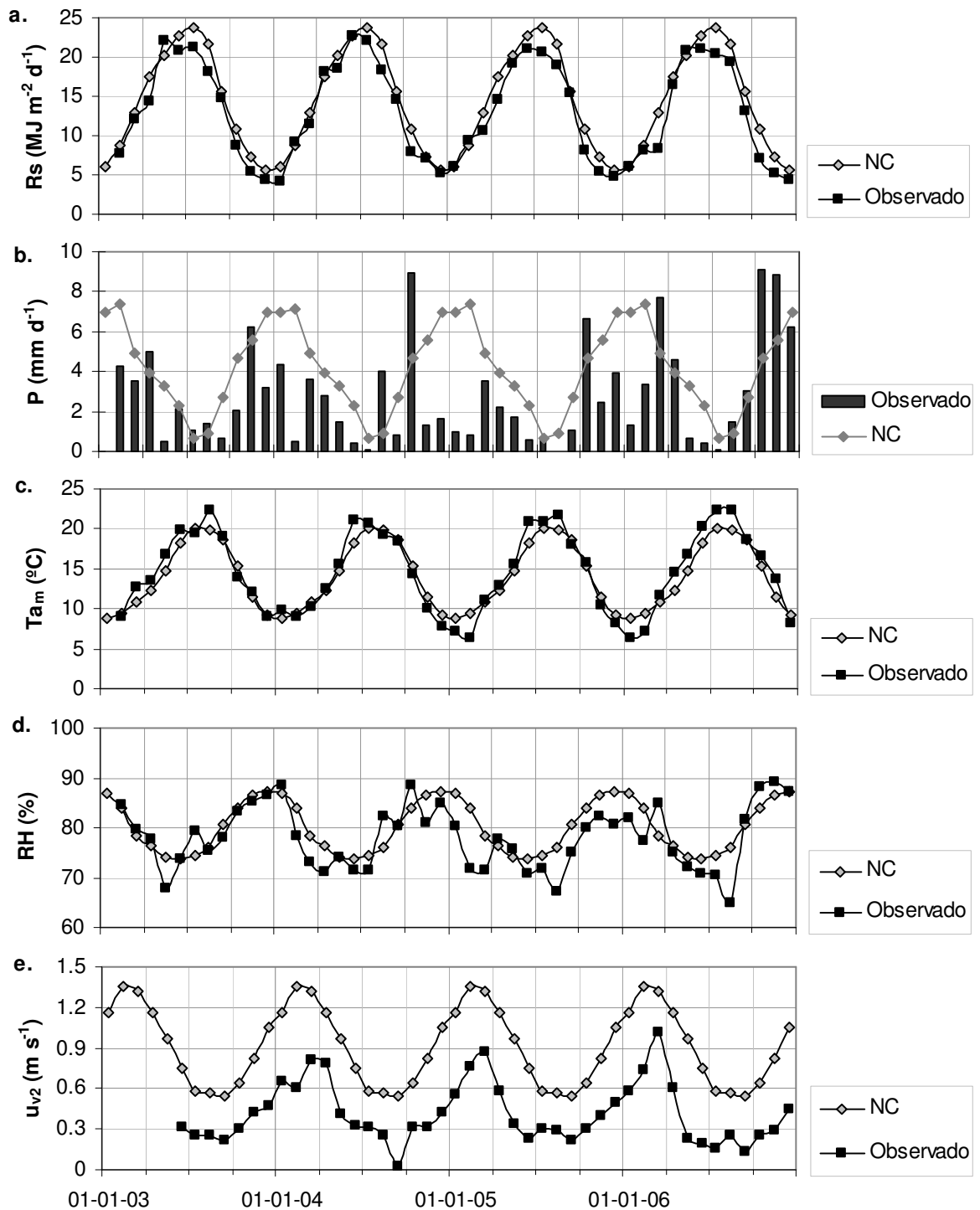


Figura 5.5 – Valores das variáveis meteorológicas: a. radiação solar global; b. precipitação; c. temperatura do ar; d. humidade relativa; e. velocidade do vento; NC – normal climática, Observado – valor registado na estação meteorológica de Gondizalves; os valores de  $R_s$  da NC foram estimados com base na metodologia apresentada em Allen *et al.* (1998), com os dados da normal de insolação apresentada em 5.1.1.

Da informação presente nos gráficos anteriores são de salientar os baixos valores de precipitação ocorridos até ao segundo semestre de 2006 e os valores tendencialmente inferiores de humidade relativa do ar no triénio de 2004 a 2006. Em relação à velocidade do vento, verifica-se

uma diferença significativa em relação à NC, que por ser sistemática deverá ser em parte justificada por diferenças nas condições de medição (local, sensor, etc.).

- **Evapotranspiração de referência**

A evapotranspiração de referência é um importante índice fitoclimático pelo que na Figura 5.6 se apresentam os valores verificados ao longo do ensaio, calculados pelo método de Penman-Montheith.

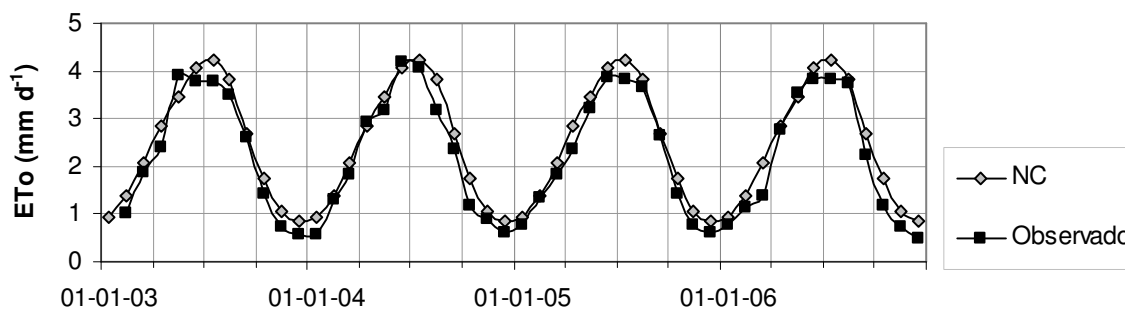


Figura 5.6 – Evapotranspiração de referência mensal, calculada com base nos dados horários registados na estação meteorológica de Gondizalves (ETo) e valores normais de ETo mensais calculados com a normal climatológica da estação de Braga/Posto Agrário (NC), apresentada em 5.1.1.

- **Balanço hídrico de Thornthwaite-Mather**

Tal como apresentado em 5.1.1, apresenta-se o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather com o objectivo de caracterizar o regime hídrico durante este período (Figura 5.7).

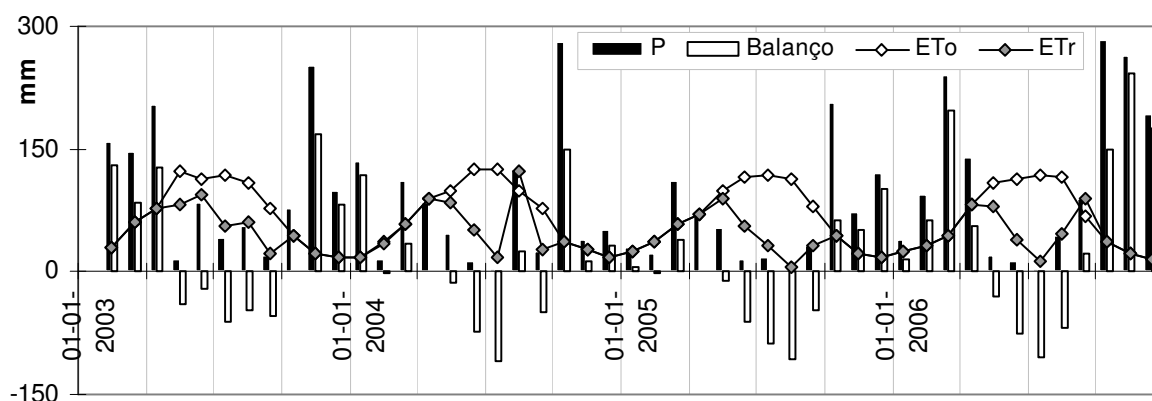


Figura 5.7 - Balanço hídrico de Thornthwaite-Mather da região, considerando um armazenamento hídrico do solo de 100 mm, ETo e P da estação meteorológica de Gondizalves, período de 2003 a 2006.

Pela observação do balanço anterior e atendendo aos valores de precipitação e de ETo em relação à normal climática da região, constata-se que a secura verificada neste período ficou a dever-se à baixa precipitação ocorrida e não a um acréscimo da demanda evaporativa da atmosfera.

- **Comparação com a estação meteorológica do pomar de Briteiros**

Como referido em 4.4.1 instalou-se uma estação meteorológica de suporte no pomar de Briteiros. Na Figura 5.8 apresenta-se a comparação da estação do pomar com a estação de Gondizalves (precipitação e ETo). As regressões obtidas apresentam uma boa correlação, contudo a precipitação observada no pomar de Briteiros é consideravelmente superior à registada na estação meteorológica de Gondizalves (cerca de 50%). Esta diferença poderá ser justificada por erros de calibração dos sensores de medição e/ou por diferentes microclimas locais. Pela impossibilidade de verificação e por ser de maior importância para este estudo a ETo, que correlaciona bem com a ETo calculada com os dados obtidos no pomar, considerou-se a estação de Gondizalves para o restante estudo, sem qualquer ajustamento. Esta estação tem a vantagem de apresentar poucas falhas de dados e estar próxima dos dois locais experimentais (Lisímetro e Pomar de Briteiros), utilizando-se assim apenas uma estação (as falhas desta estação foram preenchidas com dados da estação do pomar e das outras estações indicadas na Tabela 4.9).

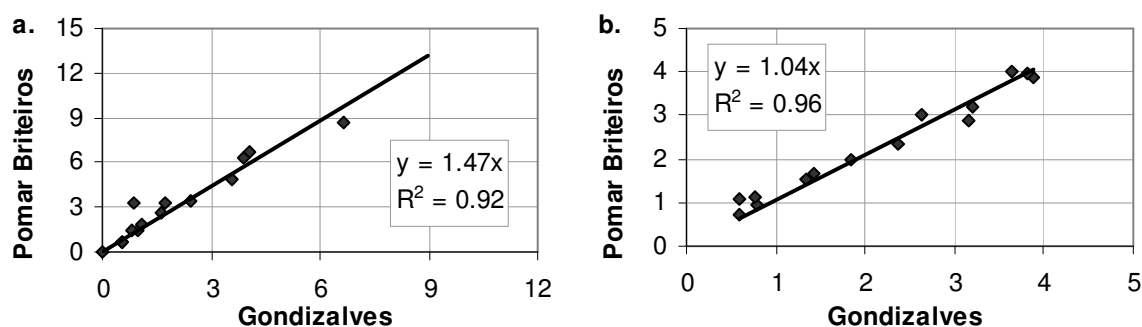


Figura 5.8 – Comparação da estação meteorológica de Gondizalves com a estação do pomar de Briteiros: a. precipitação (valores médios mensais em mm d<sup>-1</sup>, N=22), b. ETo (valores médios mensais em mm d<sup>-1</sup>, N=14).

## 5.2 Dispositivo II (lisímetro – 2005)

Apesar dos trabalhos experimentais terem tido início no pomar de Briteiros em 2003, considerou-se conveniente apresentar primeiro os resultados obtidos em lisímetro em 2005. Este dispositivo experimental permitiu a verificação e calibração do método de Granier, tendo-se desenvolvido uma metodologia para a correcção da calibração e estimativa da transpiração com base no método. O tratamento dos dados de fluxo de seiva do pomar seguiu posteriormente esta metodologia.

### 5.2.1 Calibração do sistema de pesagem

De acordo com Howell *et al.* (1985), é conveniente proceder à calibração dos lisímetros no próprio local após a sua instalação, com uma cobertura do solo para minimizar as perdas por evaporação, colocando-se massas padrão (pesos) e registando em simultâneo as leituras do lisímetro. A calibração foi realizada no dia 1 de Agosto de 2005, com a superfície do lisímetro isolada e com o sistema de drenagem fechado. Para a calibração do lisímetro, através da adição e

subtração de pesos, utilizaram-se três peças metálicas com 13.639, 13.263 e 12.347 kg. Como não foi possível eliminar as perdas originadas pela planta de actinidia já instalada no contentor, realizou-se a operação ao final do dia após o pôr-do-sol, reduzindo-se desta forma a transpiração da planta. Durante esta operação a frequência de registo da carga sobre o lisímetro foi aumentada para 0.1 Hz, realizando-se o registo manual do momento em que os pesos foram colocados sobre o lisímetro. Realizou-se a adição/remoção dos pesos sobre a superfície do lisímetro, com intervalos de cerca de 1 min, obtendo-se os registos apresentados na tabela da Figura 5.9. As leituras da balança do lisímetro apresentadas nesta tabela correspondem ao valor médio registado entre variações da carga, apresentando-se no gráfico da mesma figura a calibração do lisímetro obtida por regressão linear entre a variação de carga (pesos) e as correspondentes leituras no terminal da balança.

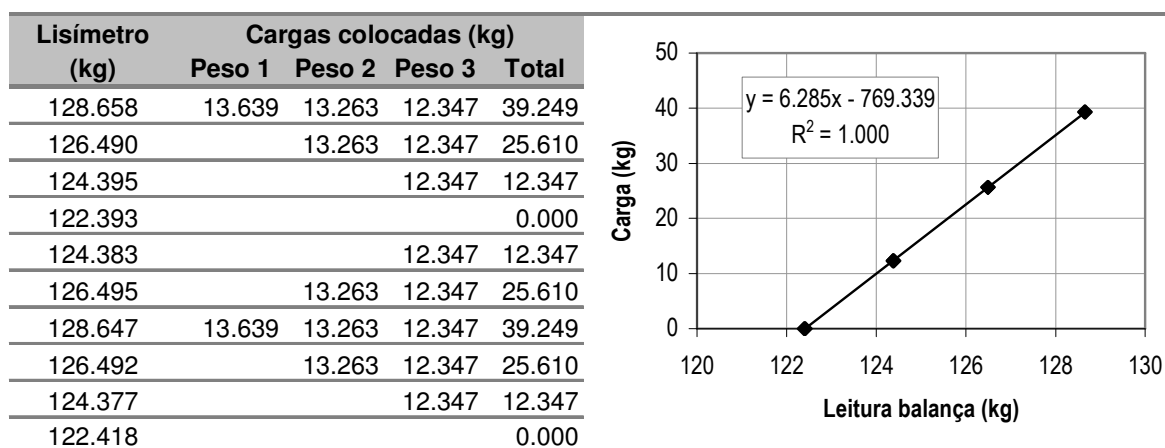


Figura 5.9 - Calibração do lisímetro através da adição/remoção de cargas de valor conhecido.

Os resultados do ensaio de calibração demonstraram que a relação da variação de massa sobre o lisímetro e as leituras da balança do lisímetro apresenta uma resposta linear, com um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 1.000, conforme regressão linear apresentada na Figura 5.9. O factor de redução da carga sobre a balança do lisímetro obtido foi de 6.285, divergindo pouco do valor de projecto (6.300).

Nesta calibração verificou-se, através da adição e remoção de pesos, alguma falta de repetibilidade nas leituras do lisímetro, obtendo-se uma diferença máxima entre leituras, com a mesma carga, de 0.025 kg, correspondente a 0.157 kg no lisímetro. Este valor incorpora o erro da balança utilizada no lisímetro e o erro introduzido pelo sistema de alavancas utilizado (atrato nos apoios, torção e imperfeições na geometria das peças do sistema de alavancas). Estes valores de calibração, atendendo às dotações de rega fornecidas diariamente durante o mês de Julho, de cerca de 15 litros, representam um erro de cerca de 1% da variação da carga diária.

### 5.2.2 Balanço hídrico

O balanço hídrico do lisímetro é dado pela Eq. [4.1], no caso de isolarmos o lisímetro, a evaporação e a drenagem são anuladas e, considerando o crescimento da planta desprezável, a variação de peso, entre regas e na ausência de precipitação (e formação de orvalho) é igual à transpiração. Como estamos na presença de um sistema fechado, nesta situação a transpiração é equivalente à variação de armazenamento hídrico do solo podendo-se também determinar a variação de água do solo.

Na Figura 5.10 apresenta-se a variação de carga registada no lisímetro ao longo do período em que decorreram os estudos conducentes à calibração do método de Granier e ao estudo das medições microdendrométricas.

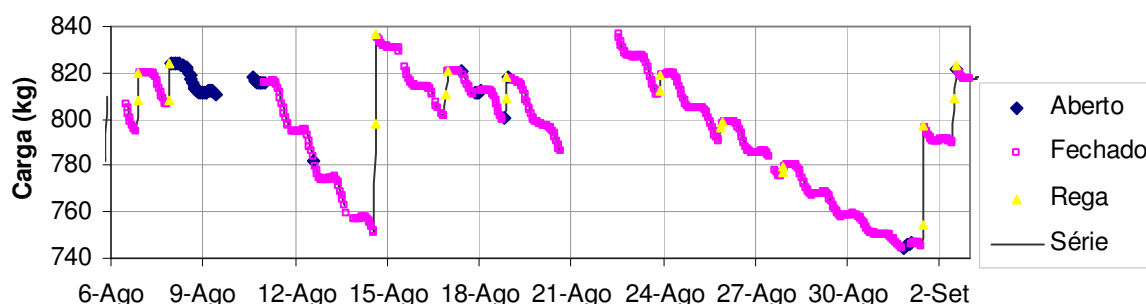


Figura 5.10 – Carga registada pelo lisímetro. Aberto – sistema não isolado para arejamento do solo e/ou drenagem; Fechado – isolado à superfície e sistema de drenagem fechado; Rega – efectuada uma rega; Série – compilação de todos os registos.

Para facilitar a visualização das dotações de rega praticadas, na Figura 5.11 apresentam-se estes valores.

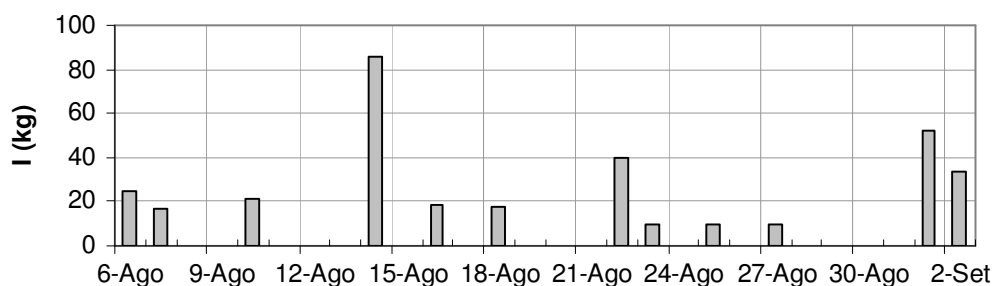


Figura 5.11 – Dotações de rega praticadas no lisímetro.

Com base na variação de carga verificada no lisímetro, apresentada na Figura 5.10, foi possível determinar as perdas de água do sistema e a transpiração da planta instalada (Figura 5.12). Como a realização das regas provocou muitas aberturas do sistema, durante os quais não foi possível determinar com exactidão a variação de carga do sistema, optou-se por efectuar o preenchimento destas e outras falhas com duração inferior a 60 min, considerando uma taxa de

variação de carga do lisímetro (transpiração) igual à média da taxa de variação nos períodos de 60 min anterior e posterior à falha.

O teor de água no contentor foi observado directamente com recurso a uma ThetaProbe, instalada a 25 cm de profundidade. Os valores obtidos no período considerado para este estudo às 7:00 de cada dia, estão presentes na Figura 5.13. Nesta figura também está representado o teor de água do solo determinado pela variação de carga do lisímetro, desprezando a variação de massa ocorrida na planta instalada. O volume de solo presente no contentor era de aproximadamente 400 l e usou-se o valor medido no dia 2 de Agosto ( $\theta_s=21\%$ ) para encontrar um ponto para definir a origem. Para as duas séries serem coincidentes neste ponto é necessário considerar que a massa total do lisímetro, excluindo a água do solo, é de 682 kg, o que é admissível.

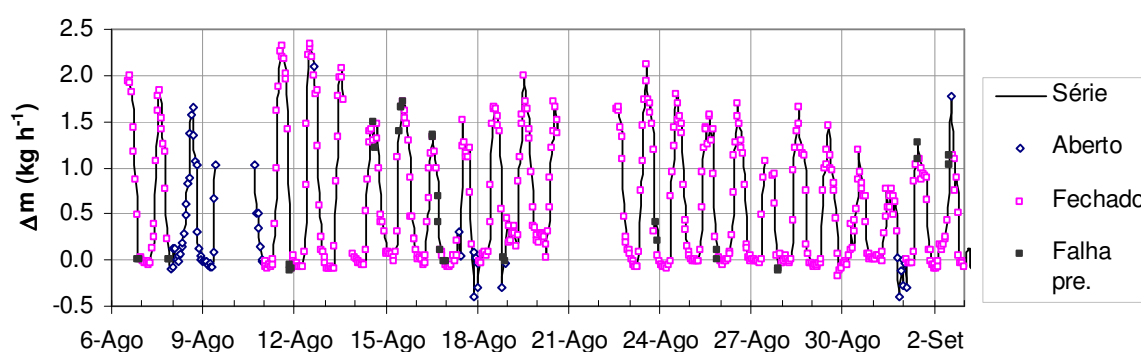


Figura 5.12 – Variação de carga do lisímetro. Aberto – sistema não isolado para arejamento do solo e/ou sistema de drenagem aberto; Fechado – isolado à superfície e sistema de drenagem fechado; Série – compilação de todos os registos; Falha pre. – preenchimento de falhas de duração igual ou inferior a 60 min.

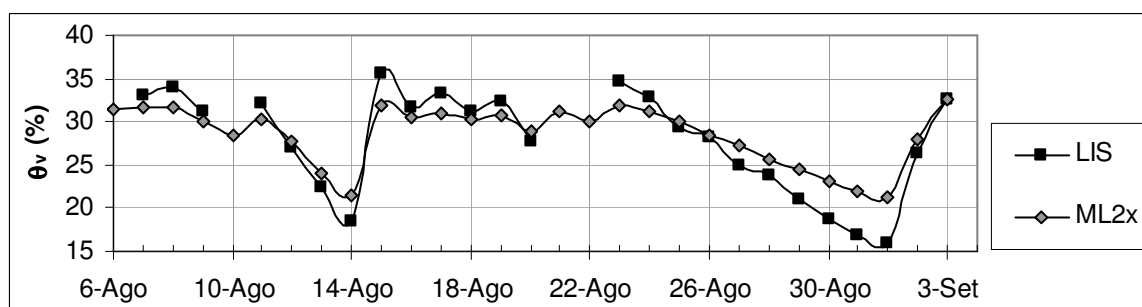


Figura 5.13 – Humidade do solo registada às 7:00 horas, medida (ML2x) e estimada com base na variação de carga do lisímetro.

## 5.2.3 Transpiração – método de Granier

### 5.2.3.1. Análise dos GTN

Lundblad *et al.* (2001) referem que em certas condições o erro originado nos fluxos calculados pelos gradientes térmicos naturais GTN pode ultrapassar os 30%. Em estudos anteriores (Silva, 2002) os GTN causaram alguns problemas no tratamento dos dados e na qualidade dos

resultados obtidos. Desta forma, nas medições de fluxo de seiva aplicou-se um bom isolamento térmico, como indicado em 4.2.3 (Figura 4.8), tentando-se minimizar as perturbações térmicas sobre os valores de  $\Delta T$  medidos. Como demonstrado por Silva (2002; Anexo V) parte significativa dos GTN verificados nos troncos é provocada pela variação de temperatura do solo, originada pelo ciclo circadiano, o que é consistente com trabalhos anteriores de Ferreira e Zitscher (1996). Desta forma, em condições correntes de instalação não haverá forma de anular os GTN, podendo-se contudo reduzir o efeito da variação da temperatura do solo pela instalação dos sensores com um maior afastamento ao solo, sempre que possível, prática seguida neste estudo já que os troncos são altos.

Os gradientes térmicos naturais (GTN) verificados na planta, nos pontos de instalação dos sensores de Granier, foram observados em contínuo através dos sensores sem aquecimento (GTN) e em curtos períodos nos sensores de Granier (com o aquecimento desligado). Na Tabela 5.3 apresentam-se estes resultados. Na Figura 5.14 apresentam-se gráficos de dois pontos de medição (Gra\_1 e Gra\_2) e as rectas de regressão entre os  $\Delta T$  registados pelos sensores de GTN e de Granier, instalados no mesmo ponto, utilizando-se a recta obtida para efectuar a correcção dos GTN observados. Apesar dos gradientes não serem muito significativos, a correcção introduzida permitiu reduzir o efeito dos gradientes nas medições.

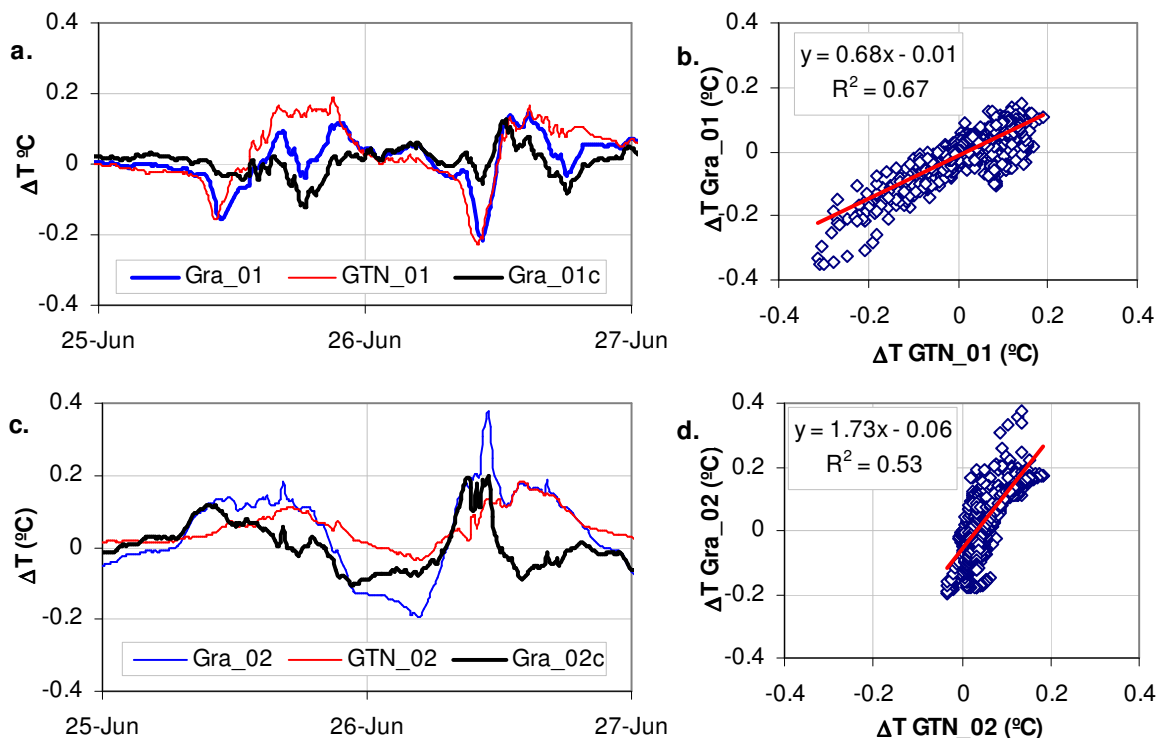


Figura 5.14 – Valores de GTN dos sensores de Granier sem aquecimento (a. e c.) para determinação dos GTN e posterior correcção dos valores de  $\Delta T$  com aquecimento, com base nas regressões estabelecidas nos gráficos b. e d.

Tabela 5.3 – Síntese estatística dos GTN verificados nos pontos de instalação dos sensores de Granier, no ensaio do lisímetro.

	Gra_01	GTN_01	Gra_01c	Gra_02	GTN_02	Gra_02c
<b>Período</b>	20 a 30 de Junho; 20 a 22 de Agosto			20 a 30 de Junho		
<b>Média</b>	-0.03	-0.05	0.03	0.02	0.05	0.00
<b>Desvio padrão</b>	0.22	0.32	0.10	0.10	0.04	0.06
<b>Desvio médio</b>	0.13	0.18	0.06	0.08	0.03	0.05
<b>Desvio máximo</b>	-1.84	-2.03	0.56	0.38	0.19	0.20
	Gra_03	GTN_03	Gra_03c	Gra_04	GTN_04	Gra_04c
<b>Período</b>	7 a 22 de Julho			26 a 30 de Junho		
<b>Média</b>	-0.03	0.14	0.00	0.02	0.04	0.00
<b>Desvio padrão</b>	0.12	0.40	0.09	0.05	0.08	0.04
<b>Desvio médio</b>	0.09	0.30	0.08	0.04	0.07	0.03
<b>Desvio máximo</b>	-0.65	-1.90	0.37	-0.16	0.18	-0.12

### 5.2.3.2. Determinação de $\Delta T_x$

A equação do método de Granier (Eq. [4.2]) tem um parâmetro ( $\Delta T_x$ ) que é ajustado com base nos valores máximos de  $\Delta T$  observados. Este parâmetro corresponde ao valor de  $\Delta T$  na situação de ausência de fluxo (sem transferência de calor por convecção no tronco). Neste trabalho, procurou-se automatizar todas as etapas de cálculo do método de Granier para possibilitar a utilização futura deste método de medição como fitomonitor da transpiração. Neste sentido, como se verifica que o valor de  $\Delta T_x$  não se mantém estável ao longo do tempo é necessário estabelecer um procedimento para a sua fixação.

O processo estabelecido considera a determinação do máximo móvel sobre a série de dados de  $\Delta T$  (ou dos máximos diários) e aplicação de uma média móvel sobre esta última série, como ilustrado na Figura 5.15. A média móvel tem como objectivo suavizar a variação deste parâmetro, que de outra forma introduziria variações significativas nos fluxos calculados. Neste estudo, consideraram-se períodos de 11 e 7 dias, para o máximo móvel e média móvel, respectivamente.

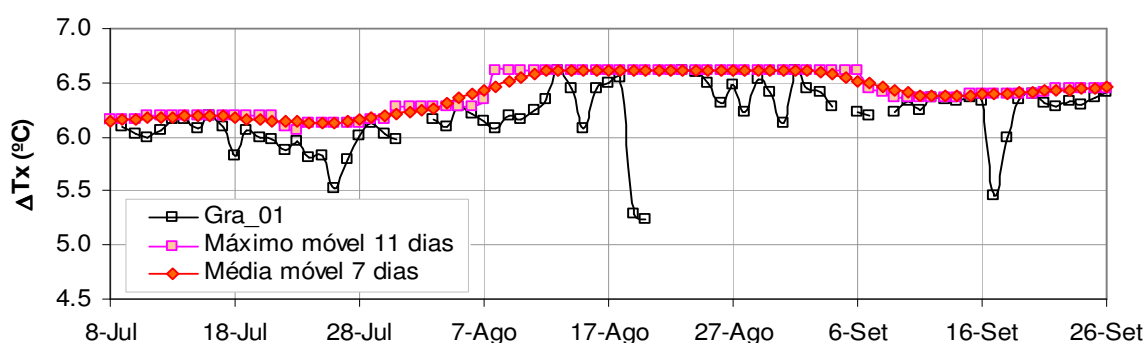


Figura 5.15 – Processo de fixação de  $\Delta T_x$  do método de Granier para o sensor Gra\_01 do ensaio em lisímetro: aplicação de um máximo móvel (Máximo móvel 11 dias) sobre o valor máximo diário de  $\Delta T$  (Gra\_01), seguido da aplicação de uma média móvel (Média móvel 7 dias) sobre a última série.

Na Figura 5.16 estão as curvas de  $\Delta T_x$  ajustadas às séries de dados dos sensores de Granier instalados no ensaio em lisímetro (o sensor Gra\_4 está instalado numa planta do pomar contíguo ao lisímetro).

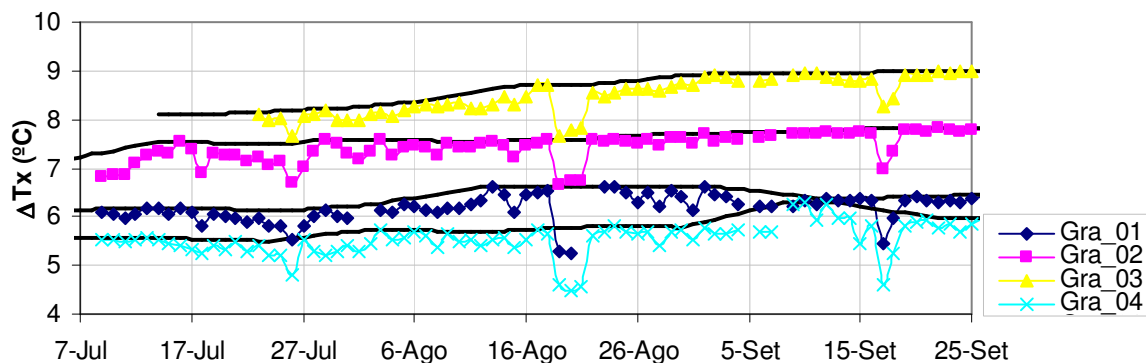


Figura 5.16 – Valores de  $\Delta T_x$  fixados para os sensores de Granier utilizados no ensaio em lisímetro por aplicação de um máximo móvel de 11 dias ao valor máximo diário de  $\Delta T$ , de cada um dos sensores, seguido da aplicação de uma média móvel de 7 dias.

Em relação às flutuações do  $\Delta T_x$  identificam-se facilmente causas que fazem variar diariamente o seu valor, o que na prática corresponde à violação do pressuposto de que no final da noite há ausência de fluxo nas plantas. As noites em que há maior afastamento do  $\Delta T$  verificado em relação ao  $\Delta T_x$  ajustado, correspondem a noites com existência de fluxo nocturno, como pode ser verificado na Figura 5.17 (por comparação com a Figura 5.16). Com o lisímetro isolado a variação de carga corresponde à transpiração ora, verifica-se que nos dias 19 e 20 de Agosto houve alguma transpiração durante a noite e analisando a Figura 5.16 verifica-se que corresponderam a noites de maior afastamento do valor máximo diário de  $\Delta T$  em relação ao  $\Delta T_x$  ajustado. Em relação à variação de longo termo, não foi possível analisar as suas causas, no entanto, atendendo ao princípio de funcionamento do método, aquecimento constante num ponto e na ausência de fluxo dissipação do calor apenas por condução e admitindo a constância da potência de aquecimento aplicada (placas de regulação da potência de aquecimento testadas), pode-se inferir que esta variação é originada pela alteração da condutividade térmica dos tecidos na proximidade do sensor. A condutividade térmica dos tecidos aumenta com a densidade do lenho e com a sua hidratação (Tatarinov *et al.*, 2005) pelo que, a formação de novos tecidos e a variação da sua hidratação deverão justificar parcial ou totalmente as flutuações de  $\Delta T_x$ .

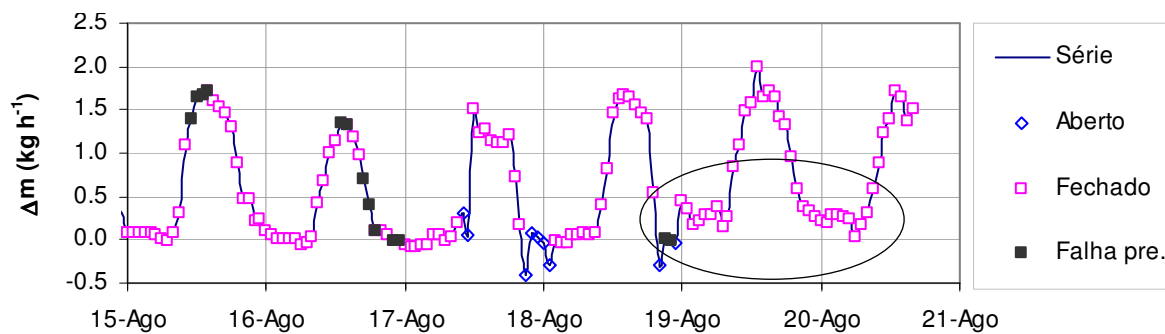


Figura 5.17 - Variação de carga do lisímetro. Legenda: Aberto – sistema não isolado para arejamento do solo e/ou sistema de drenagem aberto; Fechado – isolado à superfície e sistema de drenagem fechado; Série – compilação de todos os registos; Falha pré. – preenchimento de falhas de duração igual ou inferior a 60'.

### 5.2.3.3. Verificação e calibração do método

A determinação da transpiração a partir da medição da densidade de fluxo de seiva, em pontos ou zonas da secção do tronco, requer o uso de métodos de integração destas medições pontuais para toda a secção condutora.

Como observado em inúmeros estudos de medição do fluxo de seiva, o fluxo não é uniforme em toda a secção verificando-se geralmente um perfil radial e uma variação azimutal desse perfil. O perfil apresenta geralmente uma zona de maior fluxo perto da periferia junto ao câmbio vascular. No entanto, a forma do perfil depende da espécie vegetal e é muito variável apresentando os troncos por vezes zonas pouco condutoras, como observado por Clearwater *et al.* (2004) e Silva (2002) nesta espécie. Silva (2002) observou através da aplicação de traçadores corantes em troncos de plantas adultas de actinidia que apenas um círculo central não é condutor e que há maior densidade de fluxo junto à periferia (Anexo IV). Clearwater *et al.* (2004) mediram a densidade de fluxo de seiva nesta espécie com sensores com 4 pontos de medição (5, 10, 15 e 20 mm abaixo do câmbio), verificando que a densidade é geralmente superior junto ao câmbio diminuindo moderadamente para o centro do tronco, sendo contudo todo o raio observado condutor.

O sensor usado pelo método de Granier mede o fluxo ao longo de um raio no tronco equivalente ao comprimento utilizado, neste caso de 10 mm. Como apresentado em Clearwater *et al.* (1999) o sensor, apesar do tubo de alumínio exterior, não integra convenientemente o fluxo médio ao longo do seu comprimento pelo que, o uso de sensores longos para integrar todo o perfil radial dos troncos não funciona bem (com um único ponto de medição no interior).

Como referido em 4.4.2, foram instalados três sensores de Granier na planta do lisímetro. Destes sensores, apenas os instalados no tronco puderam ser usados para a calibração do método por confrontação com a transpiração determinada pelo balanço hídrico do lisímetro. Como se dispunha apenas de dois sensores (instalados a diferentes alturas) fez-se a integração directa destas medições para a secção condutora ao nível de instalação. Os perímetros/diâmetros dos troncos e espessura da casca no ponto de instalação foram medidos quando da instalação dos sensores. A secção condutora foi determinada considerando que o tronco tem uma secção circular, o que se aplica bem a esta espécie. O diâmetro do tronco da planta do lisímetro (cerca de 6 cm) é aproximadamente metade do diâmetro médio das plantas observadas por Silva (2002) pelo que se optou por considerar que toda a secção dos troncos é condutora, com excepção da casca. Como não se dispunha de condições materiais para a medição *in loco* do perfil radial do fluxo de seiva, admitiu-se que a densidade medida representa a média da secção condutora. Neste estudo trabalhou-se com sensores de *Granier* com um único ponto de medição de  $\Delta T$  pelo que a

consideração de qualquer perfil radial, sujeito a posterior calibração, iria fornecer a mesma qualidade de ajustamento.

Na Figura 5.18 apresentam-se alguns dos valores de transpiração determinada no lisímetro (LIS) e acedida pela integração dos valores de densidade de fluxo de seiva medida pelos sensores Gra\_01 e Gra\_02. Neste gráfico é visível a forte subestimativa do método quando aplicado a esta espécie lenhosa.

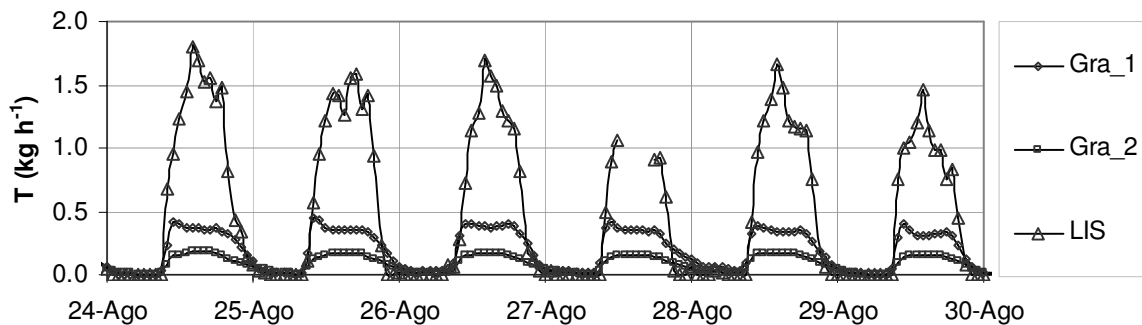


Figura 5.18 – Valores horários de transpiração da planta de actinidia instalada no lisímetro: Gra\_1 e Gra\_2 valores de transpiração acedida pela integração dos valores da densidade de fluxo de seiva registada pelos sensores de Granier, considerando a secção condutora do tronco ao nível da instalação; LIS – transpiração obtida através do balanço hídrico do lisímetro.

Face a estes resultados, que vieram clarificar os anteriormente obtidos por conjugação de técnicas (pomar) e num estudo anterior em lisímetro com uma planta de actinidia de 3 anos (5.2.3.4), procurou-se identificar as causas desta subestimativa e uma forma de solucionar o problema.

Green e Clothier (1988) também obtiveram subestimativas consideráveis na determinação da transpiração desta espécie lenhosa através do método térmico de impulsos de calor e relacionaram o mau funcionamento do método com as características do sistema vascular da planta: xilema constituído por vasos de grandes dimensões e com muito tecido intersticial não condutor. A base teórica do método (Granier, 1985, 1987) pressupõe que o fluxo ocorre homoganeamente na zona condutora do tronco e não apenas ao longo de feixes condutores inseridos em tecido não condutor. No entanto, a actinidia apresenta um tronco muito poroso (Clearwater *et al.*, 2004), um sistema vascular constituído por vasos xilémicos com 0.1 a 0.5 mm de diâmetro, com um afastamento entre vasos de 0.1 a 0.8 mm (McAnaney e Judd, 1983) e com muito tecido intersticial, representando os vasos condutores apenas 18 % da área total de xilema (Dichio *et al.*, 1999), pelo que estas características podem não representar um tecido condutor homogéneo para transmissão de calor por convecção. Esta possibilidade é reforçada pelo facto de em videiras o método apresentar igualmente um mau desempenho (Silvestre e Ferreira, 1998) e esta espécie lenhosa apresentar também vasos xilémicos de grandes dimensões (Green e Clothier, 1988). Em papaia também se

verificou que o método subestima fortemente o fluxo de seiva (Reis *et al.*, 2006) apresentando também esta espécie características anatómicas diferentes das espécies lenhosas usadas por Granier (1985, 1987). Outro aspecto que poderá justificar a discrepância entre a curva de calibração de Granier e os resultados obtidos neste estudo é o facto de, tanto em lisímetro como em campo, a densidade de fluxo ser muito superior à gama de valores utilizada pelo autor do método na calibração original. Braun e Schmid (1999), num estudo de verificação de métodos de medição de fluxo de seiva em videiras (*Vitis vinifera* L.) observaram desfasamentos significativos para valores de densidade de fluxo superiores a 0.38 mm s<sup>-1</sup>, bastante acima do máximo de 0.13 mm s<sup>-1</sup> usado na calibração original. De referir que, tanto em lisímetro (0.25 mm s<sup>-1</sup>) como em pomar (0.65 mm s<sup>-1</sup>), foram observados valores acima de 0.13 mm s<sup>-1</sup>.

Clearwater *et al.* (1999) fizeram um estudo de verificação do método de Granier em diferentes espécies e em diferentes condições de instalação. Este estudo permitiu-lhes desenvolver uma metodologia para a correcção dos valores de  $\Delta T$  medidos em situações de deficiente instalação dos sensores, nomeadamente o contacto com tecido não condutor, a existência de um perfil radial no fluxo de seiva e a anatomia do sistema vascular. Com a correcção dos valores de  $\Delta T$  medidos através da Eq. [5.1], foi possível corrigir os desfasamentos observados na estimativa da transpiração das diferentes espécies lenhosas que utilizaram.

$$\Delta T_{sw} = \frac{\Delta T - b \cdot \Delta T_x}{a} \quad [5.1]$$

onde,

$\Delta T$  diferença de temperatura medida entre as duas sondas do sensor (°C);

$\Delta T_x$  valor de  $\Delta T$  que se verificaria no tecido não condutor (°C), equivalente ao valor máximo encontrado;

$\Delta T_{sw}$  valor corrigido de  $\Delta T$  (°C);

$a$  e  $b$  parâmetros que representam as fracções fictícias da sonda aquecida em contacto com tecido condutor e não condutor, respectivamente.

Neste estudo, apesar de se fazer a correcta instalação dos sensores, assumiu-se que a subestimativa verificada é originada pelo contacto da sonda aquecida dos sensores com tecido não condutor e à anatomia dos vasos condutores. Assim sendo, a correcção introduzida incidiu directamente sobre os dados registados por cada sensor, como apresentado por Clearwater *et al.* (1999).

Na Figura 5.19 apresentam-se os mesmos valores da Figura 5.18 mas com a correcção dos valores de  $\Delta T$  com base na Eq. [5.1] e o coeficiente  $a$  de 0.60 e 0.38 para os sensores Gra\_01 e

Gra\_02, respectivamente<sup>16</sup>. O valor dos coeficientes foi determinado para que o total diário de cada um dos sensores correspondesse à transpiração diária verificada (Figura 5.20).

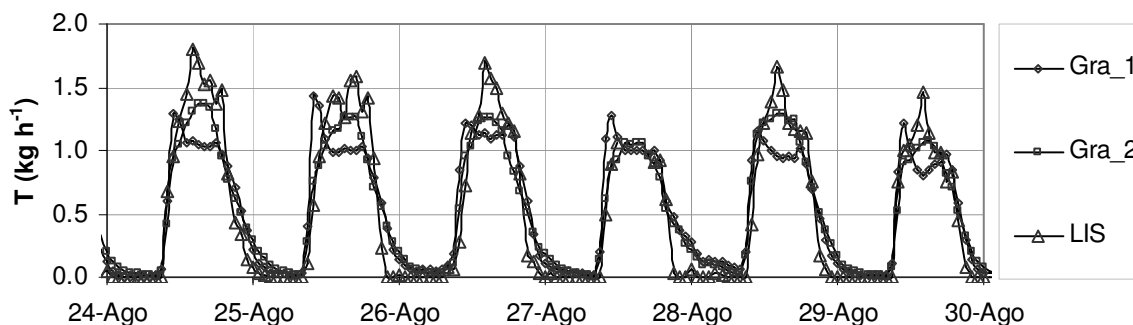


Figura 5.19 - Valores horários de transpiração da planta de actinidia instalada no lisímetro: Gra\_01 e Gra\_02 valores de transpiração acedida pela integração dos valores da densidade de fluxo de seiva registada pelos sensores de Granier considerando a secção condutora do tronco ao nível da instalação com a correcção de  $\Delta T$  medido com base na equação 5.1 e um coeficiente  $a$  de 0.60 e 0.38, para os sensores Gra\_01 e Gra\_02, respectivamente; LIS – transpiração obtida através do balanço hídrico do lisímetro

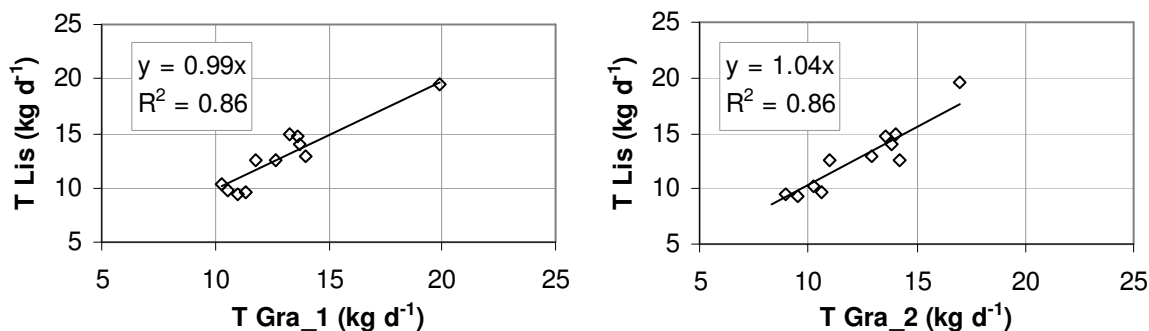


Figura 5.20 - Valores diários da transpiração da planta de actinidia instalada no lisímetro: T Gra\_01 e T Gra\_02, transpiração diária obtida pela integração dos valores horários da densidade de fluxo de seiva medidos pelos sensores de Granier, considerando a secção condutora do tronco ao nível da instalação e a correcção de  $\Delta T$  medido com base na Eq. [5.1] e um coeficiente  $a$  de 0.60 e 0.38, para os sensores Gra\_01 e Gra\_02, respectivamente; LIS, transpiração obtida através do balanço hídrico do lisímetro.

Na Figura 5.21 apresentam-se os valores da densidade de fluxo de seiva em função do índice de fluxo  $k$ , determinado com base nos valores de  $\Delta T$  medidos (DT) e corrigidos (DTc) para o sensor Gra\_02. Verifica-se uma boa aderência dos valores corrigidos à equação original do método, registando-se contudo um desvio para altos e baixos valores de  $k$ . Isto deverá estar relacionado com o efeito da capacitância hídrica dos tecidos acima do ponto de medição: ao início do dia, o fluxo medido é inferior à transpiração e no final do dia verifica-se um valor de fluxo de seiva no tronco superior à variação de massa registada no lisímetro, o que corresponderá à hidratação dos tecidos acima desse ponto. Por outro lado, a relação  $\partial v / \partial T$  aumenta com o decréscimo de  $\Delta T$ , o que significa que a precisão de cálculo de  $v$  em função de  $\Delta T$  decresce (Tatarinov *et al.*, 2005), desta forma é de esperar uma menor precisão do método para fluxos mais elevados.

<sup>16</sup> A soma dos coeficientes da Eq. [5.1] é igual a 1.0 pelo que, o valor de  $b$  corresponde a  $1-a$ , indicando-se no texto apenas o valor de  $a$ .

O método de Granier é um método de medição pontual que integra apenas um pequeno volume de tecido condutor ao longo da sonda pelo que a discrepância no valor do coeficiente de correcção ajustado é admissível. Deste modo, quando o objectivo da medição for a estimativa da transpiração é preciso considerar este aspecto pontual da medição e proceder à estimativa da transpiração da planta/coberto por métodos estatísticos que permitam determinar a transpiração do coberto a partir de uma amostra de observações pontuais. Neste caso por dispormos apenas de dois sensores, fez-se a média simples dos dois valores. Note-se que, na planta instalado no lisímetro não seria conveniente a instalação de mais sensores térmicos no tronco de modo a evitar possíveis interferências entre sensores.

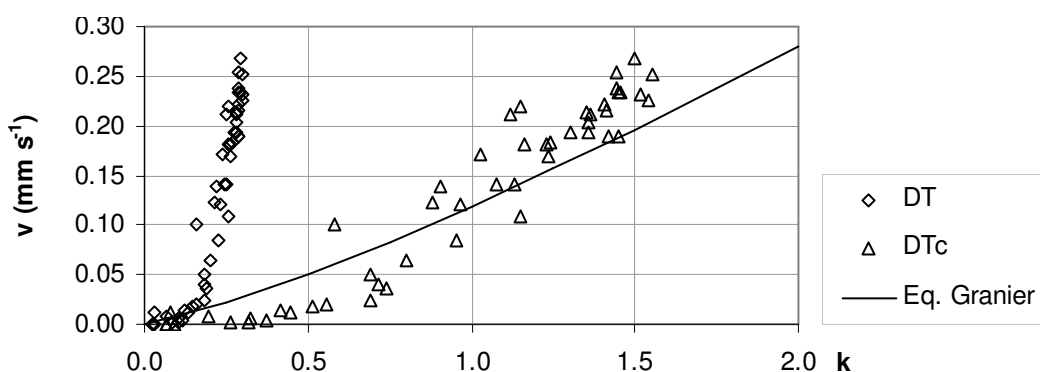


Figura 5.21 – Densidade de fluxo de seiva obtida considerando T obtida pelo balanço hídrico do lisímetro e a secção condutora do tronco ao nível do sensor Gra\_02;  $k$  determinado com base nos valores de  $\Delta T$  medidos (DT) e corrigidos (DTc) do sensor Gra\_02 com um coeficiente de correcção  $a$  de 0.38. Dados do período de 24 a 27 de Agosto de 2005.

Na Figura 5.22 e Figura 5.23 apresentam-se os valores de transpiração determinada pelo balanço hídrico do lisímetro e pelo método de Granier com ajustamento independente e com ajustamento conjunto do factor de correcção aos dois sensores. O resultado é praticamente igual o que, conjuntamente com o estudo realizado em 5.4.3.1, demonstra que a quantificação da transpiração de um coberto poderá ser realizada com base numa boa amostragem e numa correcção genérica para as condições de aplicação.

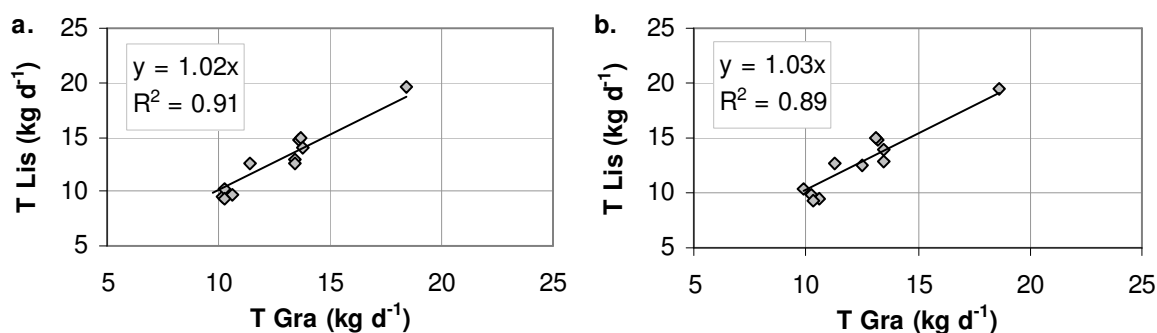


Figura 5.22 - Valores diários da transpiração da planta de actinidia instalada no lisímetro: a. transpiração obtida pela média dos sensores Gra\_01 e Gra\_02, com correcção independente de  $\Delta T$  ( $a=0.60$  Gra\_1 e  $a=0.38$  Gra\_2); b. transpiração obtida pela média dos sensores Gra\_01 e Gra\_02, com correcção conjunta de  $\Delta T$  ( $a=0.52$ ).

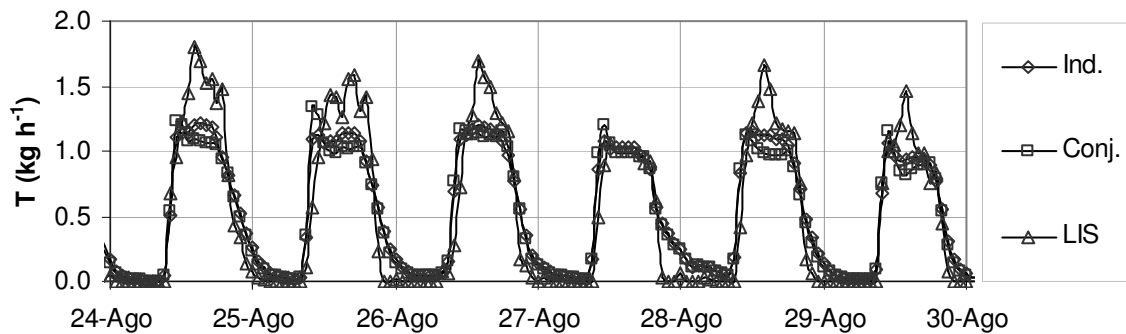


Figura 5.23 - Valores horários da transpiração da planta de actinidia instalada no lisímetro: Ind., transpiração obtida pela média dos sensores Gra\_01 e Gra\_02, com correcção independente de  $\Delta T$  ( $a=0.60$  Gra\_1 e  $a=0.38$  Gra\_2); Conj., transpiração obtida pela média dos sensores Gra\_01 e Gra\_02, com correcção conjunta de  $\Delta T$  ( $a=0.52$ ); LIS, transpiração obtida através do balanço hídrico do lisímetro.

#### 5.2.3.4. Resultados de um ensaio preliminar em lisímetro

Em 2003, no âmbito do projecto Agro 288, foi realizado um estudo também em lisímetro com uma planta de actinidia com três anos. Neste estudo foi observada uma grande discrepância entre o fluxo calculado pelo método e medido pelo lisímetro. No entanto, na altura não foi possível fazer um ajustamento à calibração do método devido à curta duração do ensaio.

Após a calibração do método com os dados obtidos em lisímetro em 2005 foi testada a mesma abordagem com os dados deste ensaio. Na Figura 5.24 e Figura 5.25 apresentam-se os registos de um dos sensores usados, verificação da calibração original e com ajustamento pela Eq. [5.1] de  $\Delta T$  medido, considerando  $a=0.55$  (sensor de Granier, de 10 mm, instalado a 120 cm do colo da planta, secção condutora de  $6.16E-04 \text{ m}^2$ ).

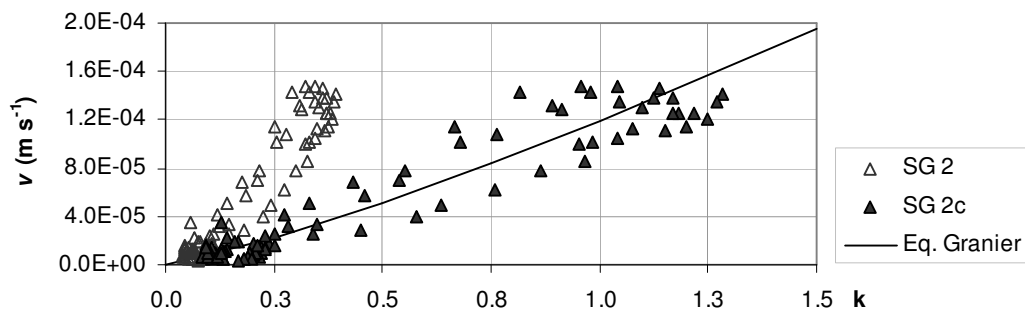


Figura 5.24 – Densidade de fluxo de seiva obtida considerando  $T$  obtida pelo balanço hídrico do lisímetro e a secção condutora do tronco ao nível do sensor SG 2;  $k$  determinado com base nos valores de  $\Delta T$  medidos (SG 2) e corrigidos (SG 2c) com um coeficiente de correcção  $a$  de 0.55. Dados do período apresentado na Figura 5.25.

Estes estudos em lisímetro (2003 e 2005) comprovam o mau funcionamento do método com a calibração original e demonstram um desajustamento da calibração original mesmo para valores de densidade de fluxo inferiores a  $0.13 \text{ mm s}^{-1}$ . Abaixo desta densidade a calibração original do método ajusta bem aos fluxos medidos em videiras (Braun e Schmid, 1999). Contudo, nesta espécie, pelos estudos realizados, verifica-se um desajustamento da calibração original em toda a gama de valores observados. Este comportamento do método está mais de acordo com o

observado por Reis *et al.* (2006) em papaia (*Carica papaya* L. var formosa). Estes autores ajustaram uma nova calibração ao índice de fluxo ( $k$ ), apontando como causa do desajustamento da calibração original a distribuição, o tamanho dos vasos xilémicos e o elevado teor de água dos troncos desta espécie, de características herbáceas.

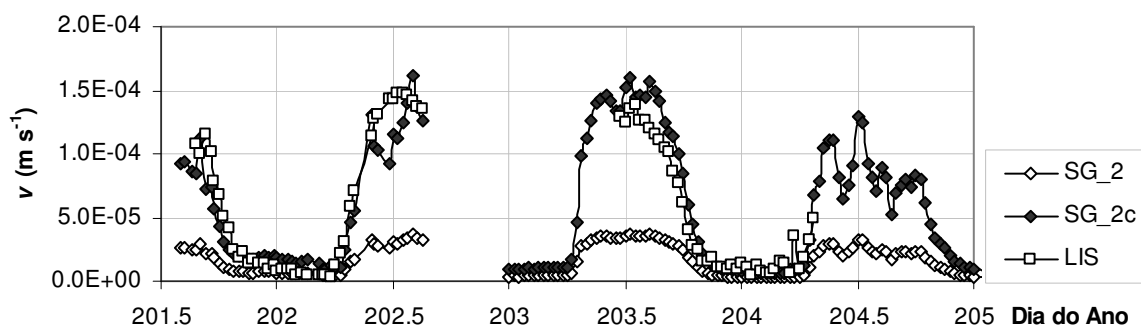


Figura 5.25 - Valores médios de 30 min da densidade de fluxo da planta de actinidia instalada no lisímetro: SG\_2 densidade de fluxo determinada pela equação de calibração original do método de Granier; SG\_2c densidade de fluxo obtida após correcção de  $\Delta T$  pela Eq. [5.1] com  $a=0.55$ ; LIS densidade de fluxo de seiva calculada pela variação de massa no lisímetro e a secção condutora do tronco.

#### 5.2.4 Condutância estomática e potencial hídrico da planta

Neste ensaio, como referido em 4.4.2, foram medidos o potencial hídrico de base, do ramo e a condutância estomática. A observação do estado hídrico da planta com estes métodos tinha como principal objectivo estabelecer uma referência para os métodos microdendrométricos de determinação do estado hídrico das plantas. Na Figura 5.26 apresentam-se os valores observados de potencial hídrico (de base e do ramo) e da condutância estomática. Como termo de comparação mediram-se também estas variáveis na planta do pomar contígua ao lisímetro.

Gucci *et al.* (1997) verificaram que a recuperação total de  $g_s$ , taxa de assimilação de  $CO_2$  e transpiração de plantas de actinidia após um primeiro ciclo de stress pouco severo aconteceu num período de 36 h após o restabelecimento do conforto hídrico da cultura e que a recuperação foi muito mais lenta num segundo ciclo de stress mais severo. Os valores obtidos neste estudo quando comparados com os da planta do pomar (controlo), bem como os de potencial hídrico, indicam que a planta no lisímetro raramente apresentou conforto hídrico, nunca atingindo o nível das plantas do pomar. Este comportamento deverá ser justificado pelo corte de parte significativa do sistema radicular e pelo reduzido volume de solo explorado.

Com o intuito de analisar a regulação hídrica da espécie, na Figura 5.27 apresenta-se a relação entre o potencial hídrico do ramo e a condutância estomática medida. Tal como evidenciado na figura anterior, a planta do lisímetro apresentou sempre valores de potencial hídrico muito inferiores aos da planta do pomar. Mesmo com o solo humedecido à saturação, como aconteceu no dia 14 de Agosto, a condutância estomática manteve-se bastante baixa. A dispersão é elevada mas

verifica-se que após aplicação do filtro para a remoção dos períodos com baixa radiação<sup>17</sup>, o funcionamento hídrico da planta do lisímetro e do pomar apresentam um comportamento comparável, isto é, na mesma linha de tendência, sendo a relação muito mais definida, uma vez que se eliminou um factor limitante da actividade da planta (radiação).

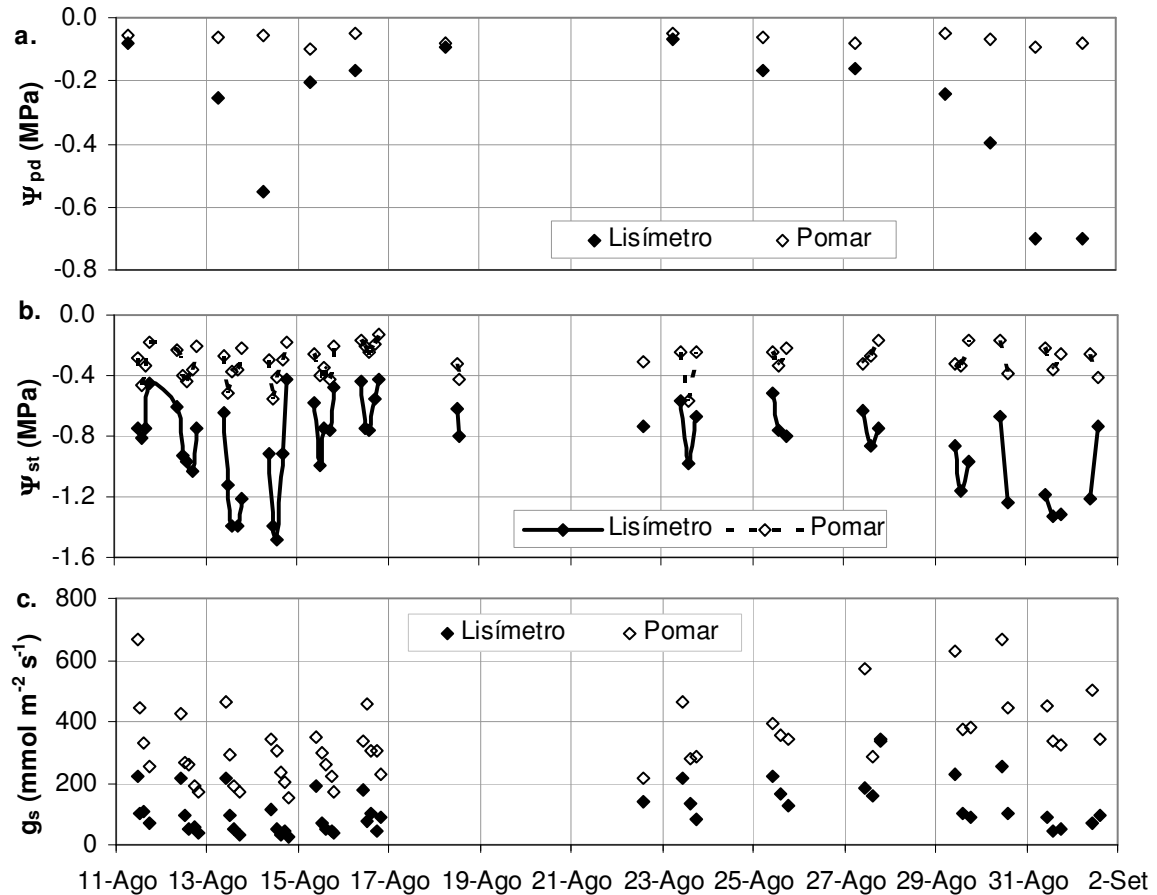


Figura 5.26 – Potencial hídrico de base (a), potencial hídrico do ramo (b) e condutância estomática (c) medidos ao longo dos ensaios no dispositivo I (planta do lisímetro e do pomar).

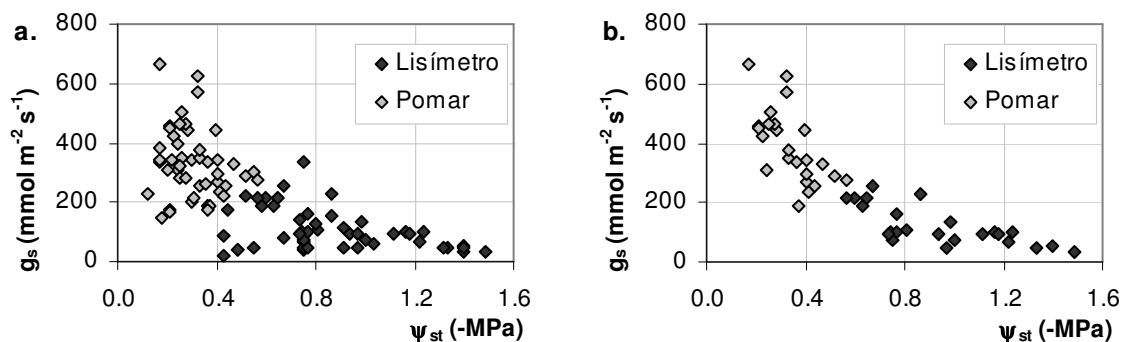


Figura 5.27 – Resposta da condutância estomática ( $g_s$ ) à variação do potencial hídrico do ramo ( $\psi_{st}$ ): a. relação com todos os valores observados no ensaio; b. relação com os valores observados com a radiação fotossinteticamente activa (PAR) superior a  $1500 \text{ mmol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

<sup>17</sup> Até ao final do primeiro ciclo de stress hídrico as medições de potencial hídrico do ramo e de condutância estomática foram realizadas em 5 momentos ao longo do dia (dois antes e dois depois do meio-dia solar); no segundo ciclo de stress hídrico foram realizadas medições nos momentos correspondentes a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  do período compreendido entre o nascer do sol e o pôr-do-sol.

Como observado na Figura 5.28, a variação do potencial hídrico da planta está muito dependente do estado hídrico do solo. Considerando que a planta apresenta sempre um potencial hídrico inferior ao verificado em condições naturais (pomar), pode-se concluir que a transplantação da planta para o lisímetro provocou uma redução significativa do sistema radicular e consequente redução da condutividade hidráulica do sistema solo-planta.

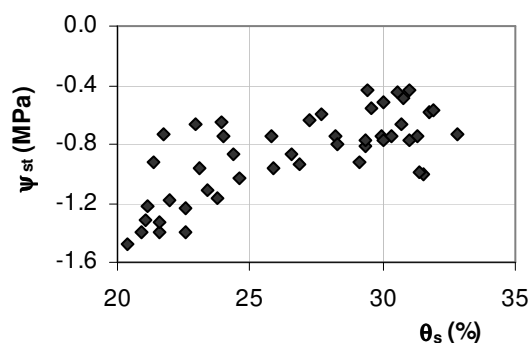


Figura 5.28 – Variação do potencial hídrico do ramo da planta instalada no lisímetro em função do teor de água do solo no momento da medição.

### 5.2.5 Microdendrometria para a determinação do estado hídrico da planta

Os LVDTs usados permitem registrar variações ínfimas do diâmetro dos órgãos aos quais são aplicados. Neste estudo em lisímetro, foram utilizados 4 sensores, três dos quais sobre a planta do lisímetro e um sobre a planta contígua do pomar. No lisímetro foram instalados no tronco a 40 (Dia\_01) e 130 cm (Dia\_02) do solo e o terceiro a meio do eixo (Dia\_03); na planta do pomar foi instalado no tronco a 130 cm do solo (Dia\_04).

#### ▪ Variação do diâmetro do tronco – interpretação visual

Na Figura 5.29 pode-se observar a variação do diâmetro do tronco registada pelos sensores ao longo do período do ensaio sendo patente um ciclo diário de variação. Nesses gráficos estão também identificados o valor máximo (MxD) e mínimo (MnD) diário do diâmetro do órgão.

O método mais usual de identificar o estado hídrico com esta medição é pela interpretação visual da curva da variação diária e da variação sazonal. Deste modo, períodos de reduzida contracção diária do tronco e com variação positiva dos máximos diários, interpretam-se como períodos de conforto hídrico; períodos de maior contracção diária e variação negativa dos máximos diários interpretam-se como períodos com restrições hídricas. Contudo, esta forma de utilização deste método não permite a automatização do processo de determinação do estado hídrico das plantas e a quantificação do correspondente estado hídrico.

Apesar das limitações operacionais que esta via apresenta, continua a ser a forma mais utilizada neste método de determinação do estado hídrico das plantas, nomeadamente nos sistemas de fitomonitorização mais difundidos.

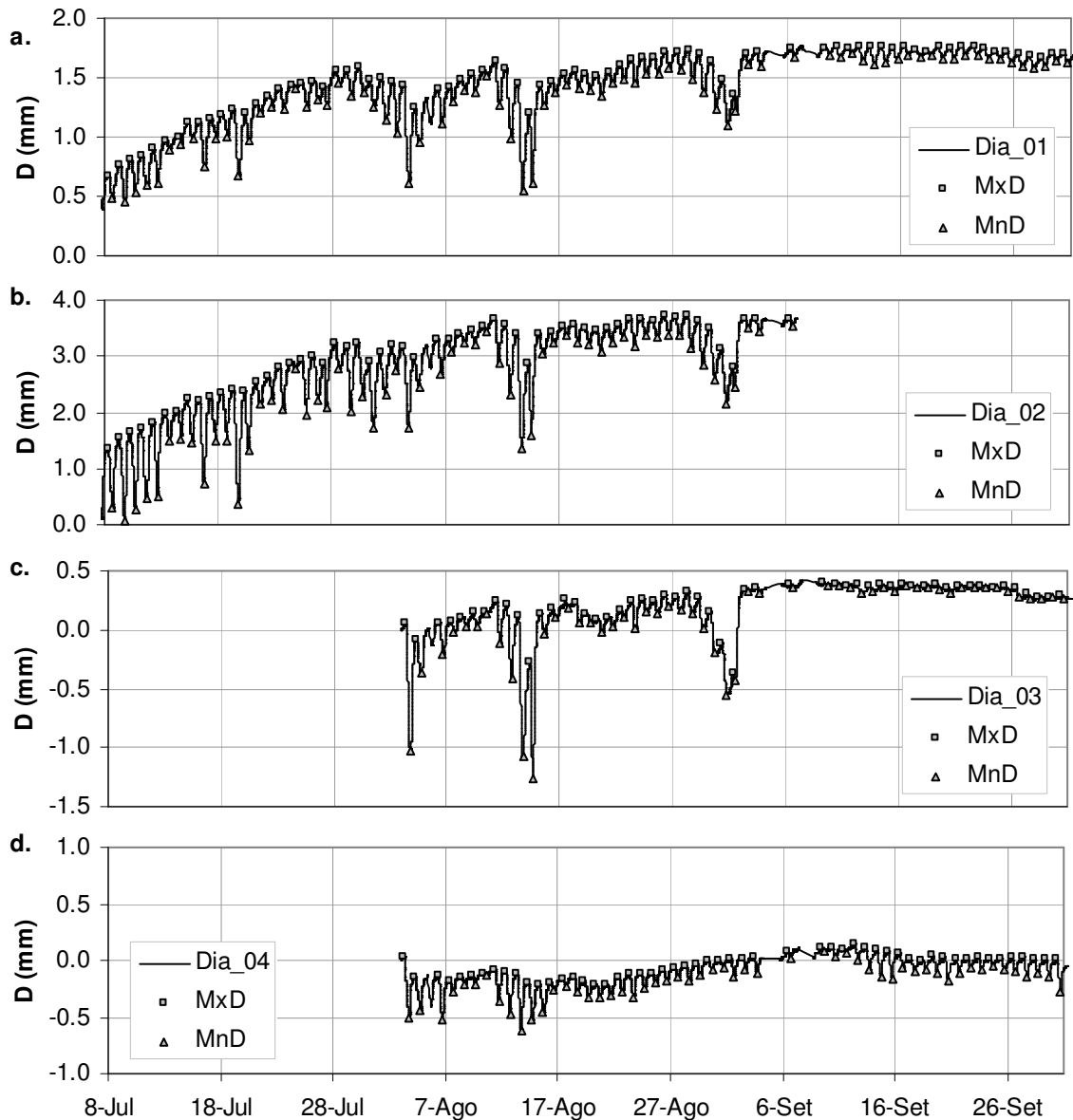


Figura 5.29 – Variação do diâmetro do tronco registada pelos sensores durante o ensaio no lisímetro, com identificação dos máximos (MxD) e mínimos (MnD) diários.

#### ▪ Índices microdendrométricos numéricos

Com base nos valores extremos diários identificados nas séries da Figura 5.29 (MxD e MnD) determinaram-se os índices quantitativos deste método que até hoje foram mais difundidos e profusamente usados em estudos científicos e mesmo em sistemas aplicados na gestão da rega. Os valores destes índices encontram-se na Figura 5.30. Em alguns casos, os valores extremos diários (MnD e MxD) também são usados directamente, em especial MnD.

Ao contrário do observado por outros autores (p.ex. Ortuño *et al.*, 2005b) o sinal de MDS aumentou sempre em função do agravamento do stress hídrico da cultura, não se verificando a redução do sinal para valores baixos de potencial hídrico. Este aspecto poderá estar relacionado

com as propriedades mecânicas dos tecidos da planta (elasticidade) e com a curta duração dos ciclos de stress.

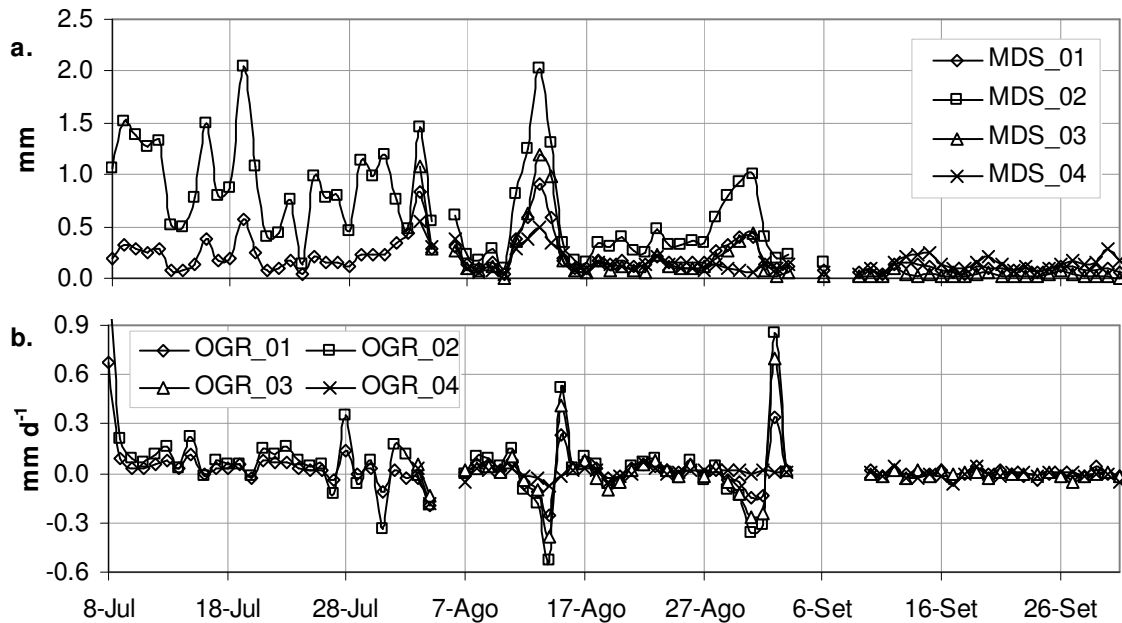


Figura 5.30 – Valores diários dos índices microdendrométricos MDS (daily maximum diameter shrinkage) e OGR (daily organ growth rate) observados no ensaio em lisímetro.

Os índices relacionados com a variação do diâmetro de órgãos não têm correspondência directa com os indicadores hídricos tradicionalmente usados. Porém, atendendo ao princípio teórico subjacente à sua utilização espera-se que tenham uma boa correlação estatística com o potencial hídrico da planta. Na Figura 5.31 e na Tabela 5.4 apresentam-se os resultados da avaliação destes índices, verificando-se que ambos apresentam um mau desempenho na planta do pomar (Dia\_04) e que mesmo na planta do lisímetro (Dia\_01, Dia\_02 e Dia\_03) o desempenho é insatisfatório.

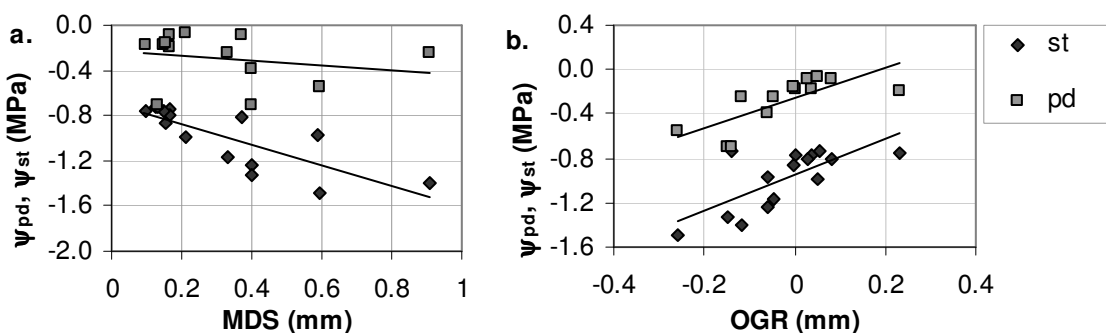


Figura 5.31 – Relação do potencial hídrico de base (*pd*) e do ramo (*st*) com os índices microdendrométricos MDS (a.) e OGR (b.); sensor Dia\_02.

Atendendo à variabilidade existente nas medições com a câmara de pressão do potencial hídrico (de base e do ramo) é de considerar que parte da variação do potencial hídrico não explicada pelos índices seja inerente ao erro de amostragem nas medições, em especial do potencial hídrico, por se ter usado uma amostragem de apenas duas folhas por medição e por se

estabelecer a relação directa com a medição de cada sensor de variação do diâmetro. Segundo Naor e Cohen (2003), MDS apresenta uma boa sensibilidade à variação do estado hídrico da planta mas uma variabilidade de amostragem ligeiramente superior ao potencial hídrico do ramo.

Tabela 5.4 - Análise estatística dos índices microdendrométricas (MDS e OGR) por regressão linear com o potencial hídrico de base e do ramo.

	MDS				OGR				
	Dia_1	Dia_2	Dia_3	Dia_4	Dia_1	Dia_2	Dia_3	Dia_4	
$\Psi_{pd}$	N	13	13	13	13	13	13	13	
	$r^2$	0.05	0.08	0.06	0.04	0.53	0.54	0.53	0.00
	Declive	-0.22	-0.13	-0.16	0.03	1.32	0.63	0.82	0.01
	Intercepção	-0.22	-0.20	-0.24	-0.07	-0.26	-0.25	-0.25	-0.07
$\Psi_{st}$	N	15	15	15	15	15	15	15	
	$r^2$	0.63	0.67	0.66	0.18	0.51	0.44	0.39	0.01
	Declive	-0.91	-0.42	-0.63	-0.26	1.63	0.72	0.89	0.20
	Intercepção	-0.70	-0.68	-0.77	-0.33	-0.95	-0.94	-0.95	-0.38

Os índices MDS e OGR, ainda que baseando-se na mesma curva de variação diária do diâmetro, têm obviamente significados diferentes. MDS é um índice que caracteriza o extremo diário de stress hídrico da planta (diferença para o valor mínimo) e OGR está mais relacionado com o nível de máxima hidratação dos tecidos ao final da noite, tal como sustentado pela melhor correlação de MDS com  $\Psi_{st}$  e de OGR com  $\Psi_{pd}$  (Tabela 5.4). Em relação ao índice MDS, a dispersão encontrada nas relações com o potencial hídrico do ramo pode em parte ser justificada pelo facto de a medição discreta do potencial hídrico do ramo não ter captado convenientemente o valor mínimo de potencial hídrico nesses dias. Apesar de visualmente ser perceptível a resposta dos índices MDS e OGR ao agravamento do stress hídrico da cultura, como reportado em diversos estudos (Goldhamer *et al.*, 2000; Goldhamer e Ferreres, 2001; Naor e Cohen, 2003) a relação com o potencial hídrico da planta não é muito consistente, como apresentado na Figura 5.31 e na Tabela 5.4.

#### ▪ Novo índice microdendrométrico quantitativo

A resposta dos índices quantitativos tradicionalmente usados (MDS e OGR) à variação do estado hídrico a que as plantas estão submetidas, não permite fazer uma quantificação precisa desse estado hídrico. Deste modo, explorou-se a possibilidade de construir um novo índice.

O novo índice aqui apresentado resulta da análise dos índices existentes (MDS e OGR) e das limitações que apresentam. A contracção máxima diária (MDS) atribui o mesmo valor à contracção diária verificada independentemente do valor máximo diário que lhe serviu de base de cálculo (MxD) corresponder a uma sequência de dias com variação positiva dos máximos diários (crescimento ou recuperação) ou a uma sequência negativa (agravamento do estado hídrico). O crescimento diário

do órgão (OGR), por oposição, apenas considera esta variação entre dias. Desta forma, construiu-se o índice  $MDS \cdot (1 - OGR)$ , que pondera a contracção diária do órgão com a variação do diâmetro do órgão face ao dia anterior (OGR). Caso o diâmetro máximo seja igual ao diâmetro máximo do dia anterior, assume o valor de MDS, caso seja maior é reduzido e caso seja inferior é ampliado. Os resultados da aplicação deste novo índice às séries de dados anteriormente analisadas são explorados na Figura 5.32.

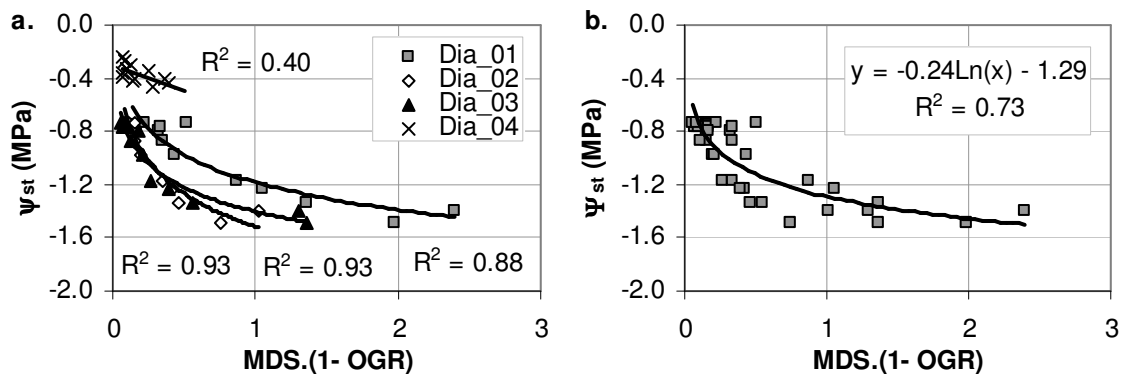


Figura 5.32 – Relações logarítmicas entre o índice  $MDS.(1-OGR)$  e o potencial hídrico do ramo com ajustamento independente (a.) a cada uma das séries de dados e ajustamento conjunto (b.) da relação logarítmica às séries Dia\_01, Dia\_02 e Dia\_03.

A representação gráfica da Figura 5.32 permitiu verificar que este índice tem uma boa relação logarítmica com o potencial hídrico do ramo. No entanto, verifica-se que não permite discretizar potenciais hídricos elevados, como os apresentados pela planta do pomar (Dia\_04). Na Figura 5.33 e Figura 5.34 apresentam-se as estimativas do potencial hídrico do ramo com este novo índice.

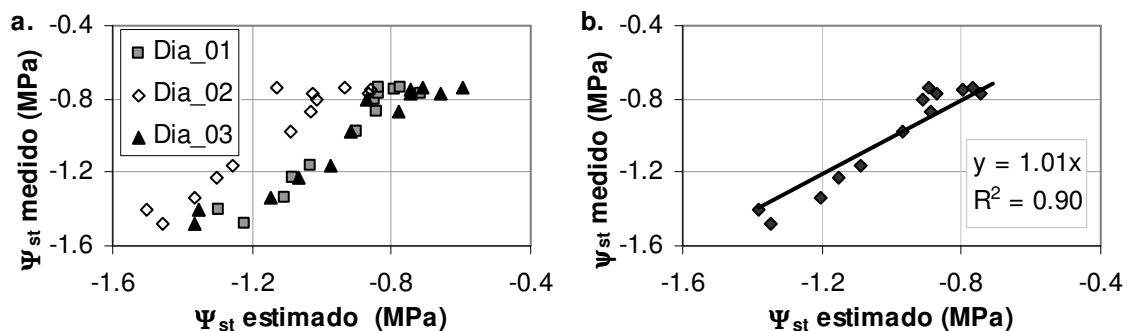


Figura 5.33 – Potencial hídrico do ramo medido e estimado pelo índice  $MDS.(1-OGR)$ : a. potencial hídrico do ramo estimado pela regressão apresentada na Figura 5.32b; b. potencial hídrico do ramo estimado pela média aritmética das séries do gráfico a.

De referir novamente que se usou uma amostragem de apenas duas folhas por medição (potencial hídrico), pelo que parte da variação não justificada pelas regressões deverá ser devida a erros na quantificação do estado hídrico da planta.

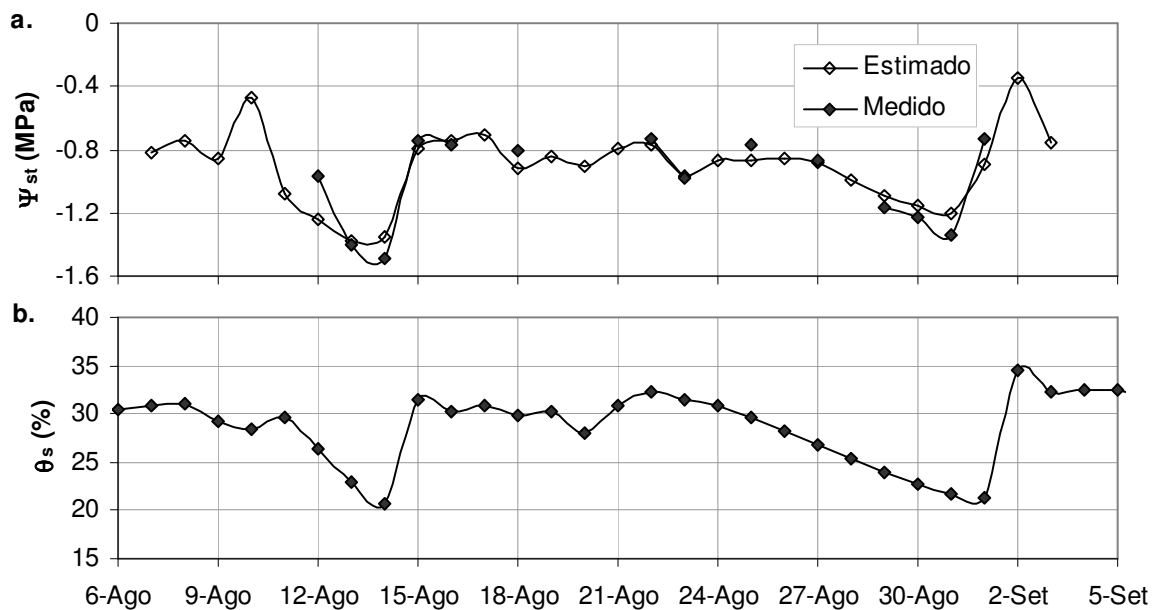


Figura 5.34 – a. série do potencial hídrico do ramo estimado para o período do ensaio e medido em alguns dias; b. teor de água do solo registado pela ThetaProbe instalada no contentor.

### 5.3 Dispositivo I (pomar - 2003 a 2006)

Os trabalhos apresentados neste ponto, como anteriormente já mencionado, tiveram início antes dos trabalhos realizados em lisímetro em 2005, apresentados no ponto anterior. Os estudos deste dispositivo experimental tinham como principal finalidade o desenvolvimento dos fitomonitorios para a quantificação da transpiração do coberto vegetal e para a quantificação do estado hídrico da cultura. Pretendia-se também recolher séries de dados destes fitomonitorios, e outras medições complementares, para o desenvolvimento e validação das restantes componentes do sistema.

#### 5.3.1 Observação do estado hídrico das plantas

Neste dispositivo experimental a medição do estado hídrico das plantas tinha como finalidade determinar a que situações de estado hídrico correspondiam os fluxos medidos no coberto. Deste modo, sempre que foram realizadas medições directas da evapotranspiração do coberto pelo método das flutuações instantâneas foram realizadas medições periódicas dos indicadores hídricos de referência.

Em 2003 foram realizadas, durante um período em que se pretendia estabelecer um ciclo de stress no talhão T-II, as medições do potencial de base e mínimo apresentadas na Figura 5.35. O potencial hídrico de base observado corresponde praticamente ao mínimo de escala da câmara de pressão usada (0.05 MPa) pelo que, algumas medições da amostra deverão ter sido truncadas, devendo o potencial hídrico efectivo ser ainda superior, isto é, mais próximo de zero. Ora, estes valores, bem como os de potencial mínimo correspondem a condições hídricas consideradas de pleno conforto hídrico (Nuzzo *et al.*, 1997; Chartzoulakis *et al.*, 1997; Gucci *et al.*, 1997).

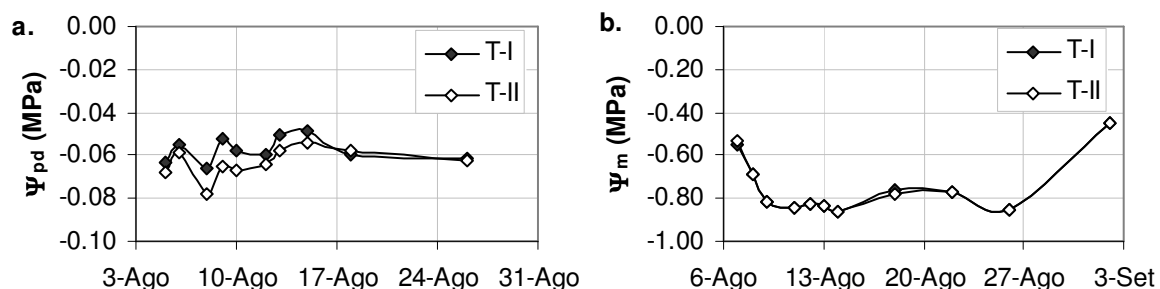


Figura 5.35 – Potencial hídrico de base (a) e mínimo (b; medido por volta das 14:00 h) observados em 2003 no pomar de Briteiros nos talhões T-I e T-II.

Na Figura 5.36 apresenta-se a variação de potencial hídrico da folha observada durante dois dias de 2003 (cinéticas diárias), que fazem parte do período antes referido.

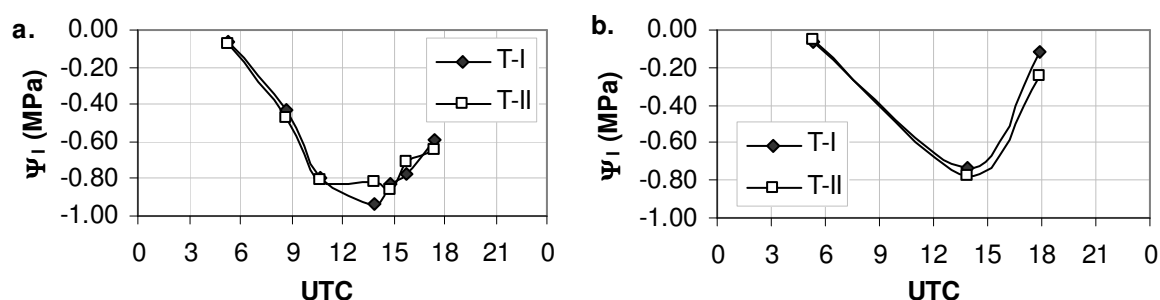


Figura 5.36 – Cinéticas diárias do potencial hídrico da folha medidas nos talhões T-I e T-II: a. dia 9 de Agosto; b. dia 18 de Agosto de 2003.

Em 2004, foi medido o potencial hídrico de base nos dias 13 e 15 de Julho tendo-se observado 0.05 MPa (valor igual ao mínimo da câmara de pressão usada) e 6.0 MPa de potencial mínimo no dia 15 de Julho.

As observações realizadas em 2006 ao estado hídrico das plantas encontram-se no ponto 5.4.2.

## 5.3.2 Balanço energético do coberto

### 5.3.2.1. Processamento dos dados micrometeorológicos

A aplicação do método micrometeorológico de eddy covariance (EC), descrito em 4.2.4.1, obriga ao respeito de algumas condições de aplicação, relativamente ao local de medição, ao posicionamento dos sensores, aos sensores utilizados e ao processamento dos dados recolhidos. Os três primeiros aspectos já foram referidos ao descrever a instalação do sistema (4.4.1), apresentando-se neste ponto o procedimento utilizado no processamento dos dados recolhidos.

#### ▪ Dados instantâneos

Como referido em 4.4.1 os dados instantâneos dos sensores foram processados em linha utilizando sistemas de aquisição de dados da Campbell Sci. (CR23X e CR10 X). No programa utilizado (referido em 4.4.1) antes de proceder ao cálculo das estatísticas do método foram

realizadas as conversões de unidades necessárias, aplicadas as calibrações (LI-7500 e Krypton) e a compensação para o desfasamento temporal na aquisição dos sinais dos sensores. Não foi realizada a remoção do ruído das leituras (perturbações físicas e electrónicas), aplicação de rotação de coordenadas e remoção de tendências nas séries de dados. Para aplicação destas últimas correcções seria conveniente recolher a totalidade dos dados brutos (*raw data*) e aplicar posteriormente estes ajustes.

- **Aplicação de correcções**

Existem deficiências inerentes a estas medições atmosféricas que causam violações mais ou menos graves aos pressupostos da teoria do método, pelo que é necessário aplicar um conjunto de correcções às covariâncias calculadas (Mauder e Foken, 2004). A lista de possíveis fontes de erros nos dados foi apresentada em 4.2.4.1. Algumas destas fontes de erro foram eliminadas ou reduzidas através da adequada instalação dos sensores (nivelamento, altura de instalação, *fetch*) e através do adequado processamento dos dados instantâneos (calibrações, sincronização dos sinais dos sensores). Há no entanto fontes de erro que exigem a aplicação de correcções sobre os dados médios das estatísticas do método. Deste modo, neste trabalho procedeu-se à aplicação da correcção de Webb-Pearman-Leuning e à correcção para a sensibilidade do higrómetro de Krypton ao oxigénio, ambas para o fluxo de *LE*. A correcção de Webb-Pearman-Leuning (Webb *et al.*, 1980; geralmente referida por WPL) é aplicada para compensar os efeitos das flutuações da temperatura e vapor de água nos fluxos medidos. A segunda correcção resulta do facto de o higrómetro de krypton medir o teor de vapor de água da atmosfera pela absorção de um feixe de radiação ultravioleta pelas moléculas de  $H_2O$ , sendo que, na gama de radiações usadas pelo sensor existe também absorção pelas moléculas de  $O_2$ , pelo que esta interferência tem de ser corrigida, como proposto por Tanner *et al.* (1993).

Em 2003 utilizaram-se dois sensores para medir as flutuações da densidade de vapor de água do ar, tal como referido em 4.2.4.1. Aos fluxos medidos pelos dois sensores (*LE*) foi aplicada a correcção de WPL e aos dados do Krypton foi também aplicada a correcção para a absorção do oxigénio, por ser específica deste tipo de sensor. Como apresentado na Figura 5.37 os fluxos medidos pelos dois sensores são equiparáveis, o que corrobora a boa calibração dos mesmos.

Para além destas correcções efectuadas, existe um conjunto de correcções relacionadas com a resposta da frequência de medição ao transporte turbulento. Estas correcções compensam a perda de fluxos nas diferentes frequências do fluxo turbulento. São o resultado de diversas correcções individuais (tempo de resposta dos sensores, separação física dos sensores, média escalar/vectorial na janela de medição, filtros de alta e baixa frequência, deficiências na resposta

dos sensores e amostragem digital) constituindo uma função de transferência global. Estas correcções são aplicadas a todos os fluxos medidos e geralmente correspondem a uma perda de 5 a 30% dos fluxos (Burba e Anderson, 2007). A aplicação destas correcções é em muito facilitada pela utilização de aplicações informáticas que permitam a recolha dos dados brutos dos sensores e o processamento dos mesmos. Desta forma, uma vez que neste trabalho o processamento dos dados foi realizado em linha pelos sistemas de aquisição de dados e a posterior edição dos dados foi realizada maioritariamente numa folha de cálculo, não foi possível aplicar estas correcções.

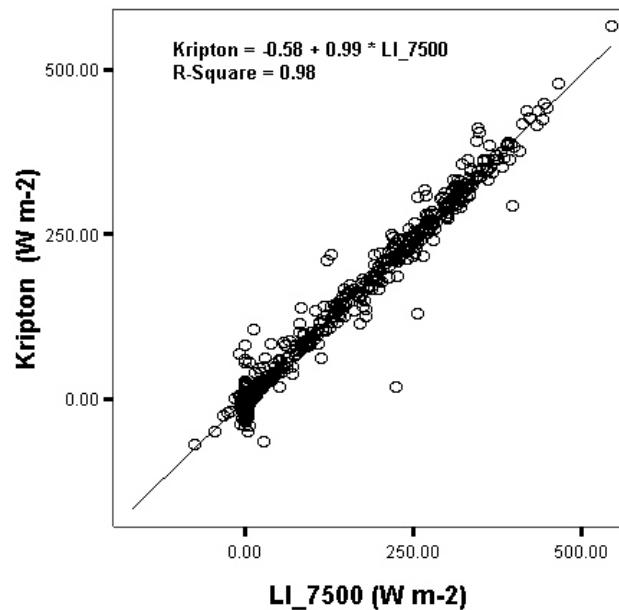


Figura 5.37 – Relação entre os fluxos de calor latente medidos pelo IRGA (LI\_7500) e pelo higrómetro de krypton (krypton), durante o período de medições de 2003.

- **Controlo da qualidade dos dados e preenchimento de falhas**

O controlo da qualidade dos dados obtidos passa pela remoção dos dados de má qualidade originados pelo mau funcionamento dos sensores, artefactos matemáticos no processamento dos dados, condições ambientais desajustadas aos requisitos do método de EC, direcção do vento exterior à zona de interesse (*footprint*) e ocorrência de precipitação (Burba e Anderson, 2007).

Como apresentado em 4.2.4.1 a origem dos fluxos é analisada através do conceito de *footprint*, utilizando-se neste estudo a Eq. [4.4] para quantificar a fracção do fluxo medido que em cada intervalo provém do *fetch* disponível em função da direcção do vento. A Figura 4.10 mostra a distância (*fetch*) do ponto de medição dos fluxos na parcela para cada um dos azimutes considerados na análise. Na Tabela 5.5 apresentam-se, para os três períodos observados, o valor médio de CNF (contribuição cumulativa normalizada dos fluxos medidos) após exclusão dos dados de má qualidade, o número de registos validados (períodos de 30 min) e número de registos após o preenchimento de falhas de duração inferior a 3 h.

Tabela 5.5 – Indicadores da qualidade dos dados das medições micrometeorológicas (sistema das flutuações instantâneas) sendo CFN a contribuição cumulativa normalizada dos fluxos medidos até ao limite da parcela, na direcção do vento dominante no intervalo de tempo considerado.

	CNF			Registos validados		Falhas preenchidas	
	24 h	dia	noite	LE	H	LE	H
06-08-03	0.76	0.79	0.70	34	34	48	48
07-08-03	0.69	0.75	0.61	27	27	36	36
08-08-03	0.79	0.82	0.75	37	37	48	48
09-08-03	0.75	0.79	0.68	39	39	48	48
10-08-03	0.76	0.81	0.68	36	39	48	48
11-08-03	0.77	0.80	0.71	32	37	48	48
12-08-03	0.74	0.75	0.72	33	35	48	48
13-08-03	0.71	0.76	0.64	40	40	48	48
14-08-03	0.68	0.75	0.59	32	48	37	48
15-08-03	0.77	0.80	0.73	20	25	28	32
16-08-03				0	0	0	0
17-08-03				0	0	0	0
18-08-03	0.78	0.83	0.65	30	30	34	34
19-08-03	0.78	0.83	0.73	40	40	48	48
20-08-03	0.76	0.79	0.71	44	44	48	48
21-08-03	0.77	0.79	0.74	42	43	48	48
22-08-03	0.79	0.80	0.79	39	39	48	48
23-08-03	0.77	0.81	0.72	41	41	48	48
24-08-03	0.74	0.76	0.72	44	44	48	48
03-07-04	0.71	0.66	0.78	41	41	48	48
04-07-04	0.74	0.74	0.74	44	44	48	48
05-07-04	0.74	0.73	0.74	40	40	48	48
06-07-04	0.71	0.72	0.70	39	39	48	48
07-07-04	0.68	0.72	0.63	45	45	48	48
08-07-04	0.69	0.72	0.66	42	42	48	48
09-07-04	0.73	0.71	0.76	36	36	42	42
10-07-04	0.82	0.86	0.80	13	13	21	21
11-07-04				0	0	0	0
12-07-04	0.74	0.74	0.75	29	29	31	31
13-07-04	0.75	0.75	0.75	43	43	48	48
14-07-04	0.76	0.73	0.78	34	34	48	48
15-07-04	0.71	0.70	0.72	47	47	48	48
16-07-04	0.48	0.62	0.34	42	42	48	48
17-07-04	0.46	0.55	0.36	46	46	48	48
18-07-04	0.49	0.59	0.37	46	46	48	48
07-11-06	0.62	0.70	0.48	24	38	29	41
08-11-06	0.67	0.86	0.51	22	36	32	43
09-11-06	0.64	0.73	0.55	39	43	48	48
10-11-06	0.43	0.53	0.32	40	48	48	48
11-11-06	0.47	0.57	0.39	26	40	36	45
12-11-06	0.62	0.77	0.47	23	36	31	40

Dos dados obtidos, apenas foram considerados os dias que após o preenchimento de falhas (inferiores a 3 h) se obteve a série de dados completa (48 registos), obtendo-se 14, 12 e 2 dias de dados em 2003, 2004 e 2006, respectivamente. Nos dias validados segundo a Eq. [4.4], 76%, 66% e 54% dos fluxos diários medidos e 79%, 69%, 63% dos fluxos do período diurno, foram provenientes da zona de *fetch* disponível, atendendo à direcção mais frequente do vento verificada, em 2003, 2004 e 2006, respectivamente. Estes valores atribuem às medições uma margem de erro

proporcional à fracção de fluxos medidos exteriores à zona de interesse. No entanto, pela observação feita à ocupação dos solos da zona envolvente (Figura 4.10), verificou-se que a maioria dos terrenos na época do ano em que decorreram as medições em 2003 e 2004 era ocupada com milho forragem de regadio, que segundo Allen *et al.* (1998) tem um  $K_c$  médio de 1.20<sup>18</sup>, pelo que, o erro introduzido deverá ser apenas o resultado da diferença entre culturas e da fracção dos fluxos provenientes do exterior. Em 2006, as medições decorreram numa altura do ano com condições da atmosfera que requeriam um *fetch* superior, pelo que a fracção de fluxos exteriores à zona de interesse é significativa, tendo estas medições uma grande incerteza associada.

▪ **Validação - balanço de energia**

A aplicação da equação de balanço de energia do coberto é uma forma comumente usada para validar os dados obtidos por este método. Pela dificuldade de quantificar algumas componentes e por serem geralmente relativamente pequenas é normalmente aplicada a equação simplificada (Eq. [2.12]). Na Figura 5.38 apresentam-se os balanços de energia para os três períodos de medição.

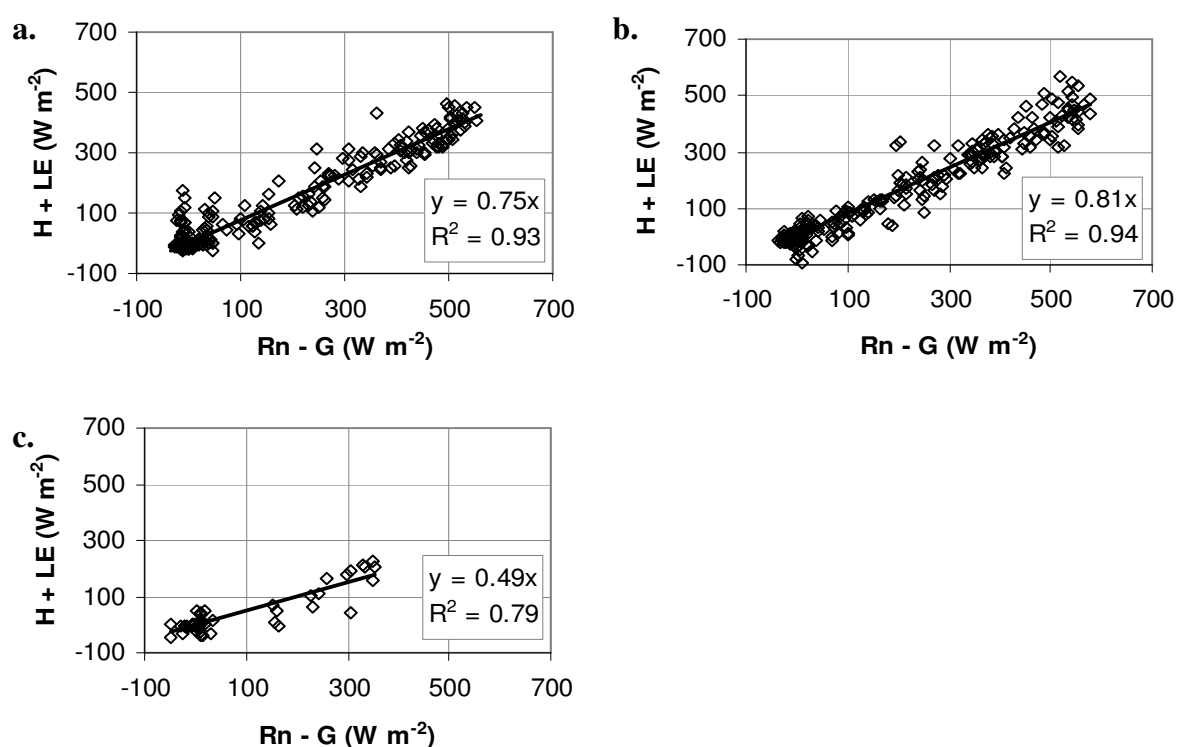


Figura 5.38 – Fecho do balanço de energia do coberto: a. período de medições de 2003; b. período de medições de 2004; c. período de medições de 2006.

O declive da relação entre  $H+LE$  e  $Rn-G$  foi de 0.75 em 2003 (14 dias), 0.81 em 2004 (12 dias) e de apenas 0.49 em 2006 (2 dias), pelo que, o erro de fecho foi de 25% em 2003, 19% em

<sup>18</sup> Na região do Entre Douro e Minho cultivam-se geralmente variedades de milho de ciclos médio-curtos, pelo que o valor do coeficiente cultural deverá ser inferior.

2004 e de 51 % em 2006. O erro de fecho é assim de 19-25% para os períodos de 2003 e 2004 (Verão) e de 51% para 2006 (Outono) e não se pode dizer em que medida tal corresponde a um erro de LE ou de outras componentes do balanço energético. Nos dois primeiros casos este erro pode ser justificado em parte pelas componentes ausentes da equação de balanço (armazenamento energético no coberto, fotossíntese, fluxo de calor através do fluxo de seiva e da rega, não quantificados no balanço energético) e pela perda de fluxos relacionados com a frequência de medição do transporte turbulento (correções não efectuadas e que segundo Burba e Anderson (2007) representam 5 a 30% dos fluxos). Em 2006, as medições foram realizadas num período em que as condições ambientais apresentavam fortes limitações em relação aos fundamentos do método e os fluxos são bastante mais baixos. Como observado na Tabela 5.5, a fracção de fluxos exteriores à zona de interesse é superior pelo que a qualidade dos resultados obtidos dependia em grande parte da semelhança da zona envolvente ao pomar.

### 5.3.2.2. Fluxos de energia

Na Figura 5.39 apresenta-se um gráfico dos fluxos médios horários de cada período de observação, para um período de dois/três dias. Nestes gráficos é visível um claro predomínio do fluxo de calor latente.

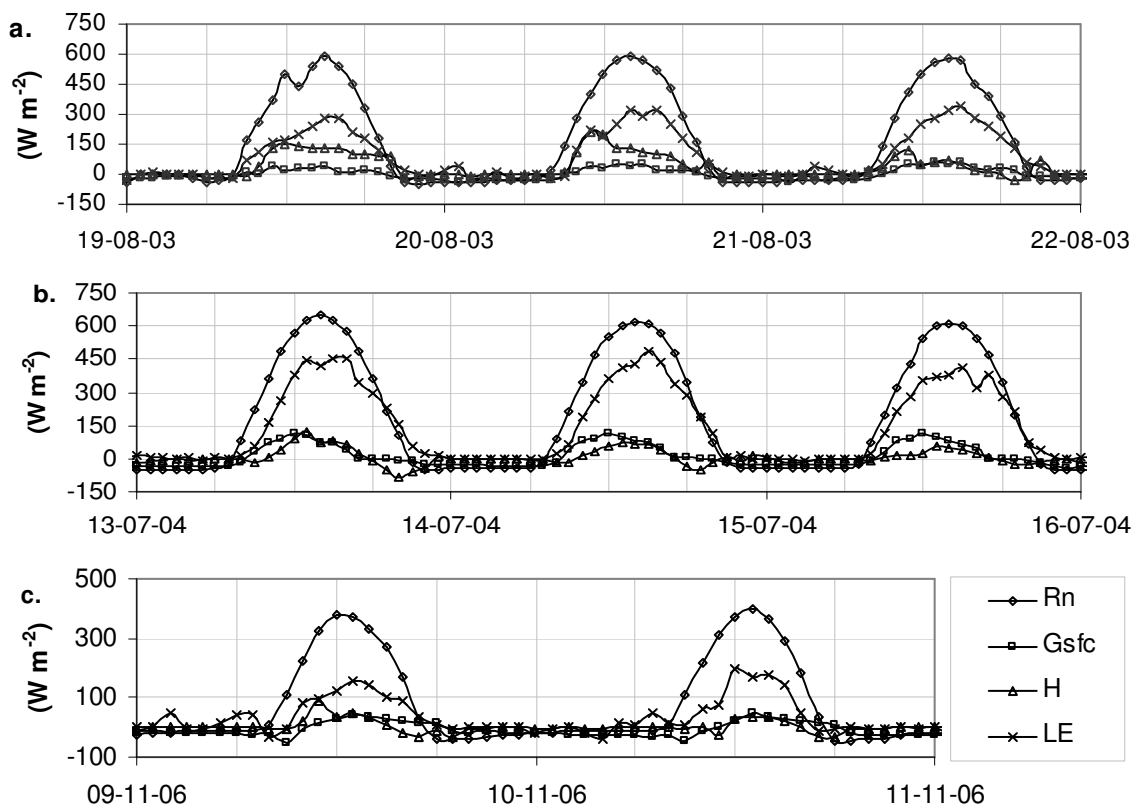


Figura 5.39 – Fluxos de energia do coberto durante um período de 2003 (a), 2004 (b) e 2006 (c); H fluxo de calor sensível, LE fluxo de calor latente, Rn radiação líquida e  $G_{sfc}$  fluxo de calor à superfície do solo.

A razão H/LE, conhecida por razão de Bowen, foi neste coberto de 0.30 e 0.25 em 2003 e 2004, respectivamente, ainda que apresentando alguma variabilidade diária conforme evidenciado na Figura 5.40. A componente principal da utilização da energia disponível, expressa pela razão  $LE/(Rn-G)$  foi de 0.61 e 0.65 em 2003 e 2004, respectivamente.

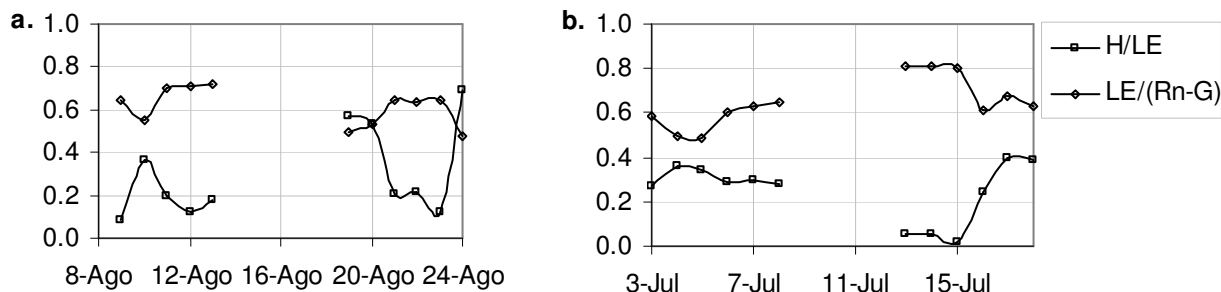


Figura 5.40 – Relações H/LE e  $LE/(Rn-G)$  em 2003 (a.) e 2004 (b.).

#### ▪ Fluxo de calor latente - evapotranspiração cultural

A medição directa da evapotranspiração do coberto (pomar de actinidia) foi realizada com a aplicação deste método micrometeorológico. Este fluxo hídrico corresponde ao fluxo de calor latente medido que é convertido na altura correspondente de água através do calor latente de vaporização da água. Na Figura 5.41 apresentam-se os valores obtidos nos períodos de 2003 e 2004. Em 2006 a aplicação do método apenas permitiu obter a série de LE completa em dois dias, com um fecho do balanço de energia muito baixo, sendo a ET de 1.4 e 1.3 mm nos dias 9 e 10 de Novembro, respectivamente.

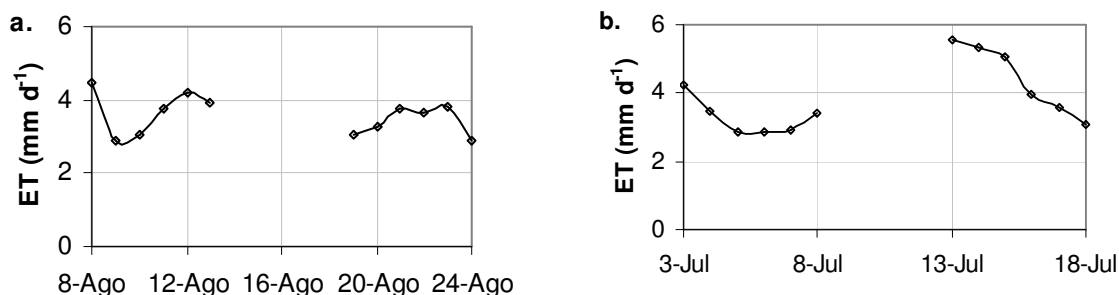


Figura 5.41 – Evapotranspiração cultural do pomar de actinidia medida em 2003 (a) e 2004 (b).

### 5.3.3 Método de Granier para a quantificação da transpiração

A medição da transpiração pelo método de Granier pretende constituir o fitomonitor da transpiração do coberto. Apesar das limitações apontadas ao método, analisadas em 4.2.3, este deverá ser, pelas características que apresenta, o melhor método para medições de longo termo e de baixo custo, características necessárias para integrar um sistema de fitomonitorização.

De seguida analisam-se alguns aspectos da aplicação, verificação e calibração do método em condições de campo em actinidia.

### 5.3.3.1. Observação dos GTN

Em estudos anteriores (Ferreira e Zitscher, 1996; Silva, 2002) constatou-se que os gradientes térmicos naturais (GTN) introduziam perturbações significativas no sinal de saída dos sensores ( $\Delta T$ ). Na Figura 5.42 apresentam-se os GTN observados em plantas do talhão T-I, durante o mês de Agosto nos anos de 2004, 2005 e 2006. Estes gradientes são significativamente inferiores aos verificados num estudo anterior nesta cultura realizado por Silva (2002) o que deverá estar relacionado com a boa protecção da radiação dos sensores – Figura 5.42. Considerando o valor dos GTN observados não se procedeu à sua correcção, realizando-se apenas a remoção de “picos” como o observado no dia 5 de Agosto de 2004 (Figura 5.42 b.).

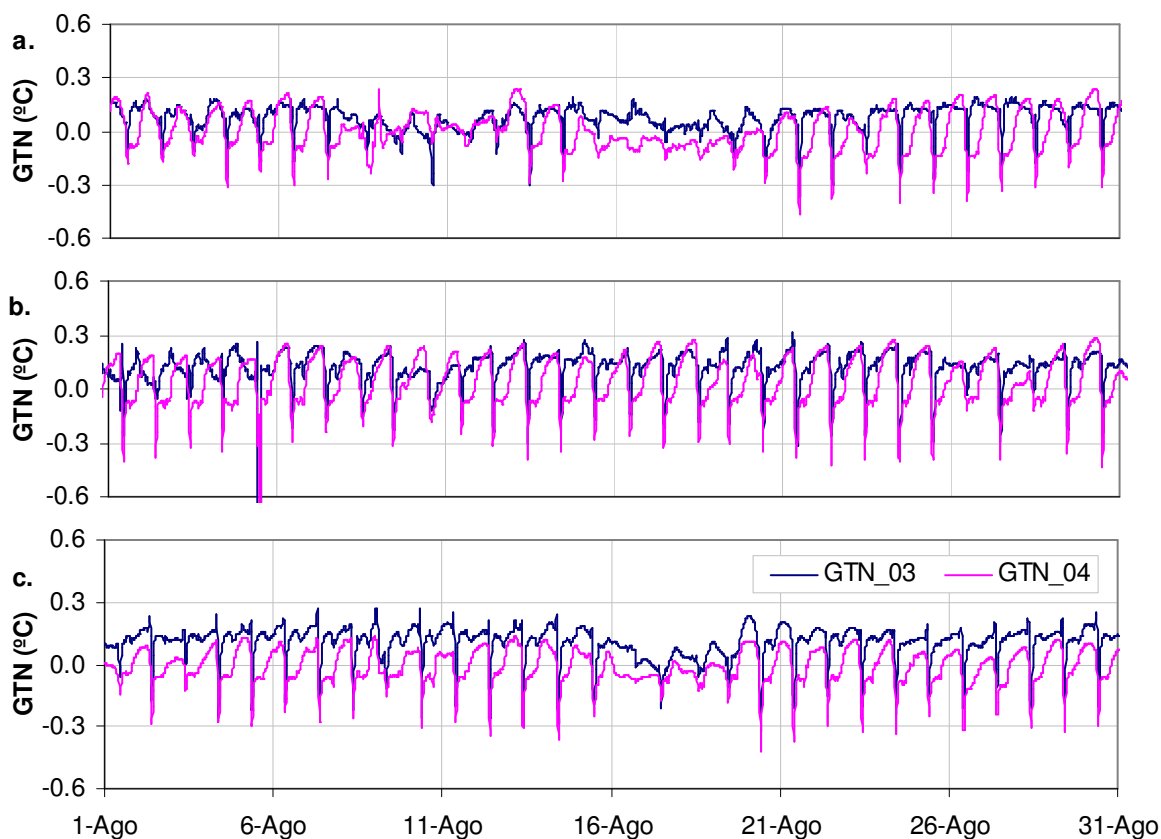


Figura 5.42 – Gradientes térmicos naturais (GTN) observados nos anos de 2004 (a), 2005 (b) e 2006 (c), durante o mês de Agosto, em plantas de T-I.

### 5.3.3.2. Determinação de $\Delta T_m$

Para a determinação de  $\Delta T_m$  foi utilizada a metodologia referida em 5.2.3.2. Neste caso, fez-se a determinação do máximo móvel de 7 dias sobre a série de  $\Delta T$  de cada sensor, seguido de uma média móvel de 5 dias sobre esta série.

### 5.3.3.3. Integração das medições pontuais para o nível do coberto

A integração das medições da densidade de fluxo de seiva para o nível do coberto, obriga a considerar alguns aspectos anatómicos da planta, do princípio de funcionamento do método e o

compasso e heterogeneidade do coberto. Atendendo ainda a que este estudo tem como objectivo desenvolver ferramentas aplicáveis para a gestão da rega ao nível da parcela, é necessário lidar com todos estes aspectos com o conjunto mínimo de medições possível. Deste modo, uma vez que se pretendia fazer a verificação e calibração do método em condições de campo, equiparáveis às de uma futura instalação prática, considerou-se a integração directa das medições pontuais para o nível do coberto. Ao instalar um conjunto de sensores num grupo de plantas do povoamento (com um ou dois sensores por planta) espera-se que se represente a variabilidade intraplanta (zonas mais e menos condutoras) e interplantas (heterogeneidade do coberto). A sustentar esta abordagem, Cohen *et al.* (2008) observou em 6 espécies florestais e 3 espécies fruteiras que a distribuição radial da densidade de fluxo de seiva com o azimute (à volta do tronco) tem uma variação similar à encontrada entre árvores do mesmo povoamento. A utilização de sensores de um só comprimento na observação do perfil radial permitirá integrar também este factor (perfil radial) na calibração do método em condições de campo, admitindo que não ocorrem alterações significativas ao longo do tempo da forma do perfil radial.

Com base no apresentado, a metodologia seguida neste estudo foi de considerar cada medição como um valor da amostra, realizar todo o processo de cálculo para determinação da densidade de fluxo medida pelo sensor e considerar o valor central da amostra como a densidade de fluxo média das plantas do povoamento. Esta densidade multiplicada pela secção condutora média por planta permitirá determinar o fluxo por planta (transpiração) ou, considerando a secção condutora por unidade de terreno, obter a transpiração do coberto em  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$  ou  $\text{dm}^3 \text{m}^{-2}$ , para a base de tempo considerada. Para a determinação da área da secção condutora dos troncos foram realizados levantamentos dendrométricos ao pomar em 2003 e 2006 (Tabela 5.6).

Tabela 5.6 – Dados do levantamento dendrométrico do pomar de actinidia para determinação da secção efectivamente condutora do tronco.

		2003	2004	2005	2006
N amostra		127			144
Perímetro médio do tronco	cm	33.06			33.75
Raio médio	cm	5.26			5.37
Espessura média da casca	cm	0.68			0.68
Área do borne	$\text{cm}^2$	65.94			69.13
Círculo central não condutor	$\text{cm}^2$	2.01			2.01
Secção condutora por planta	$\text{cm}^2$	63.93	64.99	66.05	67.11
Secção condutora por área de terreno	$\text{cm}^2 \text{m}^2$	3.20	3.25	3.30	3.36

Nota: os valores da secção condutora para os anos 2004 e 2005 foram obtidos por interpolação linear, tendo por base os valores do levantamento de 2003 e 2006.

#### 5.3.3.4. Verificação e calibração do método

A verificação da calibração do método seguiu a metodologia utilizada em lisímetro (5.2.3.3). Todavia, neste caso o termo de comparação foi estabelecido pela transpiração do coberto estimada

por diferença entre  $ET_c$ , medida pelo método das flutuações instantâneas e  $ET_{ei}$ , medida ou estimada. A  $ET_c$  do coberto corresponde ao fluxo de calor latente do coberto, obtida em 5.3.2. A evapotranspiração do estrato inferior ( $ET_{ei}$ ) é apresentada em 5.3.4.2.

Na Figura 5.43 apresenta-se a relação da transpiração do coberto obtida pelo método de Granier ( $T_{sf}$ ), por integração das medições pontuais para o nível do coberto, com a transpiração obtida por  $ET_c - ET_{ei}$ . Os valores de  $T_{sf}$  apresentados, correspondem à ausência de correcção de  $\Delta T$ . Numa publicação anterior Silva *et al.* (2007) considerou-se a correcção dos sensores de Granier de diferente comprimento, de forma independente. No entanto, a instalação de um conjunto de 12 sensores do mesmo tipo (20 mm) em 2006 permitiu analisar a dispersão da amostragem e concluir que não é seguro estabelecer uma correcção para o método com um número pequeno de sensores. Anteriormente tinha-se feito o ajustamento com um número mínimo de 4 sensores. Agora, reviu-se a correcção introduzida e considerou-se um factor de correcção, parâmetro  $a$  da Eq. [5.1], de 0.55 para os dois tipos de sensores (6 de 10 mm e 4 de 20 mm).

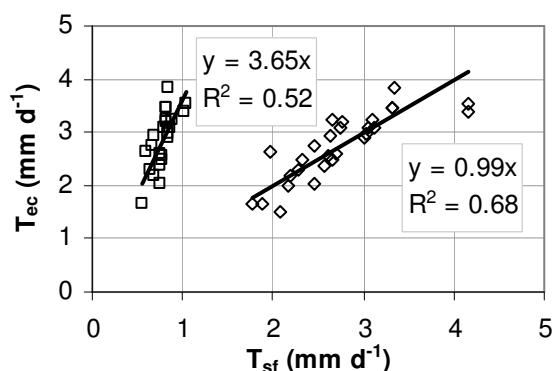


Figura 5.43 – Transpiração diária acedida através da medição do fluxo de seiva ( $T_{sf}$ ) e por combinação de técnicas EC-ML ( $T_{ec} = ET_c - ET_{ei}$ ): à esquerda apresenta-se a relação antes da introdução da correcção nos dados de  $\Delta T$ ; à direita apresenta-se a relação da transpiração após a introdução do factor de correcção  $a=0.55$  na Eq. [5.1]; dados dos períodos com medições de  $ET_c$  de 2003 e 2004.

Na Figura 5.44 apresenta-se uma sequência temporal dos fluxos obtidos pela integração das medições de fluxo de seiva e os obtidos por diferença  $ET_c - ET_{ei}$ , para os períodos de 2003 e 2004, verificando-se que as medições de fluxo de seiva permitem fazer uma boa estimativa da transpiração do coberto. Em 2006, a transpiração estimada por  $ET_c - ET_{ei}$  para os dias 9 e 10 de Novembro foi de  $1.1 \text{ mm d}^{-1}$  (ambos os dias) e a estimada pela integração das medições de fluxo de seiva foi de  $1.0 \text{ mm d}^{-1}$  (ambos os dias).

Como se considerou o mesmo factor de ajustamento para os dois tipos de sensores de Granier usados (10 e 20 mm), é necessário verificar se tal pressuposto é válido para garantir que alterando a proporção dos diferentes tipos de sensores na amostra não é introduzido um erro nos resultados. Na Figura 5.45 apresentam-se as medições realizadas durante o período de 2006, antecedente ao início da rega diferenciada nos talhões T-III, T-IV e T-V, verificando-se uma boa

concordância com a transpiração de T-I (talhão usado na calibração do método), neste período obtida pela amostragem de três sensores de 10 mm e um de 20 mm, usando mesmo factor de ajustamento.

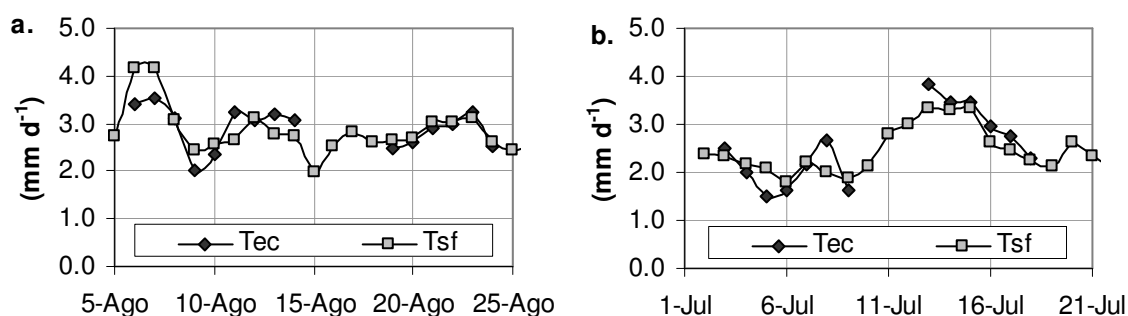


Figura 5.44 – Transpiração do coberto obtida por integração das medições de fluxo de seiva com correcção de  $\Delta T$  ( $T_{sf}$ ) e obtida por  $ET_c-ET_{ei}$  ( $T_{ec}$ ), nos períodos de 2003 (a.) e 2004 (b.).

Na Tabela 5.7 apresenta-se a avaliação do erro de estimativa da transpiração do coberto, considerando  $ET_c-ET_{ei}$  como referência.

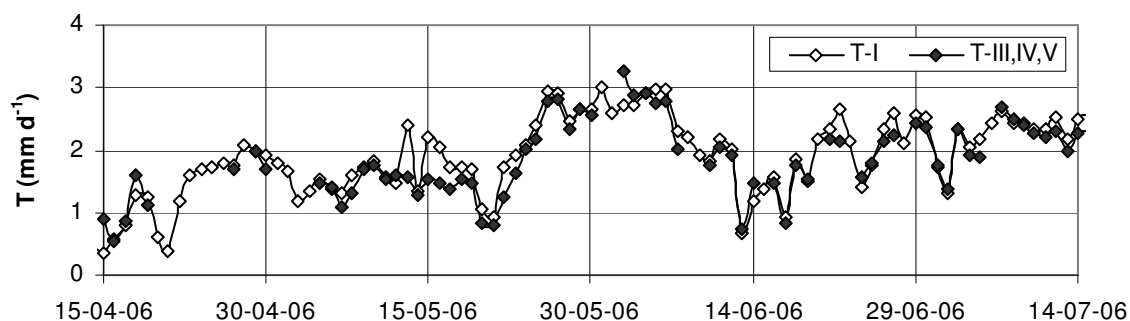


Figura 5.45 – Transpiração do talhão T-I e média da transpiração dos talhões T-III, T-IV e T-V, obtida por integração das medições de fluxo de seiva com correcção de  $\Delta T$ .

Tabela 5.7 – Estatísticas de avaliação da transpiração obtida pela integração das medições de fluxo de seiva do talhão T-I em relação à transpiração obtida por  $ET_c-ET_{ei}$ , nos períodos de 2003 e 2004.

	N	T (mm d <sup>-1</sup> )
BE	24	0.07
RMSE	24	0.35
MAE	24	0.28

### 5.3.4 Componentes do balanço hídrico do coberto

#### 5.3.4.1. Transpiração cultural

Os sensores de T-I estiveram instalados ao longo de todo o ensaio (2003 a 2006), com excepção dos sensores que apresentaram problemas de funcionamento e que foram removidos no decurso do ensaio. O número de sensores da amostra, após validação dos dados, é apresentado na Figura 5.46. Os períodos com ausência total de dados são resultado de falhas, quer na alimentação dos sensores (aquecimento), quer no funcionamento dos sistemas de aquisição de dados e, em alguns casos, na recolha dos dados.

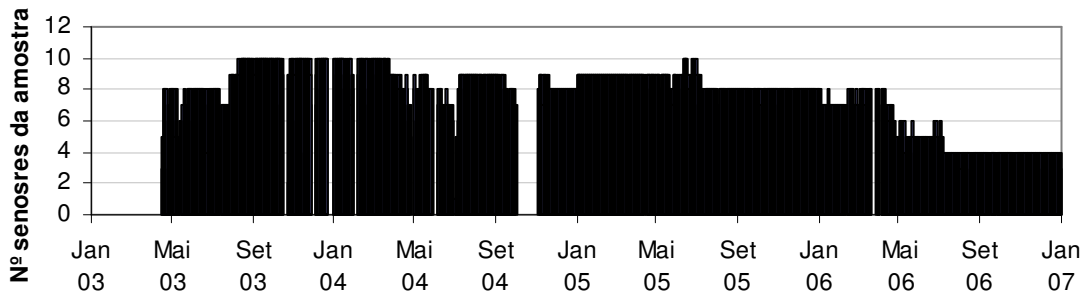


Figura 5.46 – Número de sensores de Granier da amostra disponível no talhão T-I para a determinação da transpiração do coberto, após análise e validação dos dados.

Com a amostra de sensores disponível, considerando um mínimo de 4 sensores, foi determinada a transpiração do coberto apresentada na Figura 5.47.

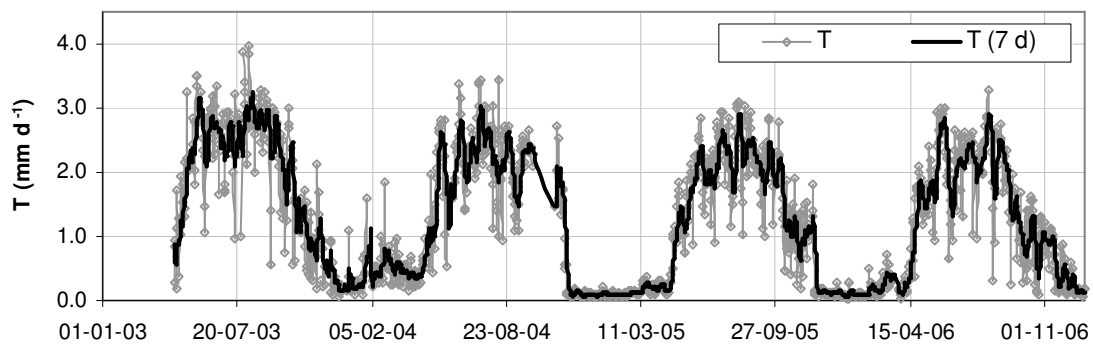


Figura 5.47 – Transpiração do coberto obtida pela amostragem dos sensores de fluxo de seiva instalados no talhão T-I, ao longo de todo o ensaio (2003 a 2006).

Na Figura 5.48 apresentam-se os mesmos resultados mas sobrepostos para o ciclo cultural. Neste gráfico, apesar da variabilidade diária, é identificável um padrão anual que corresponde ao desenvolvimento vegetativo da cultura e à ETo. Um aspecto a salientar é o prolongamento do ciclo até final de Novembro – meados de Dezembro com um inusitado aumento da transpiração perto do final do ciclo (mês de Novembro). Segundo alguns autores este comportamento poderá estar relacionado com a degradação do controlo estomático com o envelhecimento das folhas (Tromp *et al.*, 2005).

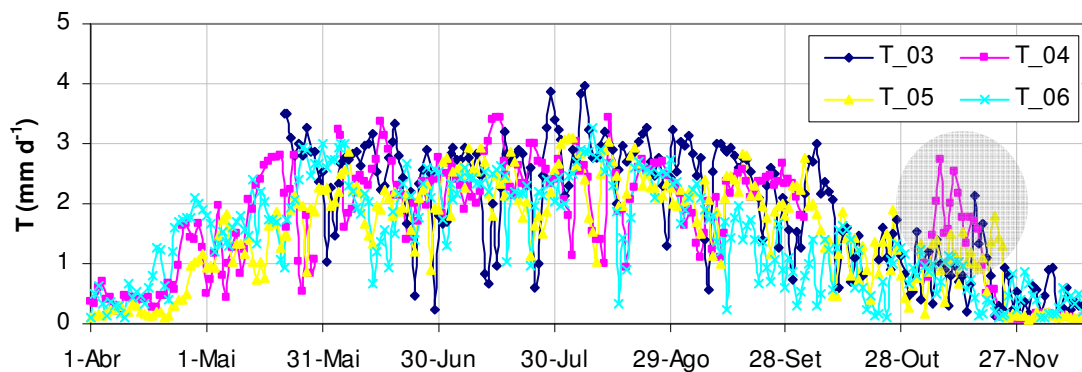


Figura 5.48 - Transpiração do coberto obtida pela amostragem dos sensores de fluxo de seiva instalados no talhão T-I, ao longo de todo o ensaio (2003 a 2006), sobreposta para o ciclo cultural.

Com base na transpiração e na ETo do local foram determinados os coeficientes culturais de base (Kcb) apresentados na Figura 5.49. Na Figura 5.50 apresenta-se o valor médio de Kcb obtido no período de 2003 a 2006. Nesta última figura, são facilmente identificáveis as diferentes fases do ciclo cultural: um período inicial de aumento da transpiração até final de Maio, altura em que apresenta um Kcb próximo de 0.6, com um padrão de variação sigmoidal; de Junho até final de Outubro verifica-se um aumento gradual de Kcb de 0.6 a 1.0; em Novembro ocorre um aumento anormal de Kcb para valores próximos de 1.2 ao qual sucede uma redução abrupta no final do ciclo.

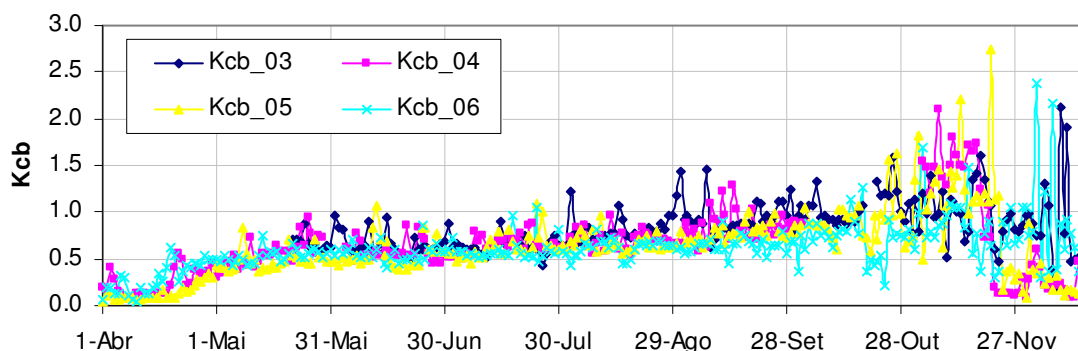


Figura 5.49 – Coeficiente cultural basal da cultura (Kcb) obtido para os anos de 2003 a 2006, com base na transpiração do talhão T-I.

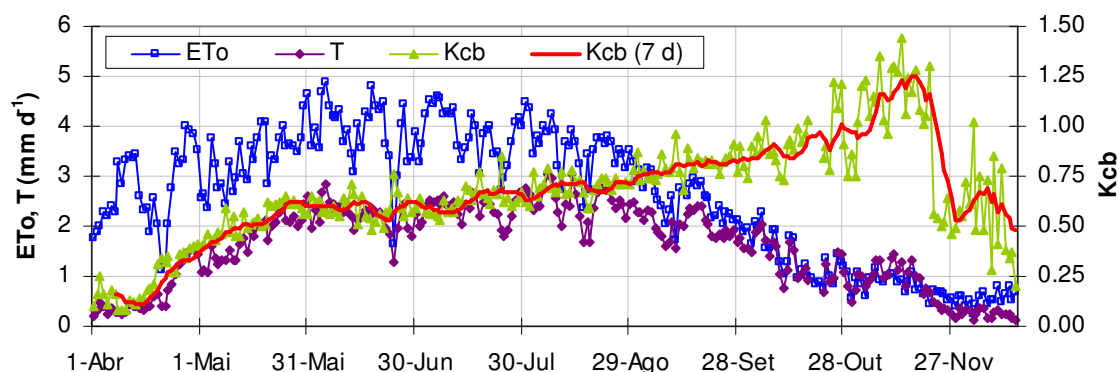


Figura 5.50 - Coeficiente cultural basal (Kcb) obtido pela média do coeficiente dos anos de 2003 a 2006 (mínimo três valores), com base na transpiração do talhão T-I e ETo do local.

### 5.3.4.2. Evapotranspiração do estrato inferior

#### ▪ Medida

A medição da evapotranspiração do estrato inferior do coberto (ETei) foi realizada com recurso a mini-lisímetros (ML), como apresentado em 4.2.5. Na Tabela 5.8 apresentam-se os fluxos medidos durante alguns dias dos períodos em que se realizaram medições micrometeorológicas sobre o coberto para a quantificação directa da evapotranspiração do coberto (ETc). Os valores obtidos resultam da média aritmética da variação diária de massa dos lisímetros instalados, considerando a área dos mini-lisímetros. De uma forma geral, ETei foi de 10% a 40% de ETo e ETc.

Tabela 5.8 – Valores de evapotranspiração diária do estrato inferior do coberto (ET<sub>ei</sub>), medidos com minilísimetros e relações com ET e E<sub>To</sub>.

	ET <sub>o</sub>	ET <sub>c</sub>	ET <sub>ei</sub>	ET <sub>ei</sub> /ET <sub>c</sub>	ET <sub>ei</sub> /ET <sub>o</sub>
13-08-2003	3.9	3.9	0.8	0.22	0.22
14-08-2003	3.8	3.7	0.8	0.22	0.22
15-08-2003	1.9				
16-08-2003	2.8				
17-08-2003	4.0				
18-08-2003	3.7		0.8		0.23
06-07-2004	3.6	2.6	1.2	0.47	0.35
07-07-2004	2.9	2.9	0.4	0.14	0.15
08-07-2004	3.0	3.5			
09-07-2004	2.7	2.6			
10-07-2004	3.7				
11-07-2004	4.7				
12-07-2004	4.8		1.9		0.40
13-07-2004	5.0	5.6	1.9	0.34	0.38
14-07-2004	5.0	5.2	1.2	0.23	0.24
15-07-2004	4.9	5.1	1.7	0.33	0.35
16-07-2004	4.3	3.9	1.1	0.29	0.26
08-11-2006	1.2		0.1		0.11
09-11-2006	1.2	1.4	0.3	0.20	0.24
10-11-2006	1.0	1.3	0.2	0.18	0.23

#### ▪ Estimada

Como apenas se procedeu à medição directa desta componente do balanço hídrico do coberto nos dias apresentados na Tabela 5.8 foi necessário estimar este fluxo através de um método indirecto. Esta estimativa era necessária para utilizar todos os dias de medição de ET<sub>c</sub>, com o método das flutuações instantâneas, na calibração do método de medição do fluxo de seiva de Granier e para permitir obter as séries anuais de evapotranspiração da cultura e os respectivos coeficientes culturais, informação com interesse para a gestão da rega.

Para a estimativa, recorreu-se ao método apresentado em Allen *et al.* (1998) para o cálculo do coeficiente de evaporação ( $K_e$ ), relativo à utilização dos coeficientes culturais duais. Este pomar apresentou ao longo do período de ensaios (2003 a 2004) uma cobertura do solo com erva, especialmente na entrelinha, pelo que se considerou  $Z_e$  (profundidade da camada de solo à superfície sobre a qual é considerada a depleção de água por evaporação) de 0.15 m, pretendendo-se desta forma reflectir a capacidade de extrair água pelo sistema radicular das infestantes. Neste pomar a rega é aplicada por microaspersão sob o copado, podendo-se observar na Figura 4.2 o aspecto do coberto. A geometria do coberto coloca a zona humedecida pela rega predominantemente abrigada da radiação solar directa, pelo que para efeitos de cálculo se considerou apenas 1/3 da área humedecida. Na Figura 5.51 apresentam-se os fluxos estimados para o período do ensaio, considerando a ET<sub>o</sub> do local, a precipitação ocorrida e as regas praticadas.

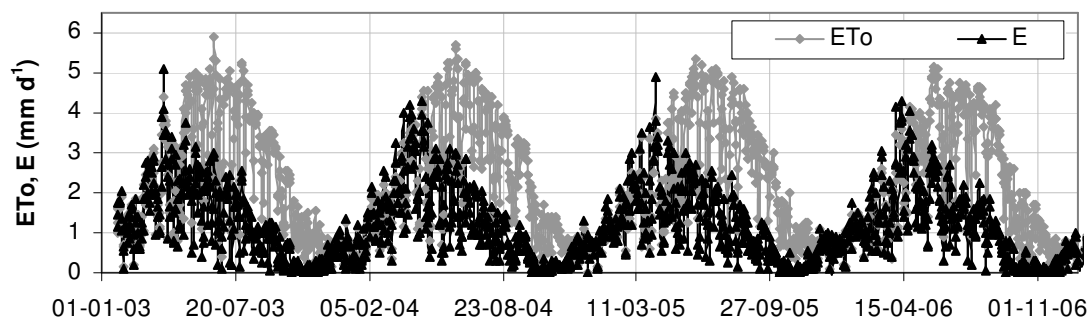


Figura 5.51 – Estimativa da evaporação do estrato inferior do coberto, com base no processo de cálculo descrito em Allen *et al.* (1998), para a estimativa do coeficiente de evaporação ( $K_e$ ).

▪ **Verificação da estimativa**

Utilizando as medições de  $E_{Tei}$  realizadas com ML, foi possível aferir a qualidade da estimativa da evaporação do solo realizada que, pelo facto do solo apresentar cobertura natural (infestantes), se considera como evapotranspiração do estrato inferior ( $E_{Tei}$ ). Na Figura 5.52 apresentam-se gráficos de avaliação da estimativa realizada, verificando-se uma razoável aderência da série estimada às medições realizadas, com excepção do período de 2006. No entanto, se considerarmos a grandeza dos fluxos observados nesta altura do ano, apesar do erro relativo da estimativa ser grande, o erro absoluto é pequeno. De referir que nenhum método de medição está isento de erro, em especial quando a medição tem de ser feita por amostragem, devido à variabilidade espacial da evaporação do solo num coberto anisotrópico pelo que, os desfasamentos verificados incorporam esta incerteza das medições, tomadas como referência.

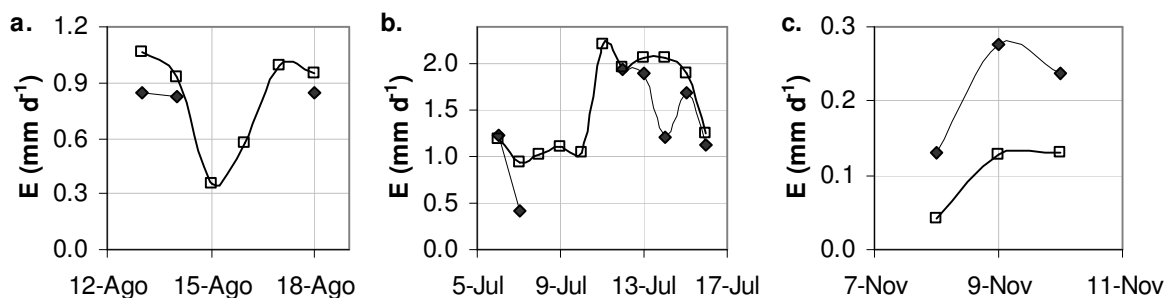


Figura 5.52 – Evaporação do solo, medida (pontos cheios) e estimada (pontos vazios), 2003 (a.), 2004 (b.) e 2006 (c.).

▪ **Coefficiente de evaporação do coberto ( $K_e$ )**

Com base na estimativa de  $E_{Tei}$  foi determinado o valor de  $K_e$ , segundo a metodologia do coeficiente cultural dual da metodologia da FAO (Allen *et al.*, 1998; Figura 5.53). O valor atingiu o máximo na Primavera, oscilando entre 0.8 e 1.2, para decrescer gradualmente até ao final do Verão.

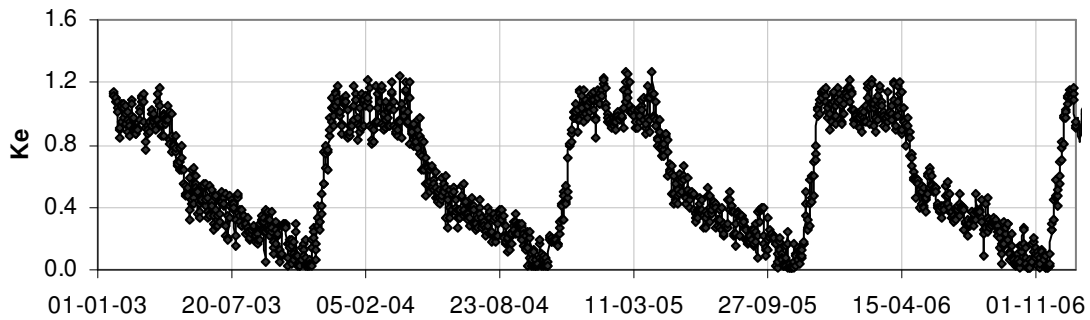


Figura 5.53 – Coeficiente de evaporação ( $K_e$ ) do coberto de actinidia ao longo do ensaio.

### 5.3.4.3. Estimativa da evapotranspiração cultural

Com base na transpiração medida pelo método de Granier e na evaporação do solo estimada, foi possível estimar a evapotranspiração cultural para o período do ensaio, como apresentado na Figura 5.54.

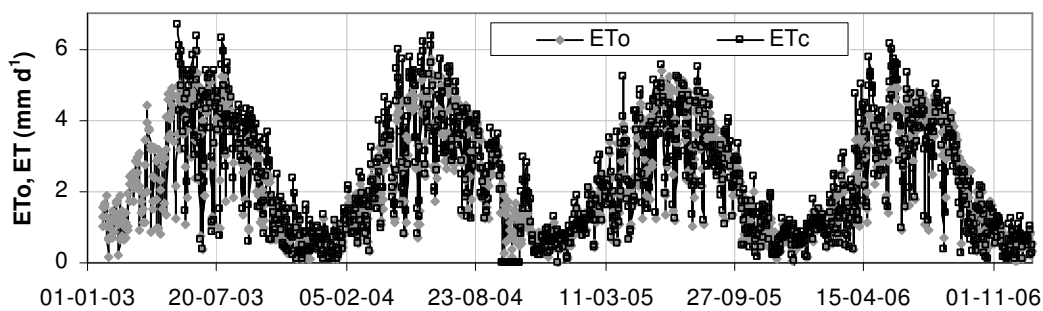


Figura 5.54 – Evapotranspiração cultural ( $ET_c$ ) do coberto de actinidia ao longo do período do ensaio.

Estes valores de  $ET_c$  quando convertidos no coeficiente cultural correspondente ( $K_c$ ), resultam nos valores apresentados na Figura 5.55.

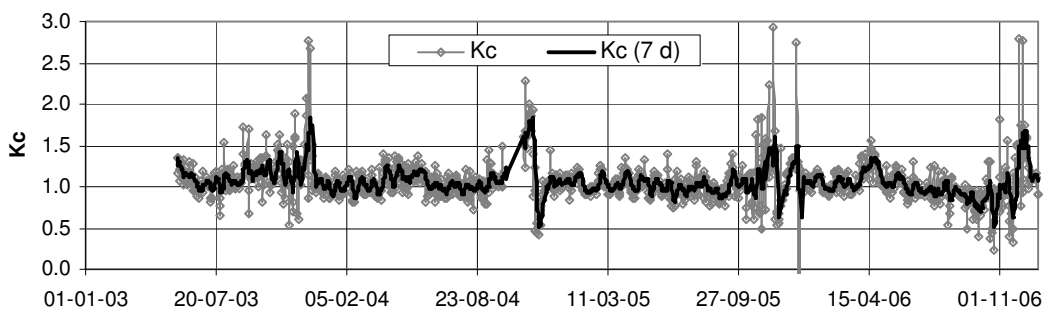


Figura 5.55 – Coeficiente cultural ( $K_c = K_{cb} + K_e$ ) diário do coberto de actinidia, ao longo do período do ensaio.

### 5.3.4.4. Necessidades hídricas

O resumo dos fluxos medidos e estimados no coberto de actinidia é apresentado na Tabela 5.9. Os coeficientes culturais médios, para uma melhor interpretação, foram representados na Figura 5.56. O coeficiente cultural estimado é próximo de 1.0 e como se trata de uma cultura perene que ocupa ininterruptamente o solo, apresenta-se o valor de  $K_c$  para todo o ano civil, correspondendo nos meses de Dezembro (parte) a Março, à evaporação do solo que neste local, devido à precipitação (elevada e frequente) é sempre elevado. Os coeficientes  $K_{cb}$  e  $K_e$  variam em

ordem inversa, uma vez que o seu somatório é sempre próximo de 1.0, com excepção do início e término da fase vegetativa da cultura, invertendo-se as posições relativas em Maio e Dezembro, quando se igualam.

Tabela 5.9 – Componentes do balanço hídrico e coeficientes culturais do coberto de actinidia medidos e estimados no período do ensaio de 2003 a 2006.

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO	
<b>ET<sub>o</sub></b> (mm)	2003	<b>22</b>	29	62	76	123	113	117	108	78	43	22	17	811
	2004	17	38	57	88	98	125	126	98	76	36	27	19	806
	2005	25	37	57	71	99	116	118	113	79	44	23	19	802
	2006	24	32	43	83	109	114	118	116	67	37	22	15	781
<b>T</b> (mm)	2003	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>17</b>	<b>64</b>	71	75	87	71	46	23	6	459
	2004	0	0	0	20	55	72	80	69	62	<b>32</b>	31	2	423
	2005	0	0	0	10	46	60	71	75	61	40	26	4	392
	2006	0	0	0	26	58	63	68	73	43	27	19	5	382
<b>E</b> (mm)	2003	<b>24</b>	28	59	71	68	49	47	30	21	8	3	15	424
	2004	18	39	57	82	57	56	45	29	19	4	6	18	429
	2005	27	38	59	67	56	48	43	34	20	6	4	18	421
	2006	26	33	45	80	59	51	42	39	15	4	3	14	412
<b>ET</b> (mm)	2003	24	28	59	88	132	120	122	116	92	53	26	21	883
	2004	18	39	57	102	112	128	125	98	81	36	37	19	851
	2005	27	38	59	77	102	108	114	109	81	46	30	22	813
	2006	26	33	45	106	118	114	109	112	58	31	22	19	794
<b>K<sub>cb</sub></b>	2003					0.63	0.64	0.80	0.91	1.05	1.04	0.35		
	2004	0.00	0.00	0.00	0.23	0.56	0.57	0.63	0.70	0.81	1.18	0.09		
	2005	0.00	0.00	0.00	0.14	0.46	0.52	0.60	0.66	0.77	0.90	1.10	0.22	
	2006	0.00	0.00	0.00	0.31	0.53	0.55	0.57	0.63	0.65	0.74	0.87	0.29	
	<b>Média</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.23</b>	<b>0.52</b>	<b>0.57</b>	<b>0.61</b>	<b>0.70</b>	<b>0.78</b>	<b>0.89</b>	<b>1.05</b>	<b>0.24</b>	<b>0.47</b>
<b>K<sub>e</sub></b>	2003		0.98	0.96	0.93	0.55	0.43	0.40	0.27	0.27	0.18	0.15	0.90	
	2004	1.02	1.03	1.00	0.93	0.58	0.45	0.35	0.30	0.24	0.11	0.21	0.95	
	2005	1.10	1.01	1.02	0.95	0.56	0.42	0.36	0.30	0.26	0.14	0.18	0.96	
	2006	1.09	1.03	1.04	0.97	0.54	0.45	0.35	0.34	0.22	0.11	0.13	0.93	
	<b>Média</b>	<b>1.07</b>	<b>1.01</b>	<b>1.01</b>	<b>0.94</b>	<b>0.56</b>	<b>0.43</b>	<b>0.37</b>	<b>0.30</b>	<b>0.25</b>	<b>0.14</b>	<b>0.17</b>	<b>0.94</b>	<b>0.60</b>
<b>K<sub>c</sub></b>	2003					1.06	1.04	1.08	1.18	1.23	1.20	1.25		
	2004	1.02	1.03	1.00	1.15	1.14	1.02	0.99	1.00	1.06	1.39	1.04		
	2005	1.10	1.01	1.02	1.10	1.02	0.93	0.96	0.96	1.03	1.04	1.28	1.18	
	2006	1.09	1.03	1.04	1.28	1.07	1.00	0.92	0.97	0.86	0.85	1.00	1.22	
	<b>Média</b>	<b>1.07</b>	<b>1.01</b>	<b>1.01</b>	<b>1.17</b>	<b>1.08</b>	<b>1.00</b>	<b>0.98</b>	<b>1.00</b>	<b>1.03</b>	<b>1.03</b>	<b>1.22</b>	<b>1.17</b>	<b>1.06</b>

Os valores a negrito sobre fundo mais escuro foram estimados com base na ETo mensal do local e coeficientes correspondentes; devido à reduzida importância do valor em falta de ETo de Janeiro de 2003, este foi estimado directamente pela média deste mês nos restantes anos.

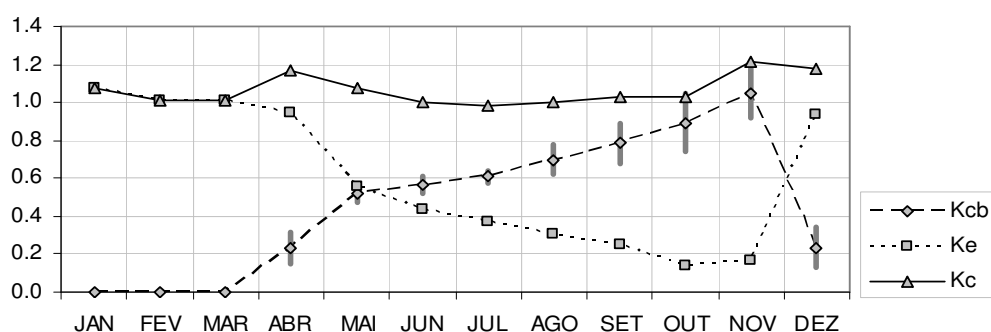


Figura 5.56 – Coeficientes culturais do coberto de actinidia, obtidos pela média dos coeficientes verificados no pomar de Briteiros no período de 2003 a 2006 (média de pelo menos três anos, as barras verticais na série Kcb correspondem a  $\pm$  desvio padrão).

## 5.4 Dispositivo III (pomar – 2006)

Obtida a verificação e calibração do método de Granier e após um ano de ensaios em lisímetro das medições microdendrométricas para a determinação do estado hídrico das plantas, deu-se início a um ensaio no pomar de Briteiros no qual se pretendia testar um dispositivo de monitorização da transpiração e estado hídrico da cultura. Como apresentado em 4.4.3 procedeu-se à instalação de três novos talhões, T-III, T-IV e T-V, nos quais foram praticados diferentes regimes hídricos. O principal objectivo da introdução da variação na rega fornecida aos talhões era obter condições para desenvolver e testar a quantificação do estado hídrico das plantas.

### 5.4.1 Regime e estado hídrico do solo

Começam-se por apresentar as condições impostas/verificadas ao longo deste ensaio, de forma a contextualizar os resultados obtidos.

#### ▪ Regime hídrico

O regime hídrico foi avaliado pela precipitação verificada, estimativa da precipitação efectiva resultante e pelas dotações de rega aplicadas a cada talhão. Na Figura 5.57 e Figura 5.58 apresentam-se graficamente os regimes hídricos criados, operação que foi dificultada pela quantidade significativa de precipitação ocorrida a meados de Agosto.

Como representado na Figura 5.58, a água fornecida (rega + precipitação) a T-III no final do ensaio correspondia praticamente à transpiração do pomar (T-I). Neste talhão pretendia-se impor um regime hídrico de maior carência, pela redução das dotações de rega a partir de 12 de Julho, mas a grande quantidade de precipitação ocorrida a meados de Agosto aliviou as restrições. No talhão T-IV, a rega foi conduzida de forma a manter as plantas em conforto hídrico, pelo que as regas praticadas corresponderam à ETc, permitindo-se contudo a utilização de parte do armazenamento hídrico do solo. No talhão T-V, a rega foi conduzida da mesma forma até 12 de Julho, altura em que as dotações de rega passaram para 150% do talhão T-IV. Este aumento da dotação foi obtido pelo aumento do débito dos emissores e da área regada. Deste modo, pretendia-se avaliar possíveis constrangimentos hidráulicos do solo/sistema radicular.

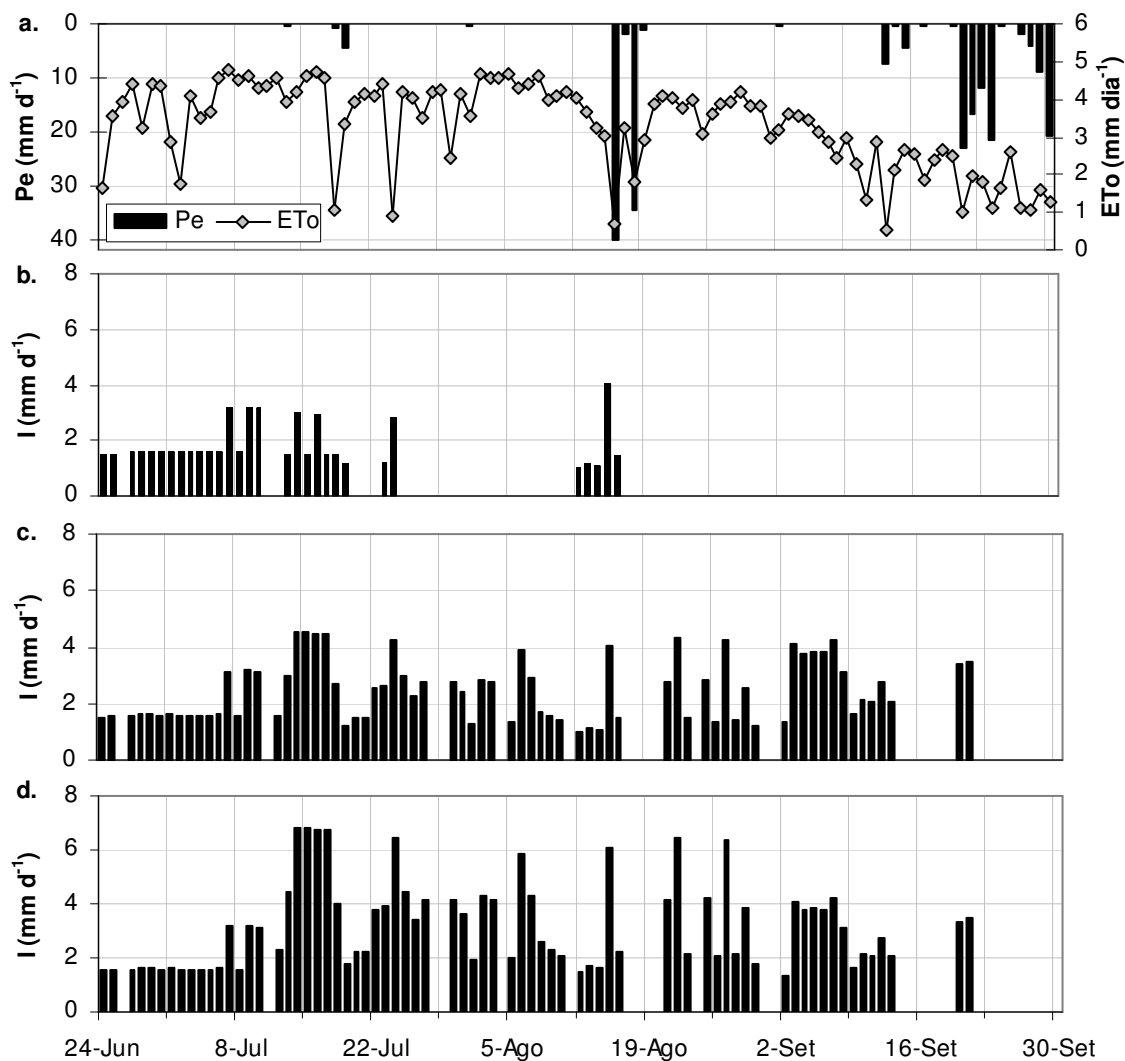


Figura 5.57 – Regimes hídricos impostos aos diferentes talhões: a. precipitação efectiva verificada durante o ensaio ( $Pe=P-0.2ETo$ ); b., c. e d. dotações de rega aplicadas aos talhões T-III, T-IV e T-V, respectivamente.

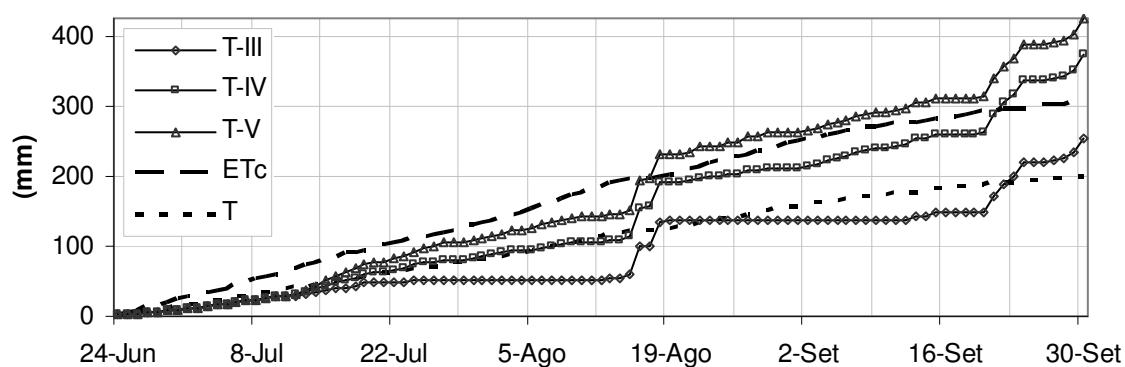


Figura 5.58 – Quantidade de água aplicada em cada um dos talhões (precipitação e rega):  $ETc$ , evapotranspiração do coberto obtida pela soma da transpiração do talhão T-I com a estimativa de E; T, transpiração do talhão T-I.

#### ▪ Estado hídrico do solo

O estado hídrico do solo foi monitorizado em alguns pontos, como referido em 4.4.3, podendo-se observar na Figura 5.59 e Figura 5.60 a sua evolução.

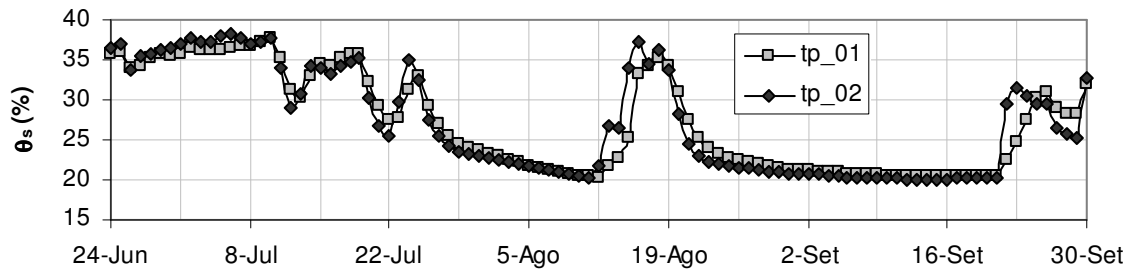


Figura 5.59 – Teor de água do solo no talhão T-I a 25 cm de profundidade na zona abrangida pelo sistema de rega.

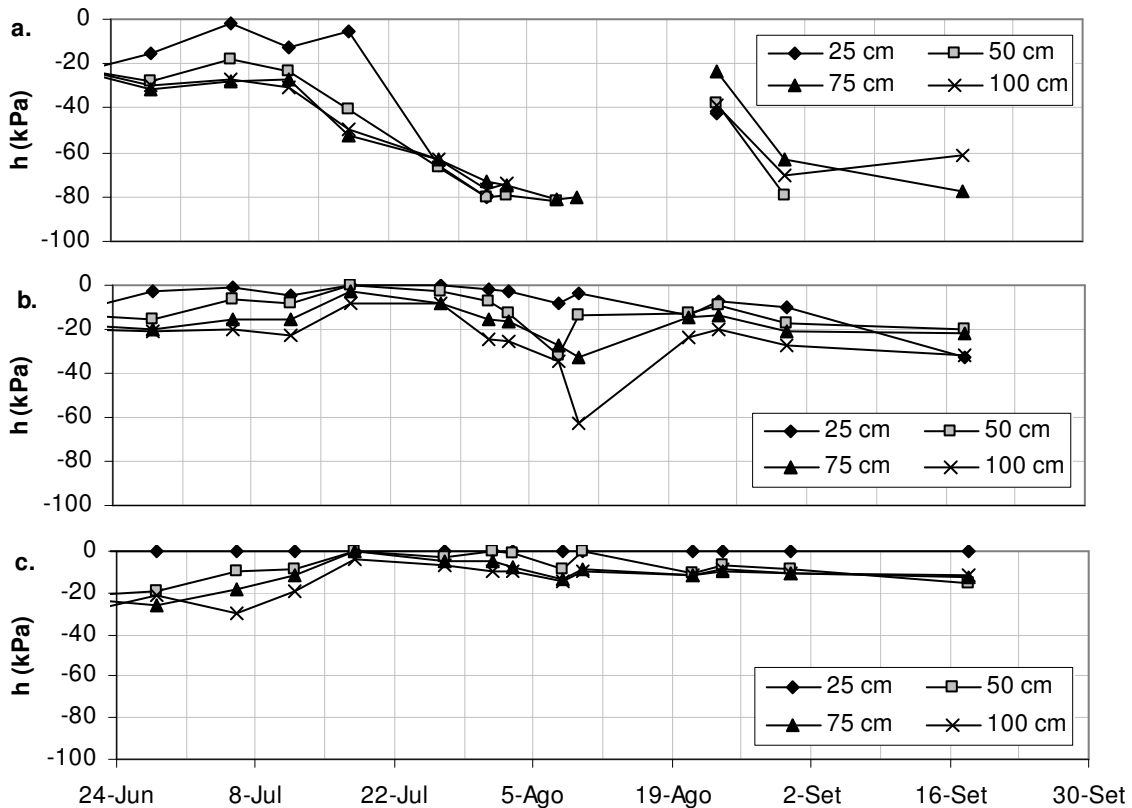


Figura 5.60 – Pressão efectiva da água no solo, medida com tensiómetros, nos talhões T-III (a), T-IV (b) e T-V (c), a diferentes profundidades na zona abrangida pelo sistema de rega.

### 5.4.2 Estado hídrico da planta

Tal como realizado em lisímetro em 2005, o estado hídrico das plantas neste ensaio foi observado, para o desenvolvimento dos indicadores do estado hídrico da planta baseados nas medições microdendrométricas da variação do diâmetro de órgãos. Os valores aqui observados permitem também assegurar que os fluxos medidos no talhão T-I correspondem a uma situação de pleno conforto hídrico e deste modo o coeficiente cultural encontrado corresponde ao valor máximo cultural.

- **Potencial hídrico**

O potencial hídrico foi medido periodicamente ao longo do ensaio realizando-se três medições em cada dia: o período compreendido entre o nascer e pôr-do-sol foi dividido 4 partes, realizando-se medições nos momentos próximos de  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  deste período<sup>19</sup>. Com esta metodologia pretendia-se realizar medições ao longo do período do ensaio em condições comparáveis. Na Figura 5.61 apresentam-se as medições do potencial hídrico do ramo realizadas.

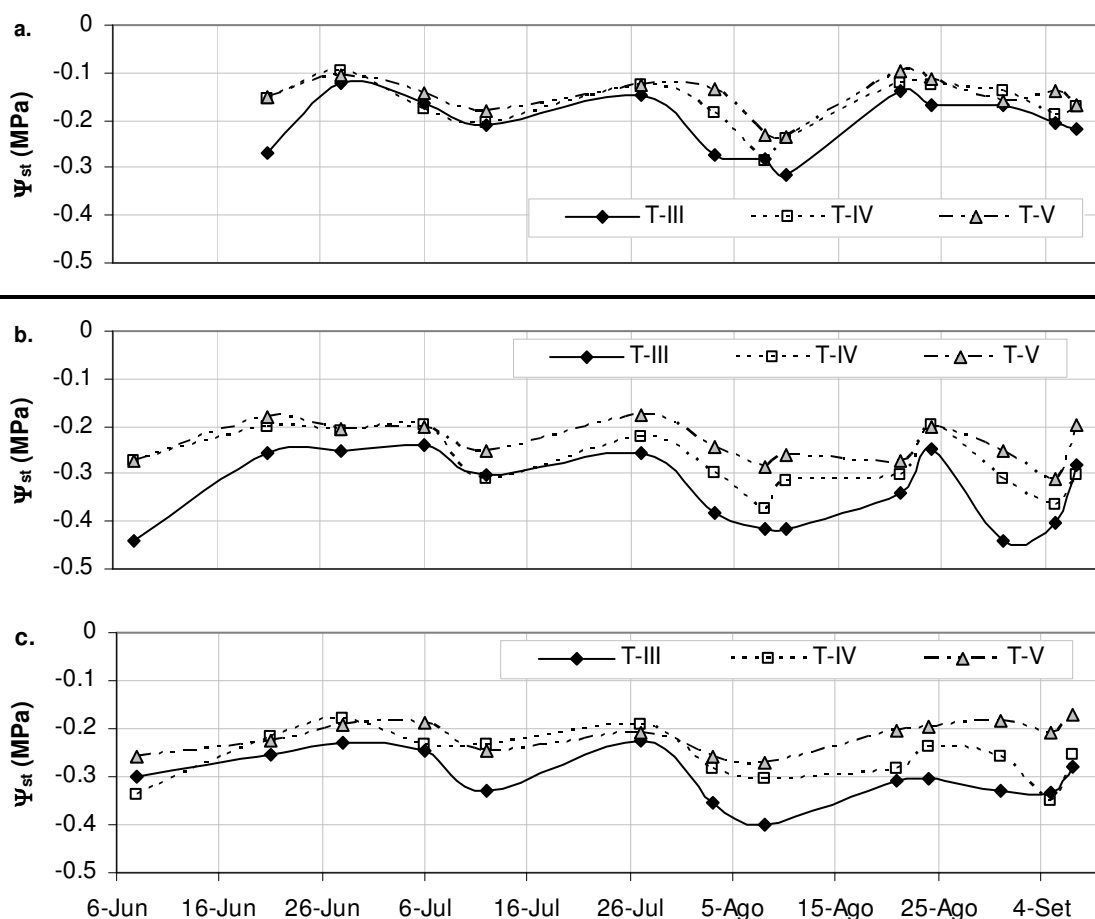


Figura 5.61 – Potencial hídrico do ramo medido ao longo do período de ensaios em 2006 no pomar: a. potencial medido a  $\frac{1}{4}$  do dia solar, b. potencial medido ao meio-dia solar e c. potencial medido a  $\frac{3}{4}$  do dia solar.

Na Figura 5.62 apresentam-se, para três dias, as curvas de variação diária do estado hídrico das plantas. Nesta figura, tal como na anterior é notório o potencial hídrico mais baixo do talhão T-III em relação aos outros talhões, em especial na medição do meio-dia. Apesar de inferior, o potencial hídrico foi sempre bastante superior ao observado na planta em lisímetro onde se registaram valores inferiores a -1.5 MPa (vd. 5.2.4).

<sup>19</sup> Para a determinação da hora do nascer e pôr-do-sol, utilizou-se o processo de cálculo apresentado em Allen *et al.* (1998) para a determinação da duração do dia, verificado pela informação da página <http://www.timeanddate.com>, para o local dos ensaios.

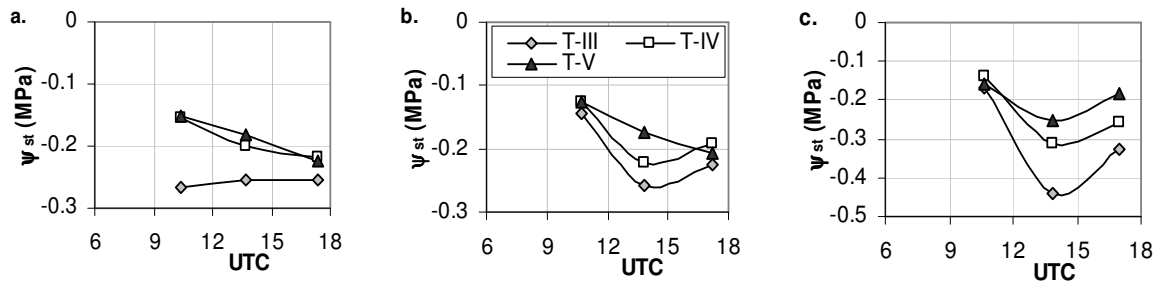


Figura 5.62 – Cinéticas diárias de potencial hídrico do ramo verificadas em três dias durante os ensaios em 2006 no pomar: a. 21 de Junho, b. 27 de Julho e c. 31 de Agosto.

▪ **Condutância estomática**

A condutância estomática foi medida nos mesmos momentos que o potencial hídrico, apresentando-se na Figura 5.63 as observações relativas ao meio-dia solar.

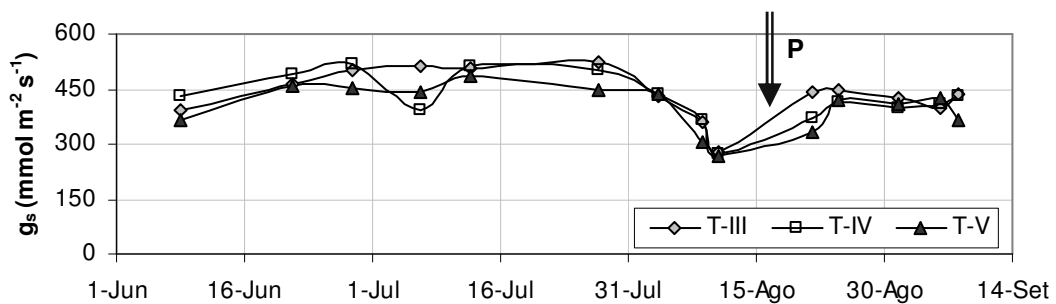


Figura 5.63 – Condutância estomática medida ao meio-dia solar, durante os ensaios em 2006 no pomar, indicando-se a ocorrência de uma forte chuvada no período apresentado (P).

Na Figura 5.64 apresenta-se a relação entre o potencial hídrico do ramo e a condutância estomática medida. Como ilustrado na Figura 5.63, as plantas do talhão T-III, apesar do potencial hídrico ligeiramente mais baixo que apresentaram, conseguiram manter a mesma condutância estomática em relação aos outros talhões, pelo que na representação da Figura 5.64 é visível a manutenção da condutância estomática a níveis mais baixos de potencial hídrico.

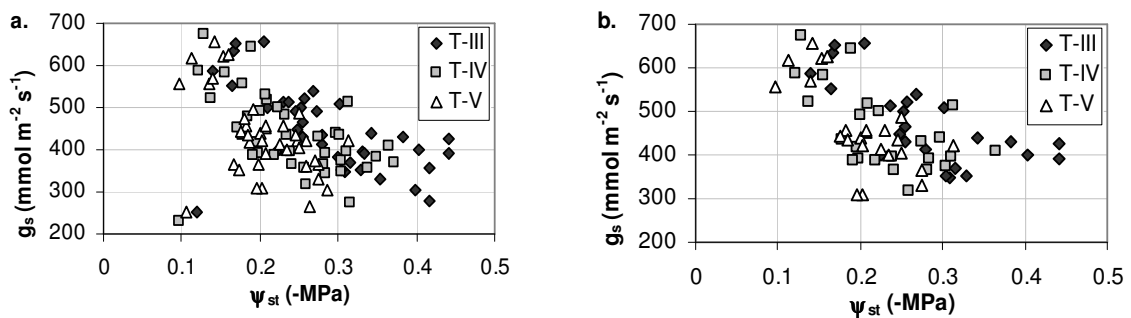


Figura 5.64 - Resposta da condutância estomática ( $g_s$ ) à variação do potencial hídrico do ramo ( $\psi_{st}$ ): a. relação com todos os valores observados no ensaio; b. relação com os valores observados com PAR superior a  $1500 \text{ mmol s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ; dados das observações realizadas no pomar em 2006.

### 5.4.3 Medições do fluxo de seiva

#### 5.4.3.1. Análise à amostragem realizada

Desde o início dos estudos das medições do fluxo de seiva nesta espécie lenhosa ainda não se tinha disposto de um grupo tão alargado de sensores de Granier do mesmo tipo, instalados no mesmo momento. Tirando partido dos 12 sensores (de 20 mm) instalados neste ensaio nos três talhões, que até ao início da rega diferenciada se consideram estar nas mesmas condições, procedeu-se à análise de variância da amostra e o correspondente intervalo de confiança da média. Na Figura 5.65 apresentam-se os fluxos médios obtidos directamente a partir de cada um dos sensores, verificando-se uma grande variabilidade dos resultados obtidos.

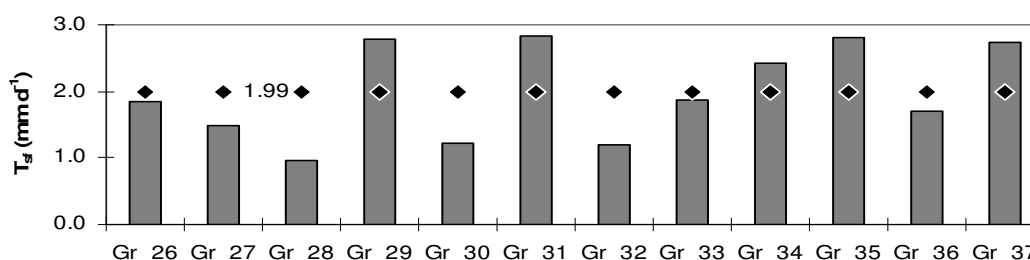


Figura 5.65 – Valores médios de transpiração de 21 dias, no período 10 de Junho a 10 de Julho, obtida pela integração da densidade de fluxo de seiva registada por cada um dos 12 sensores instalados em 2006 nos talhões do pomar T-III, T-IV e T-V (os losangos representam o valor médio da amostra).

Como se considera a média como o valor central da amostra, sendo esta utilizada para a determinação da transpiração do coberto, é conveniente ter conhecimento da incerteza associada a este parâmetro estatístico em função da amostragem realizada. Na Figura 5.66 apresenta-se a análise estatística da média aritmética, tendo-se determinado o intervalo de confiança (IC) deste valor central da amostra. A um nível de significância de 95 % ( $\alpha=0.05$ ) temos certeza que a média calculada com uma amostra de 12 sensores apresenta um erro inferior a 20 % em relação à média da população, ou seja a medição tem um erro máximo de 20 %. Este valor passa para valores superiores a 30 % quando consideramos uma amostra de apenas 4 sensores. Do gráfico desta figura pode-se concluir que as observações seguem uma distribuição normal, pelo que é válido considerar a média aritmética como o valor central da amostra.

	Todas	T-III	T-IV	T-V
<b>N</b>	12	4	4	4
<b>Média</b>	mm 1.99	1.76	1.78	2.42
<b>Des.Padrão</b>	mm 0.70	0.77	0.76	0.50
<b>IC (<math>x_m \pm</math>)</b>	mm 0.40	0.76	0.75	0.49
<b>alfa=0.05</b>	% 19.9	38.0	37.6	24.8
<b>IC (<math>x_m \pm</math>)</b>	mm 0.26	0.49	0.49	0.32
<b>alfa=0.20</b>	% 13.0	24.9	24.6	16.2

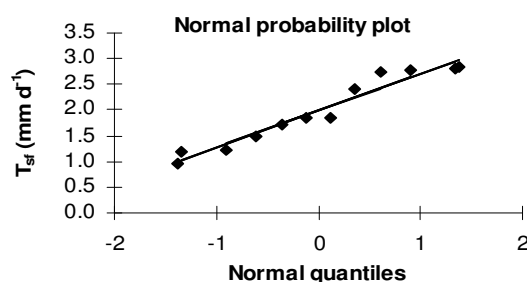


Figura 5.66 – Estatísticas do grupo de 12 sensores (Todas) e das amostras de sensores consideradas pelos talhões T-III, T-IV e T-V; gráfico dos fluxos medidos pelos sensores considerando uma distribuição normal das observações.

### 5.4.3.2. Transpiração dos talhões T-III, T-IV e T-V

#### ■ Transpiração normalizada

Considerando a análise efectuada à amostragem e o número de sensores instalados por talhão para a quantificação da transpiração (4 ou 5 sensores), procedeu-se à normalização dos valores medidos por cada sensor em relação à média dos sensores dos 3 talhões, considerando o período anterior ao início da rega diferenciada nos talhões. Procedimento semelhante foi utilizado por Ferreira *et al.* (1996) e Naor e Cohen (2003) para reduzir a variabilidade da medição e utilizar a transpiração relativa como indicador do estado hídrico. Na Figura 5.67 apresenta-se a transpiração de cada um dos talhões com normalização das medições.

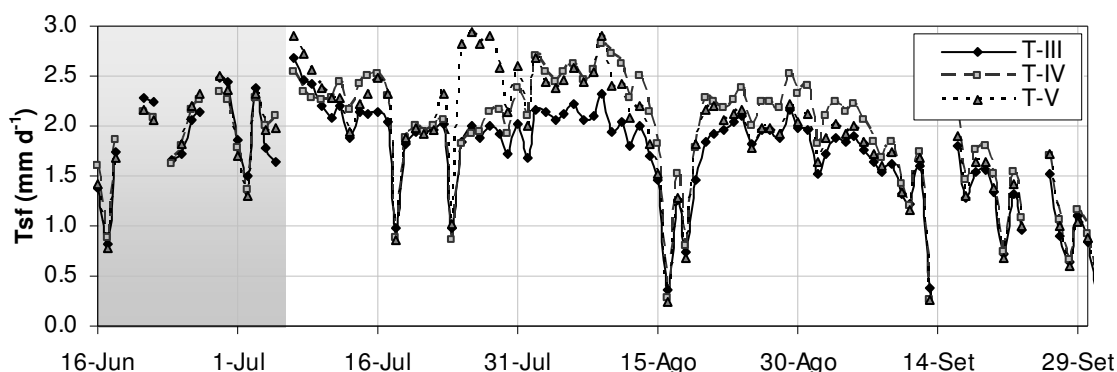


Figura 5.67 – Transpiração obtida pela integração das medições de fluxo de seiva com normalização de cada um dos sensores em relação à média dos sensores dos três talhões durante o período a sombreado; dados do ensaio de 2006 no pomar.

A redução da transpiração em T-V após 15 de Agosto deverá estar relacionada com a sensibilidade desta espécie ao encharcamento do solo (Savé e Serrano, 1986).

#### ■ Transpiração relativa

A transpiração relativa, apresentada na Figura 5.68, foi estabelecida considerando T-IV como termo de comparação, talhão no qual se manteve a dotação de rega praticada no restante pomar. Atendendo às dotações de rega praticadas (Figura 5.57) e ao estado hídrico do solo (Figura 5.59 e Figura 5.60) a variação da transpiração nos talhões T-III e T-V, face a T-IV, foi bastante rápida. Outro aspecto a salientar são os aumentos bruscos em T-III com a hidratação do solo. Em relação a T-V, talhão no qual as dotações de rega foram aumentadas em relação ao pomar, houve um aumento inicial da transpiração seguido de uma redução gradual para valores inferiores a T-IV. Este facto, considerando as leituras do estado hídrico do solo neste talhão apresentadas na Figura 5.60, é indicador de uma situação de excesso de água no solo e falta de arejamento. O aumento inicial neste talhão, considerando que T-IV está em conforto hídrico (Figura 5.61) poderá ser justificado pelo facto do aumento da dotação de rega em T-V ter sido obtido pela colocação de gotejadores espaçados 1 m ao longo das linhas, o que fez aumentar o volume de solo humedecido pela rega.

Desta forma, aumentou-se a extensão do sistema radicular com acesso a água do solo com maior potencial hídrico.

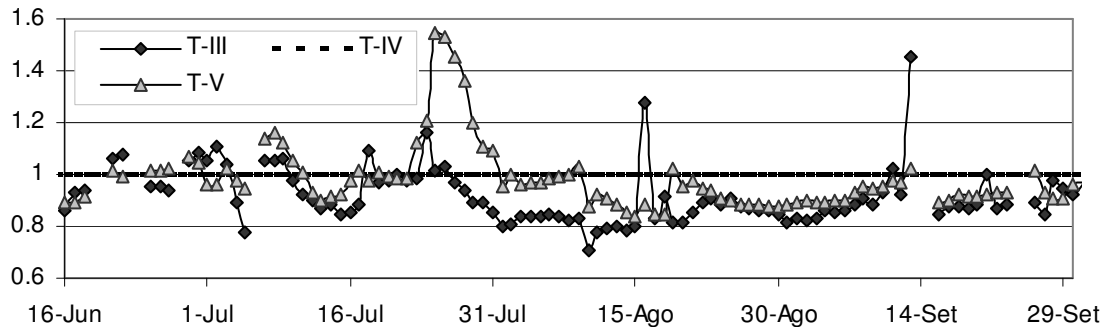


Figura 5.68 - Transpiração relativa dos talhões T-III e T-V em relação a T-IV; dados do ensaio de 2006 em pomar.

Segundo um estudo comparativo de indicadores do estado hídrico realizado por Naor e Cohen (2003), a transpiração relativa por ser um índice de integração diária é pouco sensível. A integração diária oculta o stress hídrico verificado durante parte do dia. Acresce a dificuldade de obter a referência, o que contudo pode ser obstado com o uso de uma referência climática, como já referido em 3.2.1.1.

#### 5.4.4 Microdendrometria para a determinação do estado hídrico da planta

A determinação do estado hídrico da planta, com base em medições microdendrométricas, seguiu o processo apresentado em 5.2.5. Na Figura 5.69 apresentam-se alguns dos valores observados neste estudo.

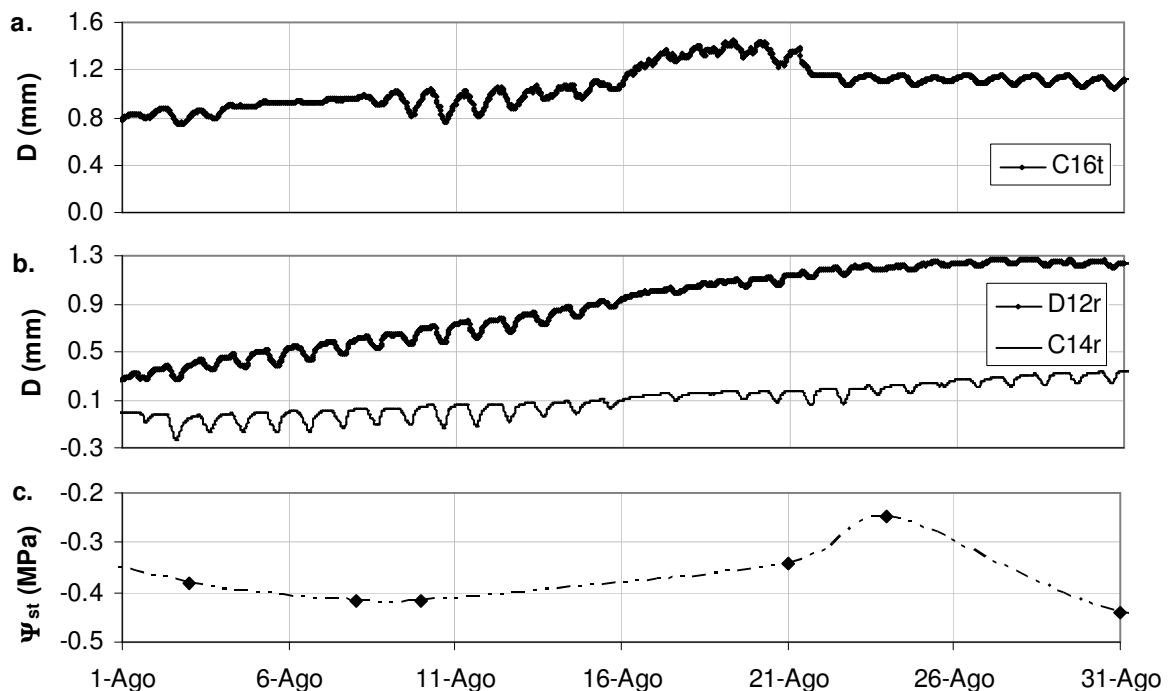


Figura 5.69 – a. e b. variação do diâmetro do tronco registada pelos sensores nas plantas do talhão T-III, C16 (tronco), D12 (ramo) e C14 (ramo); c. potencial hídrico do ramo observado em T-III ao meio-dia solar.

Como observado em 5.2.5, o índice MDS.(1-OGR) apresenta uma relação logarítmica com o potencial hídrico do ramo. Neste dispositivo experimental testaram-se diversas soluções quanto ao local de instalação (tronco e ramo) e à estrutura de fixação do sensor ao órgão. Na Figura 5.70 apresenta-se a comparação para os sensores do talhão T-III, instalados em ramos.

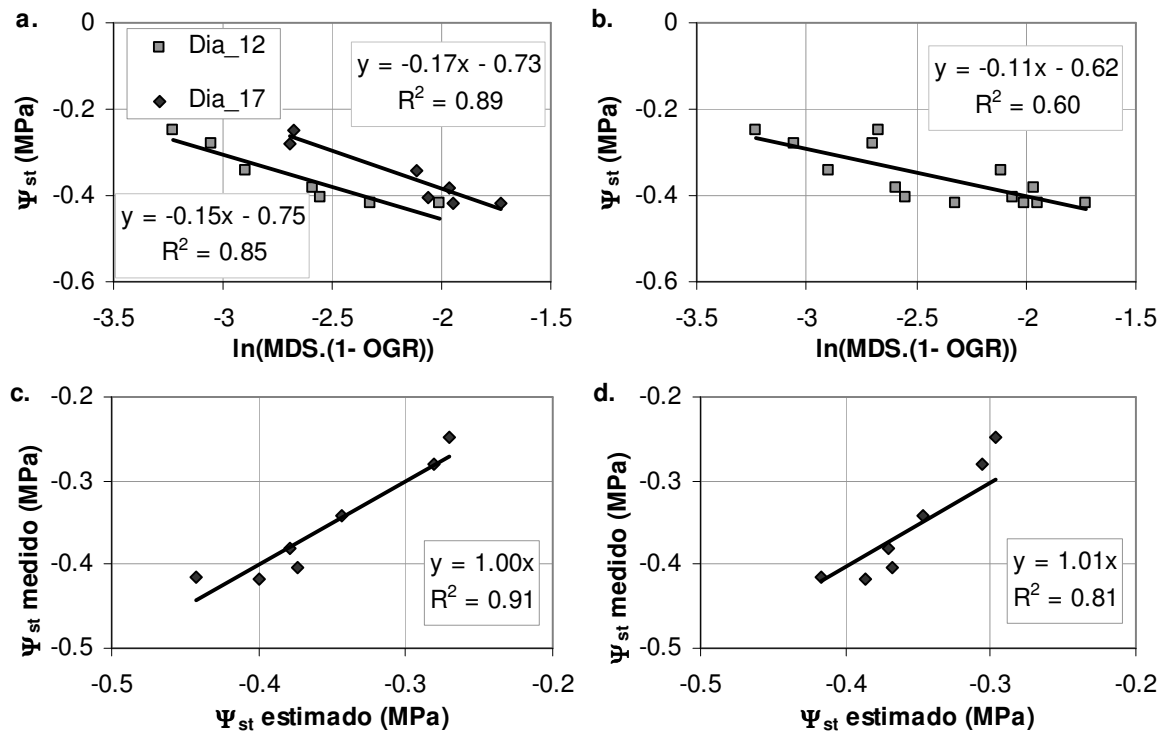


Figura 5.70 – a. e b. relação do índice MDS.(1-OGR) das medições Dia\_12 e Dia\_17 com o potencial hídrico do ramo, independente e conjunta, respectivamente; c. e d. relação entre o potencial hídrico do ramo medido e estimado, pelas regressões apresentadas em a. e b., respectivamente.

A medição Dia\_12 foi realizada com um suporte do tipo I (vd. 4.2.2.3) e a medição Dia\_17 com um suporte do tipo II. À parte os problemas pontuais de funcionamento originados pelo bloqueio da peça móvel do suporte do tipo I, os desempenhos são comparáveis. Em relação às medições realizadas no tronco, a correlação com o potencial hídrico é quase inexistente para a gama de valores de potencial hídrico verificados durante este ensaio no pomar pelo que não se apresentam os valores. No ensaio em lisímetro (vd. 5.2.5) a medição neste órgão permitiu fazer uma boa estimativa do potencial hídrico da planta do lisímetro mas também neste caso para a planta observada no pomar contíguo ao lisímetro o desempenho foi muito insatisfatório. Com base nos fundamentos do sistema SPAC e nos resultados do modelo SPAC usado pelo sistema ISIS (vd. 6.3) identifica-se que a capacitância introduz um desfasamento temporal entre a variação do potencial hídrico no copado (potencial hídrico medido) e a variação do diâmetro do tronco.

Na Figura 5.71 apresenta-se a estimativa do potencial hídrico do ramo feita com base neste índice, com as medições realizadas em ramos.

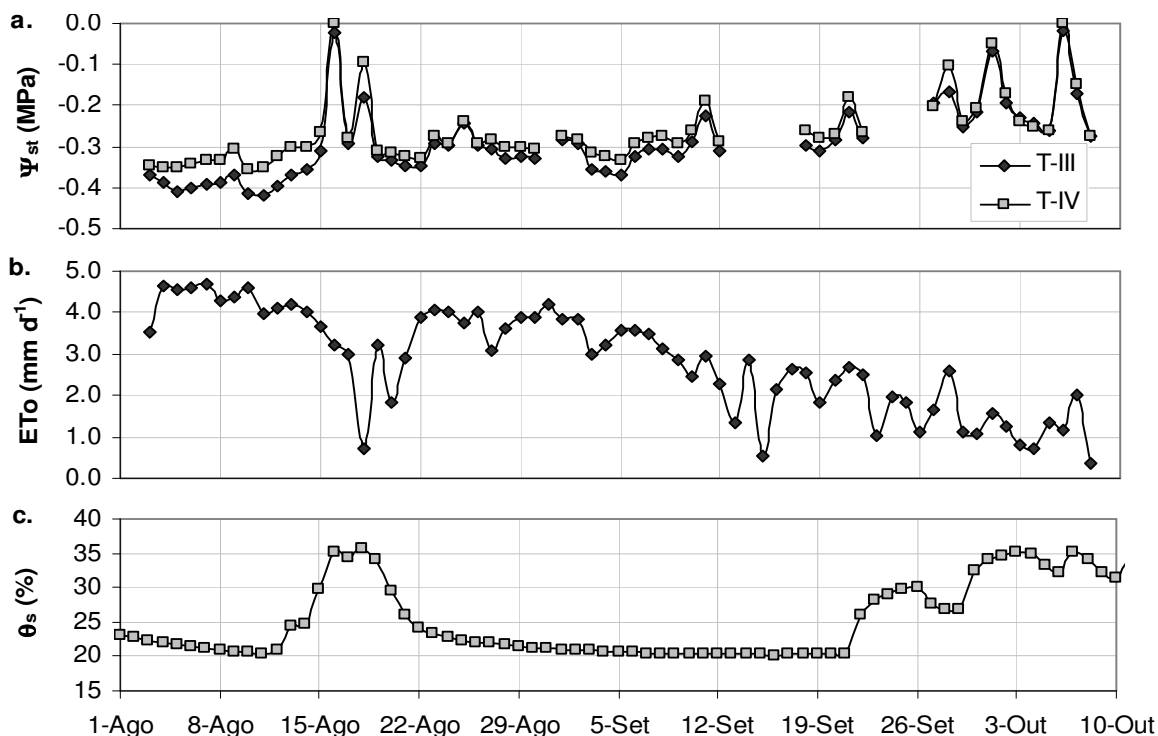


Figura 5.71 – a. potencial hídrico do ramo estimado pelo índice MDS.(1-OGR) para os talhões T-III e T-IV; b. ETo verificada durante o período; c. teor de água no solo no talhão T-III.

#### 5.4.5 Crescimento dos frutos

O crescimento dos frutos foi medido com o intuito de avaliar os efeitos do estado hídrico na produtividade da cultura. Estas observações, resumidas na Figura 5.72, permitem identificar uma redução do crescimento dos frutos no talhão T-III a meados de Julho, o que corresponde ao início das restrições hídricas. No entanto, após a quebra inicial de crescimento, a taxa de crescimento dos frutos neste talhão acompanhou os restantes, pelo que será de explorar a introdução de restrições hídricas após a fase de crescimento rápido.

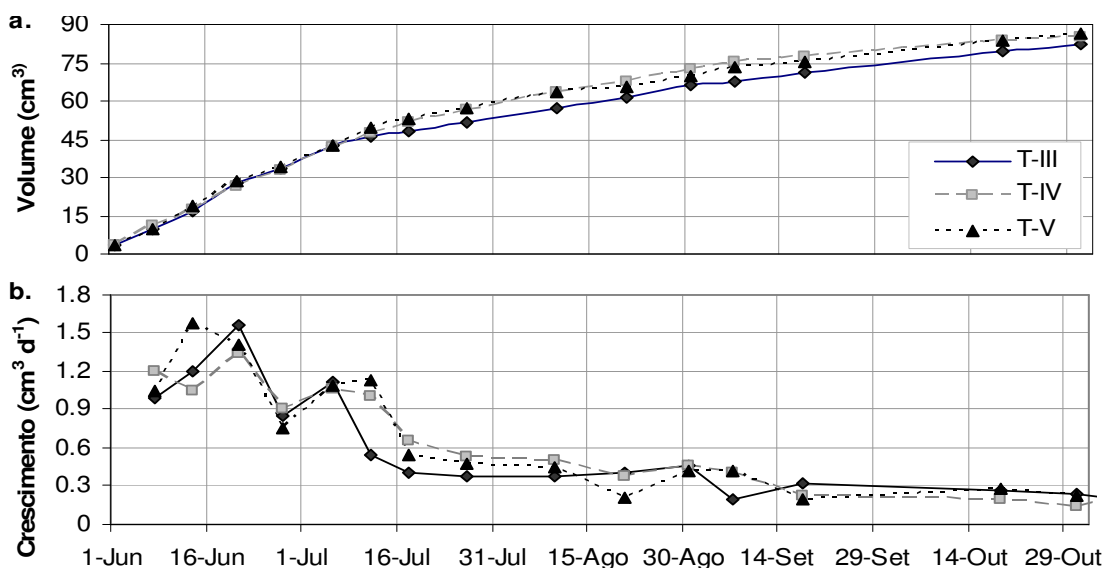


Figura 5.72 – Curvas de crescimento dos frutos observadas nos talhões T-III, T-IV e T-V, ao longo do ciclo cultural de 2006 e correspondente taxa de crescimento diária.

As curvas de crescimento encontradas apresentam uma forma sigmoidal o que coincide com o padrão encontrado noutros estudos (Hall *et al.*, 1996). Judd *et al.* (1989), num estudo sobre o efeito do stress hídrico em plantas jovens de actinidia, observaram que o crescimento dos frutos parava para valores de potencial de base inferiores a  $-1.0$  MPa, mas era retomado após a supressão do stress hídrico com a mesma taxa de crescimento que um talhão mantido ininterruptamente em conforto hídrico. Neste caso, a recuperação da taxa de crescimento após a imposição das restrições hídricas deverá estar associada a adaptações da planta às novas condições do meio, como a produção de novas raízes em zonas do solo com maior disponibilidade hídrica (Green e Clothier, 1995) e com a redução do crescimento vegetativo (observação visual).

## 5.5 Previsões numéricas do estado do tempo

### 5.5.1 Avaliação dos nós da grelha sobre a região dos ensaios

Como mencionado em 4.3.3, usaram-se os dados do modelo global GFS, cujos serviços disponibilizam dados de arquivo apenas com uma resolução horizontal de um grau latitude/longitude. Na Figura 5.73 representam-se os quatro pontos que definem a quadrícula sobre a região do Entre Douro e Minho (EDM). Dos quatro pontos da grelha, dois pontos encontram-se sobre o oceano Atlântico pelo que, como se pode analisar na Figura 5.74, não é possível utilizar o valor médio, de cada variável, fornecido para a quadrícula definida pelos quatro pontos geográficos. Como expectável, sobre o oceano a amplitude térmica diária é muito menor, apresentando também as restantes variáveis meteorológicas um comportamento bastante distinto em relação ao continente.

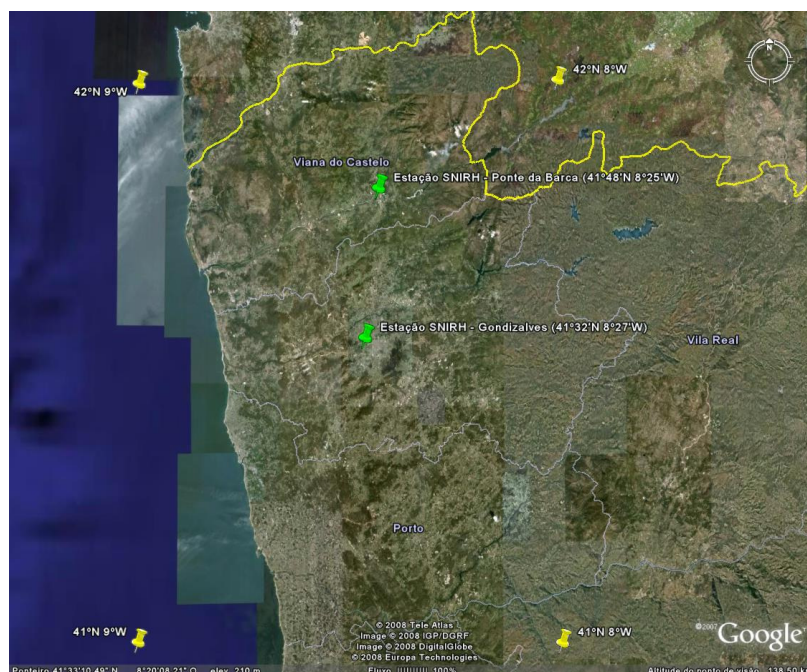


Figura 5.73 – Representação dos pontos da matriz do modelo GFS sobre a região do EDM.

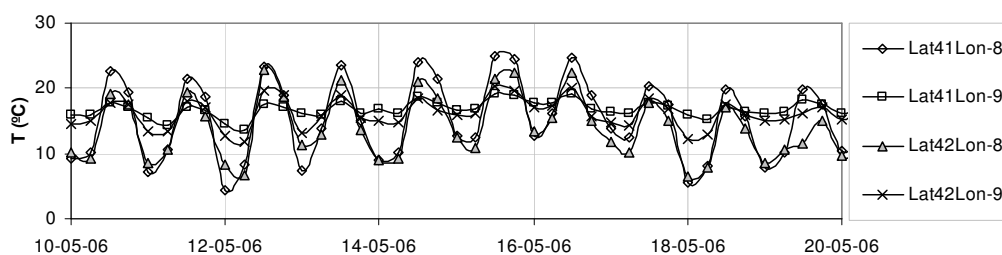


Figura 5.74 – Previsão da temperatura a 2 m, para os quatro pontos geográficos indicados na legenda do gráfico, para o período de 10 a 20 de Maio de 2006, com um tempo de avanço de 48 horas.

Atendendo a esta limitação da resolução horizontal do modelo para a região do EDM, apenas se podiam considerar os pontos com longitude de 8° W (-8), que se encontram sobre o continente. Através de uma análise sumária destes dois pontos, em relação à estação meteorológica de Gondizalves (Figura 5.75), optou-se por considerar o ponto 42° N 8° W. A média dos dois pontos com longitude 8° W não foi considerada porque a interface *web* usada para a obtenção dos dados apenas permite o cálculo desta estatística sobre uma quadricula.

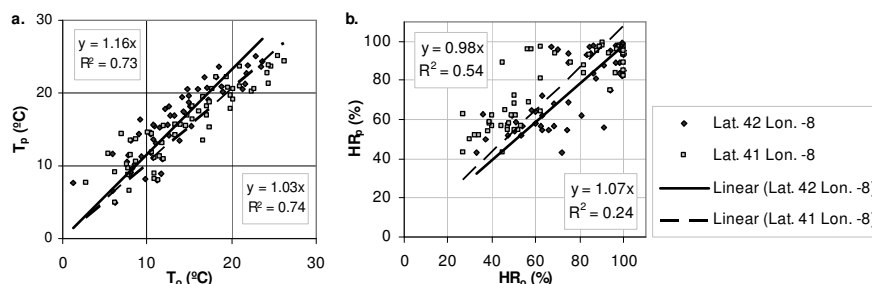


Figura 5.75 – Temperatura (a.) e humidade relativa (b.), observadas ( $X_o$ ) e previstas na análise<sup>20</sup> ( $X_p$ ) no período de 10 a 23 de Maio de 2006; as relações apresentadas no canto inferior direito de cada gráfico correspondem à localização 41° N e os do canto superior esquerdo à localização 42° N.

### 5.5.2 Avaliação da previsão das variáveis meteorológicas

Neste ponto faz-se a avaliação do desempenho do modelo para a previsão das variáveis requeridas para o cálculo da ETo. A obtenção dos dados de arquivo do modelo é muito demorada, pelo que, no estudo apenas se consideraram dois períodos, de 1 de Maio a 30 de Setembro de 2005 e 2006. A selecção destes períodos está relacionada com o período do ano em que geralmente é necessária a aplicação de água às culturas (rega) nas nossas condições edafoclimáticas. O desempenho dos modelos de previsão está fortemente dependente da estabilidade atmosférica pelo que a análise do desempenho dos modelos é geralmente efectuada considerando separadamente a estação húmida e estação seca (Filho, 2007). Ao considerar apenas o período de Maio a Setembro efectuou-se uma única análise.

<sup>20</sup> A “análise” em previsões numéricas do tempo corresponde ao instante inicial da previsão (+0 horas), resultando estes valores da análise e interpolação para os pontos da matriz de representação, dos dados recolhidos para executar o modelo de previsão.

Como as previsões do modelo se reportam a um ponto distante da estação meteorológica considerada e dos locais dos ensaios, era de esperar que fosse necessário proceder a correcções das previsões. A utilização de dois períodos permitiu que as correcções fossem determinadas para o período de 2005 e depois utilizadas no segundo período.

Como referido em 3.2.2.3, a representação vertical do modelo tem 64 níveis, mas como o objectivo é prever os dados nas condições das estações meteorológicas, utilizaram-se sempre os dados do modelo relativos a 2.0 m, com excepção da velocidade do vento, que apenas é disponibilizada para 10 m de altitude<sup>21</sup>.

Um aspecto que dificulta a comparação dos dados do modelo GFS com os dados das observações meteorológicas é a resolução temporal dos dados. O modelo GFS fornece os valores instantâneos das variáveis com uma resolução de 3 horas ao passo que os dados das observações meteorológicas fornecem o valor médio da hora antecedente. Utilizou-se então a média das observações meteorológicas nos períodos anterior e posterior ao instante considerado do modelo GFS, com a excepção da determinação dos valores extremos diários de temperatura.

### 5.5.2.1. Temperatura

A previsão da temperatura do ar a 2.0 m de altura do solo, fornecida pelo campo TMP2m, apresenta a relação presente na Figura 5.76, na análise (+0 h), para o período de 2005. Esta relação foi usada para corrigir as previsões deste período e de 2006.

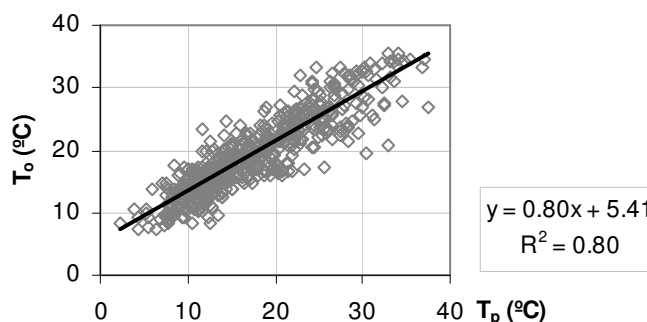


Figura 5.76 – Relação entre a temperatura do ar a 2.0 m, na análise (Tp) e observada (To) na estação meteorológica de Gondizalves, dados de 10 de Maio a 30 de Setembro de 2005, N=595.

Na Tabela 5.10 apresentam-se as estatísticas usadas para avaliação da previsão da temperatura para os períodos de 2005 e 2006. Apesar da correcção ter sido estabelecida apenas com os dados do período de 2005, verifica-se que a qualidade das previsões efectuadas em 2006 é equiparável à de 2005.

<sup>21</sup> O modelo GFS utiliza uma representação vertical por níveis de pressão atmosférica, no entanto, são calculados os valores correspondentes a 2 m (10 m vento) para disponibilizar ao público em geral.

Tabela 5.10 – Avaliação da previsão da temperatura do ar (°C) a 2 m do solo pelo modelo GFS, com diferentes tempos de avanço, por comparação com as observações da estação meteorológica de Gondizalves, para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=595) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=592).

		+0	+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168	+180
2005	BE	-2.10	-1.98	-1.93	-1.92	-1.87	-2.04	-1.66	-1.44	-1.43	-1.47
	RMSE	3.34	3.51	3.48	3.64	3.76	3.94	4.22	4.59	4.52	4.85
	MAE	2.84	2.92	2.90	3.01	3.09	3.25	3.34	3.68	3.63	3.83
	r <sup>2</sup>	0.86	0.83	0.82	0.80	0.77	0.75	0.69	0.62	0.62	0.57
	BE*	0.00	0.10	0.14	0.14	0.18	0.03	0.35	0.54	0.55	0.53
	RMSE*	2.33	2.54	2.60	2.77	2.97	3.09	3.53	3.98	3.93	4.23
	MAE*	1.81	1.98	2.03	2.16	2.32	2.47	2.81	3.16	3.17	3.34
2006	BE	-2.63	-2.50	-2.56	-2.62	-2.63	-2.67	-2.39	-2.44	-2.56	-2.54
	RMSE	3.47	3.47	3.50	3.64	3.68	3.95	3.97	4.41	4.99	5.19
	MAE	2.92	2.91	2.94	3.03	2.99	3.23	3.23	3.58	3.95	4.16
	r <sup>2</sup>	0.89	0.88	0.88	0.86	0.85	0.82	0.78	0.72	0.62	0.59
	BE*	-0.57	-0.46	-0.51	-0.57	-0.58	-0.61	-0.37	-0.42	-0.53	-0.52
	RMSE*	2.28	2.35	2.37	2.49	2.57	2.80	2.99	3.43	4.01	4.16
	MAE*	1.78	1.82	1.85	1.95	2.01	2.24	2.36	2.66	3.08	3.21

\*dados corrigidos

Na Figura 5.77, apresenta-se um gráfico da temperatura observada e prevista (+48 h), de 1 a 10 de Julho de 2006.

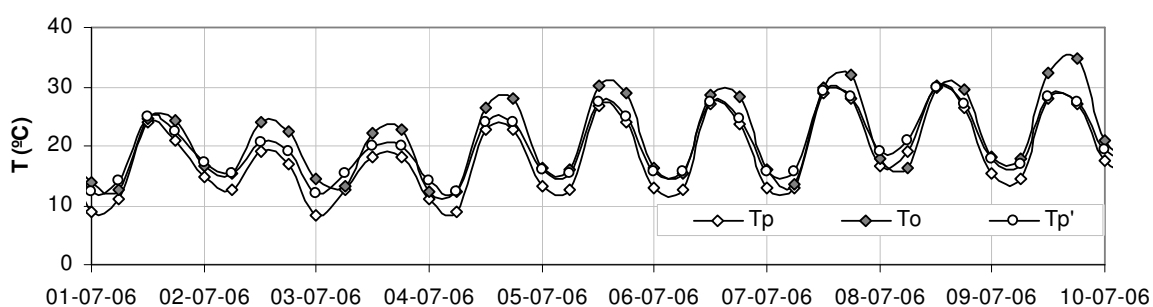


Figura 5.77 - Temperatura horária do ar a 2 m: To, observada na estação meteorológica de Gondizalves, Tp temperatura prevista pelo modelo GFS com 48 horas de avanço, Tp' corresponde a Tp com correção de escala e viés verificados no período de 10/05/2005 a 30/09/2005 na análise (+0) (Figura 5.76).

Na Tabela 5.11, apresentam-se as estatísticas utilizadas para avaliar o desempenho da previsão das temperaturas mínima, média e máxima diárias, relativas ao período de 2006. Constatase que o modelo não prevê muito bem os valores extremos de temperatura diária, apresentando um viés de cerca de -2.0 °C para a temperatura máxima (previsão inferior ao observado). De referir que se consideraram como valores extremos de temperatura observados, os valores mínimos e máximos diários da série da temperatura média horária da estação de Gondizalves e não os valores mínimo e máximo absoluto e que a baixa resolução do modelo GFS (3 h) perde alguns dos valores extremos.

Tabela 5.11 - Avaliação das temperaturas mínima ( $T_{a_n}$ ), média ( $T_{a_m}$ ) e máxima ( $T_{a_x}$ ) diária (°C) a 2 m, previstas pelo modelo GFS, com diferentes tempos de avanço, por comparação com as observações da estação meteorológica de Gondizalves: período de 10/05/2006 a 30/09/2006 (após correcção dos dados; N=592).

		+0	+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168
$T_{a_n}$	BE	0.75	0.78	0.78	0.75	0.87	0.62	0.86	0.57	0.62
	RMSE	1.84	1.83	1.91	1.87	2.23	2.22	2.35	2.39	2.76
	MAE	1.49	1.47	1.51	1.53	1.78	1.79	1.87	1.91	2.25
	$r^2$	0.68	0.69	0.65	0.66	0.53	0.51	0.47	0.40	0.26
$T_{a_m}$	BE	-0.73	-0.58	-0.69	-0.67	-0.68	-0.50	-0.51	-0.52	-0.62
	RMSE	1.56	1.54	1.61	1.64	1.86	2.01	2.39	2.80	2.82
	MAE	1.25	1.25	1.32	1.36	1.57	1.67	1.93	2.19	2.22
	$r^2$	0.84	0.83	0.83	0.81	0.76	0.69	0.57	0.44	0.43
$T_{a_x}$	BE	-2.08	-1.84	-2.11	-1.95	-2.20	-1.99	-1.79	-1.72	-1.67
	RMSE	2.87	2.67	2.98	2.83	3.07	3.36	3.65	4.21	4.64
	MAE	2.35	2.27	2.53	2.42	2.60	2.81	2.99	3.41	3.65
	$r^2$	0.86	0.86	0.84	0.84	0.83	0.73	0.64	0.50	0.39

Na Figura 5.78 apresentam-se as séries das temperaturas diárias, previstas com um tempo de avanço de 48 h.

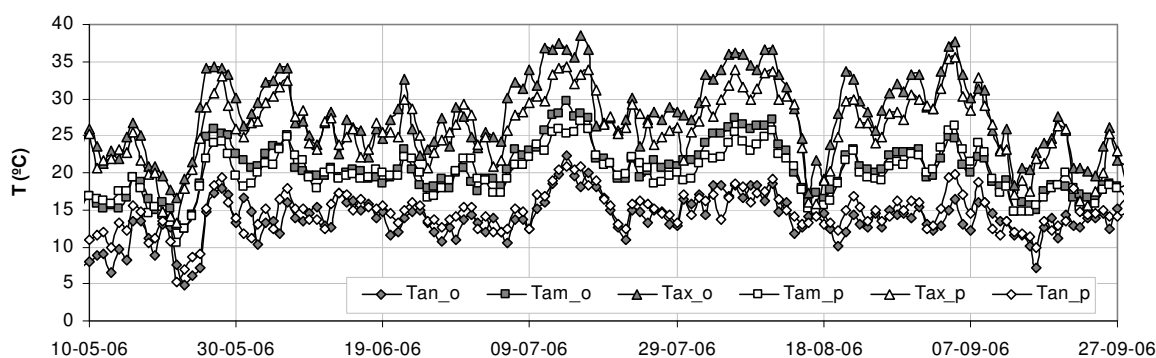


Figura 5.78 – Temperaturas mínima ( $T_{a_n}$ ), média ( $T_{a_m}$ ) e máxima ( $T_{a_x}$ ) diárias do ar a 2 m:  $T_{a\_o}$ , observada na estação meteorológica de Gondizalves,  $T_{a\_p}$  temperatura prevista pelo modelo GFS com 48 horas de avanço, após correcção dos dados.

### 5.5.2.2. Radiação solar

Para a previsão da radiação solar global ( $R_s$ ) utilizaram-se duas vias: directa, através do campo  $oDSWRFsfc$  (radiação de curto comprimento de onda incidente à superfície,  $W\ m^{-2}$ ); indirecta, através do campo  $oTDCcIm$  (cobertura total de nuvens da atmosfera, %). Para a determinação de  $R_s$  pela segunda via considerou-se a metodologia revista por Allen *et al.* (1998) para o cálculo da radiação solar incidente com céu limpo ( $R_{so}$ ), e considerou-se que  $oTDCcIm=100\ %$  corresponde a  $R_s/R_{so}=0.33$  e  $oTDCcIm=0\ %$  corresponde a  $R_s/R_{so}=1$ . Na Figura 5.79 apresentam-se as regressões entre os valores observados e previstos pelas duas vias, para o período de 2005, com tempo de avanço de 6 h<sup>22</sup>. A análise visual destas regressões permite

<sup>22</sup> O modelo GFS é inicializado sem dados de radiação uma vez que esta variável é determinada em tempo de execução em função do estado de transmissividade da atmosfera.

verificar que a via directa permite prever melhor  $R_s$  para valores superiores a  $400 \text{ W m}^{-2}$ , ao passo que a via indirecta permite prever melhor  $R_s$  para valores inferiores a  $400 \text{ W m}^{-2}$ . Este aspecto resulta da forma divergente de integração temporal: valor instantâneo da previsão numérica por oposição ao valor médio das observações meteorológicas. Deste modo, no início e fim do dia, momentos de maior variação dos fluxos, estas duas formas de amostragem originam valores significativamente diferentes, como pode ser visto na Figura 5.81a.

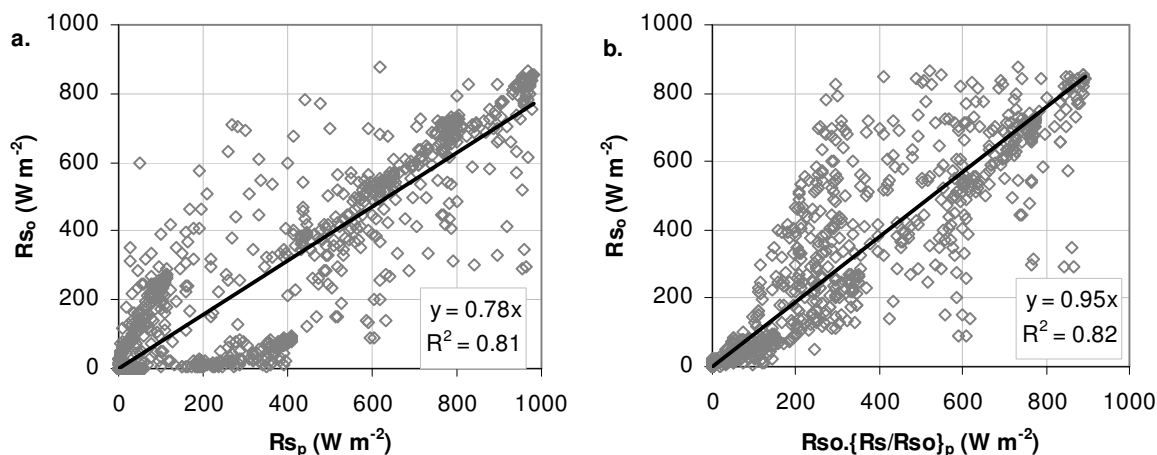


Figura 5.79 – Relação entre a radiação solar observada ( $R_{s_o}$ ) na estação meteorológica de Gondizalves e a radiação solar prevista: a.  $R_{s_p}$  radiação solar de curto comprimento de onda (oDSWRFsfc,  $\text{W m}^{-2}$ ); b)  $R_{s_o}$  radiação solar com céu limpo, determinada pela metodologia FAO (Allen, *et al.*, 1998),  $R_s/R_{s_o}$  radiação relativa de curto comprimento de onda, que se considerou corresponder à cobertura de nuvens (oTCDCClm, %) (dados do período de 10/05/2005 a 30/09/2005;  $N = 1125$ ).

Com o propósito de melhorar a previsão de  $R_s$ , optou-se por considerar o processo de cálculo descrito no fluxograma da Figura 5.80.

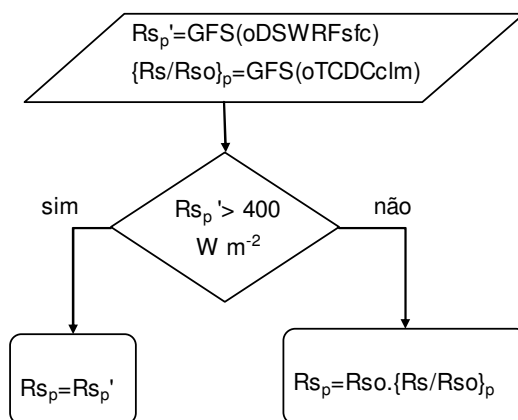


Figura 5.80 – Processo de cálculo de  $R_{s_p}$ , sendo  $R_{s_o}$  obtido pelas fórmulas apresentadas em Allen *et al.* (1998).

Na Tabela 5.12 apresentam-se as estatísticas usadas para avaliar a qualidade da previsão de  $R_s$ , nos períodos de 2005 e 2006, considerando as duas vias apresentadas na Figura 5.80 e os factores de correcção encontrados em Figura 5.79. Também em relação a esta variável meteorológica se obteve um prognóstico em 2006, equiparável ao obtido em 2005, período utilizado para fazer a calibração das previsões em relação à estação meteorológica.

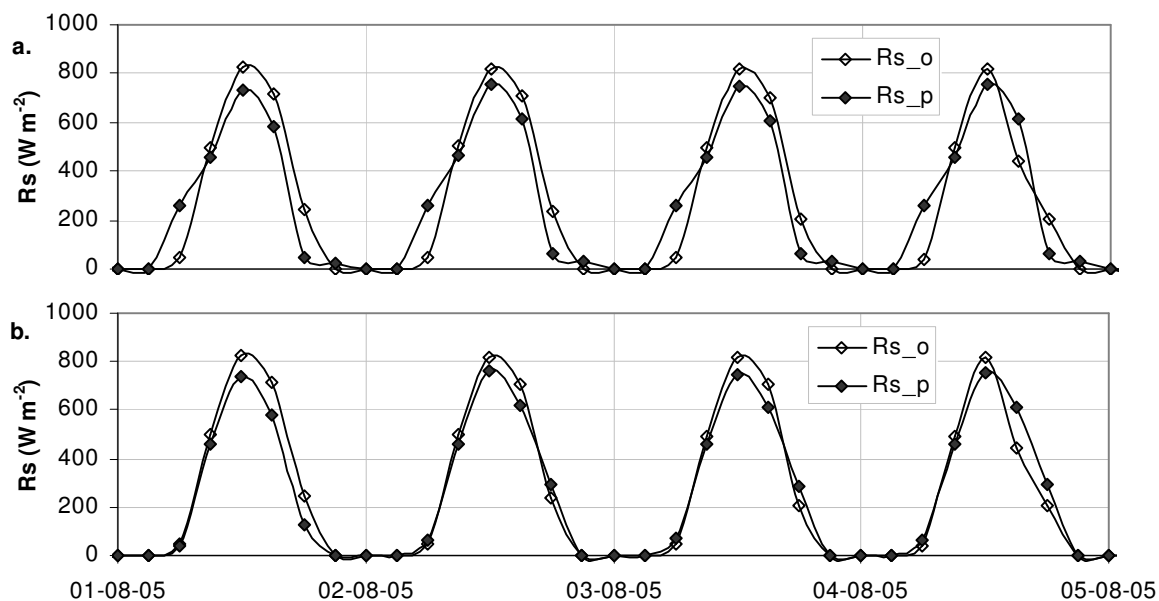


Figura 5.81 – Radiação solar global, observada na estação de Gondizalves ( $R_{s\_o}$ ) e prevista ( $R_{s\_p}$ ) com um tempo de avanço de 24 h: a. com base em  $R_s$  (oDSWRFsfc); b. considerando as duas vias apresentadas na Figura 5.80.

Tabela 5.12 – Análise estatística da previsão de  $R_s$  ( $W\ m^{-2}$ ) pelo modelo GFS, utilizando a metodologia apresentada na Figura 5.80, por comparação com a estação meteorológica de Gondizalves para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 ( $N=1122$ ) e 10/05/2006 a 30/09/2006 ( $N=1133$ ).

	+6	+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168	
2005	BE	1.3	1.9	-1.2	-3.3	-3.9	-7.0	-10.9	-13.9	-1.5
	RMSE	88.1	92.0	92.8	101.7	108.3	109.2	120.6	125.9	112.7
	MAE	47.7	49.7	49.5	52.9	56.7	57.6	63.3	67.5	60.7
	$r^2$	0.89	0.89	0.88	0.86	0.84	0.84	0.80	0.79	0.83
2006	BE	-3.2	-3.5	-4.2	-5.0	-5.4	-4.0	-2.9	-7.1	-10.9
	RMSE	90.8	87.3	90.7	96.0	99.3	102.0	112.8	113.6	118.9
	MAE	48.2	46.8	48.4	50.1	52.6	53.7	59.1	59.5	63.3
	$r^2$	0.89	0.90	0.89	0.88	0.87	0.86	0.83	0.83	0.81

### 5.5.2.3. Estado hídrico da atmosfera

O estado hídrico da atmosfera é apresentado nos dados de saída do modelo em humidade relativa, campo RH2m. Esta forma de expressar o estado hídrico da atmosfera depende da temperatura, pelo que para analisar a previsão desta variável os dados foram convertidos na tensão de vapor ( $e_a$ ) correspondente, considerando a temperatura prevista pelo modelo para o mesmo instante.

#### ▪ Tensão actual de vapor

A correlação entre os valores de  $e_a$  observados e previstos (análise) é baixa o que atendendo à boa previsão do valor médio diário desta variável (Tabela 5.14) deverá ser provocado pela pequena variação diária. Apesar desta baixa correlação, fez-se a correcção dos valores previstos considerando a regressão linear pela origem, presente na Figura 5.82.

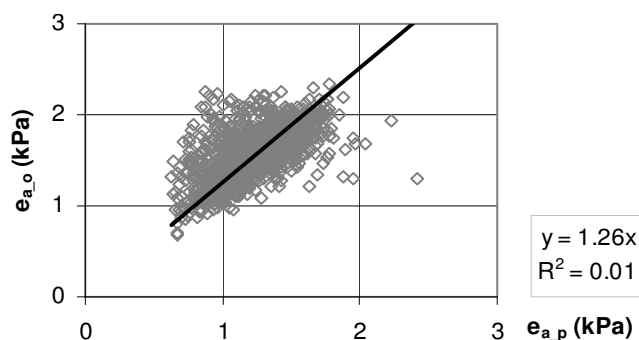


Figura 5.82 - Relação entre a tensão actual de vapor observada ( $e_{a,o}$ ) na estação meteorológica de Gondizalves e prevista ( $e_{a,p}$ ), no período de 2005 (N= 1120).

Na Tabela 5.13 apresentam-se os resultados da avaliação da previsão desta variável, verificando-se aqui um desempenho melhor do modelo em 2006.

Tabela 5.13 - Análise estatística da previsão de  $e_a$  (kPa) pelo modelo GFS por comparação com a estação meteorológica de Gondizalves (para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=1120) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=1130), após introdução da correcção encontrada na Figura 5.82).

		+0	+6	+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168
2005	BE	-0.04	-0.05	-0.05	-0.03	-0.02	-0.01	0.00	0.03	0.05	0.05
	RMSE	0.28	0.27	0.27	0.27	0.30	0.30	0.30	0.35	0.39	0.41
	MAE	0.21	0.20	0.20	0.20	0.23	0.23	0.23	0.26	0.30	0.31
	$r^2$	0.35	0.38	0.38	0.38	0.33	0.33	0.28	0.18	0.11	0.10
		+0	+6	+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168
2006	BE	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.04	0.02	0.04	0.05	0.05
	RMSE	0.24	0.24	0.25	0.25	0.27	0.27	0.30	0.31	0.34	0.37
	MAE	0.18	0.18	0.19	0.19	0.21	0.21	0.23	0.24	0.26	0.29
	$r^2$	0.55	0.56	0.54	0.54	0.50	0.44	0.39	0.32	0.23	0.12

Como o valor desta variável meteorológica apresenta geralmente variações lentas ao longo do tempo, analisou-se a capacidade do modelo prever o valor médio diário, apresentando-se na Tabela 5.14 e na Figura 5.83 esses resultados.

Tabela 5.14 - Análise estatística da previsão de  $e_a$  diária (kPa) pelo modelo GFS por comparação com a estação meteorológica de Gondizalves, após correcção dos dados (10/05/2006 a 30/09/2006; N= 144).

	+0	+6	+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168
BE	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.04	0.05
RMSE	0.15	0.16	0.16	0.15	0.16	0.16	0.17	0.20	0.22	0.26
MAE	0.11	0.11	0.12	0.11	0.13	0.13	0.14	0.15	0.16	0.20
$r^2$	0.76	0.75	0.75	0.78	0.75	0.69	0.66	0.55	0.43	0.26

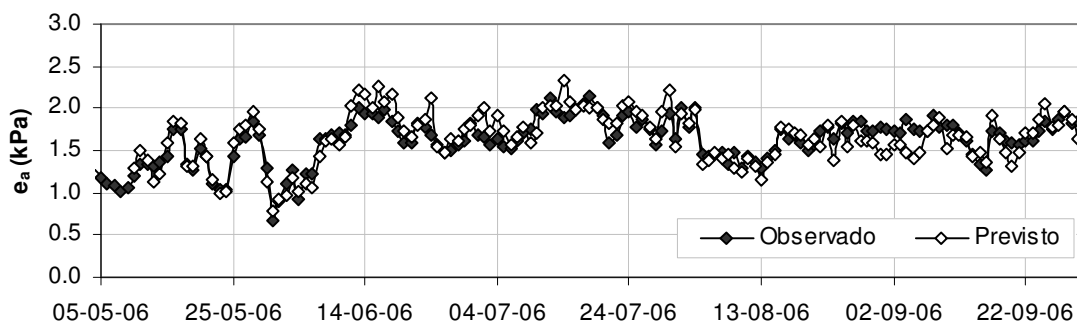


Figura 5.83 – Tensão actual de vapor média diária, observada na estação meteorológica de Gondizalves e prevista pelo modelo GFS com 48 horas de avanço, após correcção dos dados.

### 5.5.2.4. Velocidade do vento

O modelo GFS disponibiliza as velocidades horizontais ortogonais do vento (campos UGRD10m e VGRD10m,  $m s^{-1}$ ), pelo que a velocidade escalar do vento é dada pela raiz quadrada da soma do quadrado destas velocidades. As velocidades fornecidas reportam-se a uma altura de 10 m sobre a superfície pelo que foi necessário aplicar um factor de ajustamento de 0.748, considerando o perfil logaritmo do vento (Allen *et al.*, 1998). A correlação entre os valores da velocidade do vento a 2 m, observados e previstos (análise) é baixa, o que se pode justificar quer por um possível mau desempenho do modelo, quer devido a diferenças significativas de altitude e relevo da zona correspondente a este ponto, da estação meteorológica. Apesar desta baixa correlação, fez-se a correcção dos valores previstos considerando a regressão linear presente na Figura 5.84. Em relação à observação desta variável meteorológica os sensores normalmente usados truncam as medições inferiores à velocidade de arranque, pelo que parte do valor da intercepção na origem (-0.70) deverá dever-se a esse artefacto.

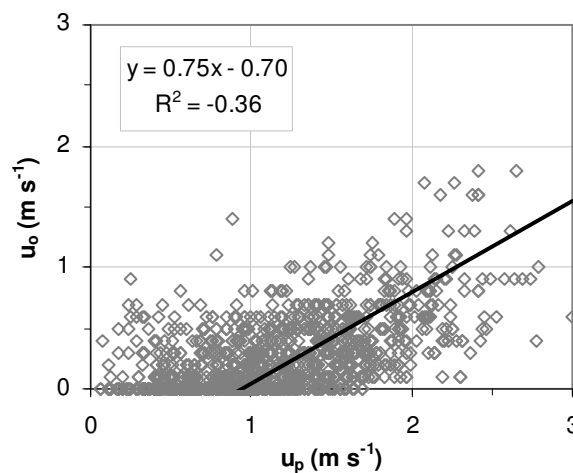


Figura 5.84 - Relação entre a velocidade do vento observada ( $u_o$ ) na estação meteorológica de Gondizalves e prevista ( $u_p$ ), com introdução de correcção para o perfil vertical do vento, no período de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N= 1123).

Na Tabela 5.13 apresentam-se os resultados da avaliação da previsão desta variável.

Tabela 5.15 - Análise estatística da previsão da velocidade de vento a 2 m ( $m s^{-1}$ ), pelo modelo GFS por comparação com a estação meteorológica de Gondizalves para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=1120) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=1130), com correcção para o perfil vertical do vento e ajustamento encontrado na Figura 5.84.

		+0	+6	+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168
2005	BE	-0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.04	0.05	0.04	0.06
	RMSE	0.28	0.28	0.29	0.29	0.30	0.30	0.38	0.39	0.40	0.43
	MAE	0.19	0.19	0.20	0.21	0.22	0.22	0.25	0.27	0.28	0.30
	$r^2$	0.36	0.37	0.36	0.36	0.32	0.31	0.19	0.14	0.13	0.09
	BE	0.02	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.06
2006	RMSE	0.28	0.28	0.29	0.29	0.31	0.31	0.31	0.31	0.34	0.36
	MAE	0.19	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	0.24	0.24
	$r^2$	0.21	0.26	0.26	0.23	0.20	0.17	0.18	0.15	0.09	0.05

### 5.5.3 Previsão da evapotranspiração de referência

#### 5.5.3.1. Discriminação horária

A previsão da ETo foi realizada com base nos dados das PNT analisadas anteriormente, pelo método de Penman-Monteith. Os dados das previsões têm uma resolução temporal de 3 horas, pelo que a série horária correspondente foi obtida por interpolação linear. Na Tabela 5.16 apresentam-se as estatísticas de avaliação da previsão de ETo.

Tabela 5.16 - Análise estatística da previsão de ETo à escala horária (mm h<sup>-1</sup>; pelo método de Penman-Monteith), com base nos dados das PNT do modelo GFS, por comparação com ETo determinada com os dados da estação meteorológica de Gondizalves para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=3348) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=3368).

		+6	+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168
2005	BE	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	0.00
	RMSE	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09
	MAE	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
	r <sup>2</sup>	0.88	0.87	0.86	0.84	0.82	0.82	0.78	0.76	0.79
2006	BE	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.01
	RMSE	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09
	MAE	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
	r <sup>2</sup>	0.88	0.88	0.88	0.87	0.85	0.85	0.82	0.82	0.80

Na Figura 5.85 apresentam-se as relações entre ETo calculada com base nos dados da estação meteorológica de Gondizalves e prevista com base nos dados das PNT com 48 h de avanço. Observa-se uma boa aderência à relação 1:1 para os valores extremos da gama, havendo no entanto alguma dispersão nos valores médios.

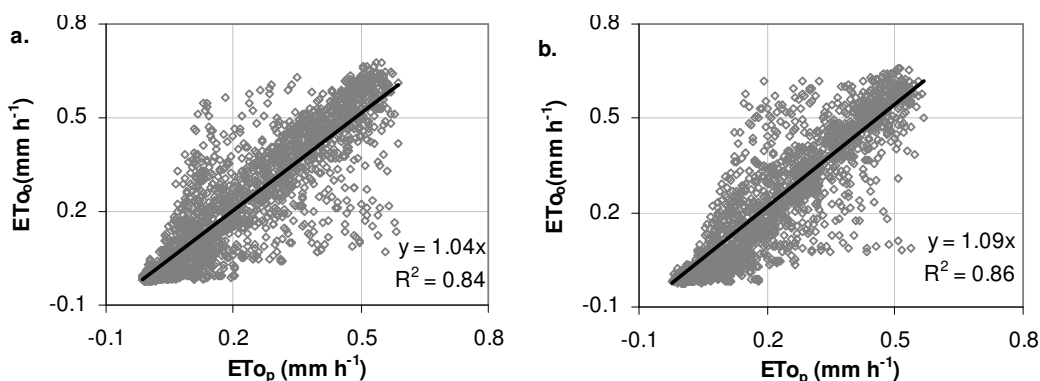


Figura 5.85 – Relação entre ETo calculada com base nos dados da estação meteorológica de Gondizalves e prevista com base nos dados das PNT com 48 h de avanço: a. período de 10 de Maio a 30 de Setembro de 2005 (N=3348); b. período de 10 de Maio a 30 de Setembro de 2006 (N=3368).

Na Figura 5.86 apresenta-se um gráfico com os valores de ETo calculados e previstos (com 48 h de avanço), verificando-se em alguns dias desfasamentos significativos entre os valores de ETo calculados pelas duas vias.

Na análise estatística da previsão de ETo diária, com base na integração dos valores horários (Tabela 5.17), verifica-se que apesar de não haver viés na previsão, o erro médio absoluto das previsões é de cerca de 0.5 mm d<sup>-1</sup>, até 5 dias de avanço.

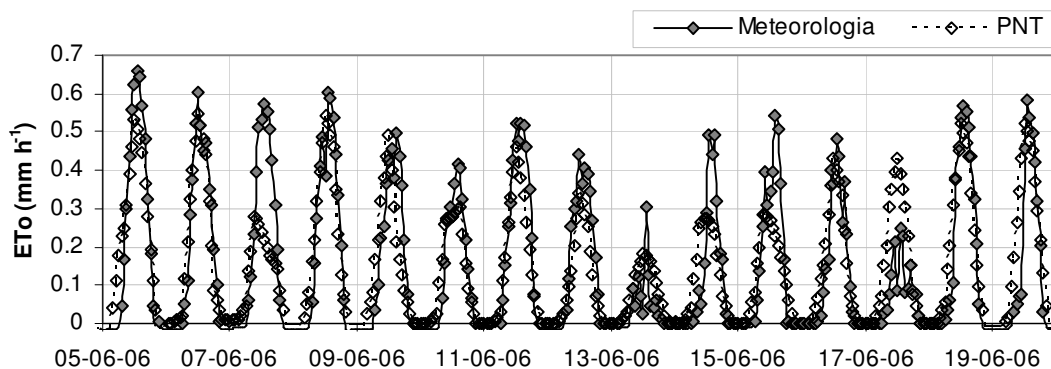


Figura 5.86 – Valores de ETo calculados com base nos dados meteorológicos da estação de Gondizalves (Meteorologia) e calculados com base nos dados das PNT com 48 h de avanço.

Tabela 5.17 - Análise estatística da previsão de ETo ( $\text{mm d}^{-1}$ ), à escala diária por integração dos valores horários, com base nos dados das PNT do modelo GFS e no método de Penman-Monteith, por comparação com a ETo determinada com os dados da estação meteorológica de Gondizalves para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=136) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=138).

		+6	+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168
2005	BE	0.01	0.04	-0.02	-0.05	-0.05	-0.11	-0.16	-0.18	0.03
	RMSE	0.72	0.76	0.78	0.90	0.98	0.96	1.13	1.17	1.12
	MAE	0.50	0.52	0.54	0.62	0.67	0.71	0.85	0.90	0.85
	$r^2$	0.62	0.58	0.57	0.46	0.39	0.41	0.22	0.17	0.18
2006	BE	-0.09	-0.06	-0.10	-0.09	-0.09	-0.11	-0.11	-0.08	-0.18
	RMSE	0.74	0.69	0.75	0.73	0.82	0.83	0.83	1.01	1.10
	MAE	0.48	0.47	0.50	0.50	0.57	0.56	0.56	0.72	0.79
	$r^2$	0.64	0.66	0.61	0.62	0.53	0.51	0.51	0.32	0.25

Na Figura 5.87 apresentam-se os valores dos totais diários de ETo verificando-se que em 2006 se obtiveram melhores resultados, havendo contudo alguns dias com um grande afastamento da relação 1:1.

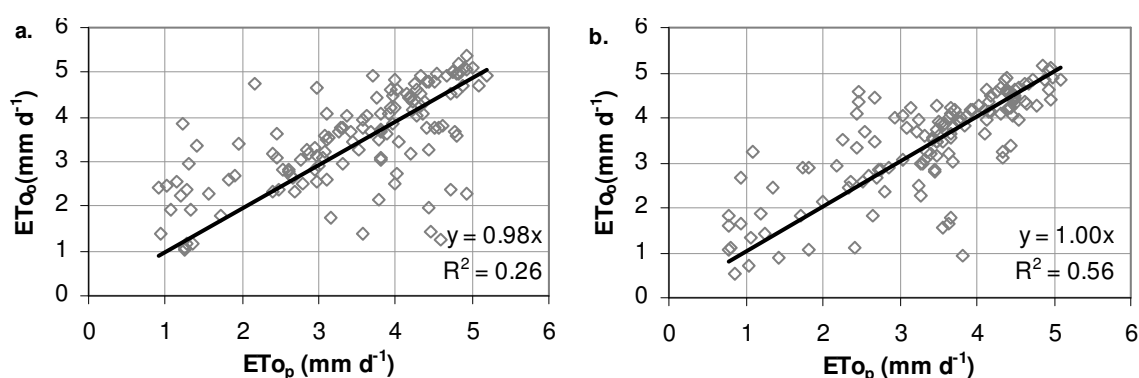


Figura 5.87 - Relação entre ETo diária calculada com base nos dados horários da estação meteorológica de Gondizalves e prevista com base nos dados das PNT com 48 h de avanço: a. período de 10 de Maio a 30 de Setembro de 2005 (N=138); b. período de 10 de Maio a 30 de Setembro de 2006 (N=136).

### 5.5.3.2. Discriminação diária

Procedeu-se também ao cálculo da ETo diária directamente, pelos métodos de Penman-Monteith e de Hargreaves-Samani. Este último método apenas requer dados da temperatura do ar,

pelo que se pretendeu avaliar o seu desempenho, uma vez que o modelo GFS prevê relativamente bem esta variável. Na Tabela 5.18 apresentam-se as estatísticas de avaliação do desempenho das previsões de ETo, pelos dois métodos de cálculo de ETo. Verifica-se que o método de Penman-Monteith apresenta resultados similares aos obtidos pela integração dos valores horários. Apresenta melhor desempenho em relação ao método de Hargreaves-Samani, que apenas requer dados de temperatura do ar. Contudo, para previsões de maior alcance temporal o método de Hargreaves-Samani tende a apresentar melhor desempenho que o método de Penman-Monteith.

Tabela 5.18 - Análise estatística da previsão de ETo (mm d<sup>-1</sup>), à escala diária, com base nos dados das PNT do modelo GFS e nos métodos de Penman-Monteith e Hargreaves-Samani, por comparação com a ETo determinada com os dados da estação meteorológica de Gondizalves para os períodos de 10/05/2005 a 30/09/2005 (N=136) e 10/05/2006 a 30/09/2006 (N=138).

			+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168
2005	Penman-Monteith	BE	-0.18	-0.22	-0.24	-0.25	-0.29	-0.30	-0.31	-0.14
		RMSE	0.75	0.78	0.87	0.93	0.93	1.08	1.12	1.07
		MAE	0.58	0.60	0.66	0.71	0.73	0.84	0.91	0.85
		r <sup>2</sup>	0.61	0.58	0.50	0.44	0.45	0.27	0.21	0.21
	Hargreaves-Samani	BE	-0.02	-0.05	-0.04	-0.05	-0.10	-0.06	-0.01	0.02
		RMSE	0.86	0.84	0.87	0.98	0.97	1.11	1.21	1.18
		MAE	0.64	0.66	0.66	0.72	0.74	0.81	0.90	0.88
		r <sup>2</sup>	0.46	0.46	0.44	0.35	0.36	0.21	0.12	0.11
2006	Penman-Monteith	BE	-0.22	-0.25	-0.26	-0.26	-0.24	-0.20	-0.25	-0.31
		RMSE	0.67	0.72	0.73	0.80	0.81	0.93	0.97	1.04
		MAE	0.50	0.53	0.55	0.58	0.59	0.67	0.73	0.76
		r <sup>2</sup>	0.70	0.67	0.65	0.57	0.56	0.41	0.38	0.32
	Hargreaves-Samani	BE	0.00	-0.04	-0.03	-0.09	-0.01	0.00	0.06	0.05
		RMSE	0.68	0.69	0.75	0.73	0.75	0.86	0.93	1.02
		MAE	0.53	0.54	0.55	0.55	0.55	0.64	0.68	0.76
		r <sup>2</sup>	0.64	0.64	0.57	0.59	0.56	0.45	0.38	0.30

### 5.5.3.3. Análise de erro

No processo de cálculo de ETo, com os dados das PNT, introduzem-se erros na determinação deste índice climático devido aos erros na previsão das variáveis meteorológicas usadas no processo de cálculo. A análise aos erros das previsões já foi realizada em 5.5.2, pretendendo-se aqui analisar o erro introduzido por cada uma das variáveis isoladamente. Para isto, a forma encontrada consistiu na utilização das variáveis observadas na estação meteorológica de Gondizalves com excepção da variável em análise que será do modelo de PNT. Para este processo considerou-se o período de 2006 e um tempo de avanço da previsão de 48 h.

Esta análise às variáveis permitiu identificar que a radiação solar global é a variável que introduz a quase totalidade do erro na determinação de ETo com base nos dados das PNT.

Tabela 5.19 - Análise estatística da previsão de ETo, à escala horária ( $\text{mm h}^{-1}$ ) e diária ( $\text{mm d}^{-1}$ ) por integração dos valores horários, com base nos dados da estação meteorológica de Gondizalves com substituição da variável indicada pela previsão do modelo GFS com um tempo de avanço de 48 h; método de Penman-Monteith; por comparação com a ETo determinada com os dados da estação meteorológica de Gondizalves, dados do período de 10/05/2006 a 30/09/2006.

		Rs	T	u2	ea
hora	BE	0.00	0.00	0.00	0.00
	RMSE	0.07	0.01	0.01	0.00
	MAE	0.04	0.01	0.01	0.00
	r <sup>2</sup>	0.89	1.00	1.00	1.00
		Rs	T	u2	ea
dia	BE	-0.05	-0.10	0.01	-0.01
	RMSE	0.61	0.18	0.11	0.03
	MAE	0.41	0.13	0.08	0.02
	r <sup>2</sup>	0.71	0.98	0.99	1.00

#### 5.5.3.4. Comparação com a normal climática

Neste ponto faz-se a comparação com a via tradicionalmente usada para “prever” a ETo para os dias seguintes, a normal climática da região. Esta comparação irá ser utilizada em 6.1 para ajustar o modo de utilização das diferentes fontes de ETo.

A normal de ETo foi obtida com base nos dados decendiais da estação meteorológica de Braga/Posto Agrário, com os dados do período de 1975 a 1994 (20 anos). A partir desta série foi obtida a correspondente série diária por interpolação linear, sobre a qual se procedeu à determinação da ETo horária, como apresentado em 6.1. Na Tabela 5.20 apresentam-se as estatísticas de avaliação da qualidade da previsão de ETo com base na NC e nas PNT. Verifica-se que, apesar do aparente bom desempenho da previsão da ETo com a NC à escala horária, ao nível diário apresenta um mau desempenho, similar ao da PNT com um tempo de avanço de 168 h. A boa concordância à escala horária é explicada pela série de ETo obtida a partir da NC descrever bem o padrão de variação diária, Figura 5.88a.

Tabela 5.20 – Análise estatística da “previsão” de ETo, à escala horária ( $\text{mm h}^{-1}$ ) e diária ( $\text{mm d}^{-1}$ ), com base na NC da região (estação meteorológica de Braga/Posto Agrário) e com base nos dados das PNT; comparação com a ETo calculada com base nos dados meteorológicos da estação de Gondizalves (10/05 a 30/09 de 2006).

		NC	+6	+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168
hora	BE	0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	-0.01
	RMSE	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09
	MAE	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06
	r <sup>2</sup>	0.86	0.88	0.88	0.88	0.87	0.85	0.85	0.82	0.82	0.80
		NC	+6	+12	+24	+48	+72	+96	+120	+144	+168
dia	BE	0.35	-0.09	-0.06	-0.10	-0.09	-0.09	-0.11	-0.11	-0.08	-0.18
	RMSE	1.06	0.74	0.69	0.75	0.73	0.82	0.83	0.83	1.01	1.10
	MAE	0.76	0.48	0.47	0.50	0.50	0.57	0.56	0.56	0.72	0.79
	r <sup>2</sup>	0.20	0.64	0.66	0.61	0.62	0.53	0.51	0.51	0.32	0.25
p0.95 AE		2.46	1.57	1.44	1.55	1.78	1.63	1.90	1.90	2.17	2.33

P0.95 AE, percentil 0.95 do erro absoluto (absolute error)

Na análise estatística da Tabela 5.20 introduziu-se o cálculo do percentil 0.95 do erro absoluto diário entre a ETo determinada com os dados meteorológicos e a NC ou PNT. Esta estatística permite concluir que a possibilidade da PNT prever um dia com elevada ETo (ou baixa ETo) e verificar-se o oposto deverá ser inferior à utilização da NC de ETo.

Na Figura 5.88 apresentam-se dois gráficos com valores de ETo horários e diários obtidos pelas três vias.

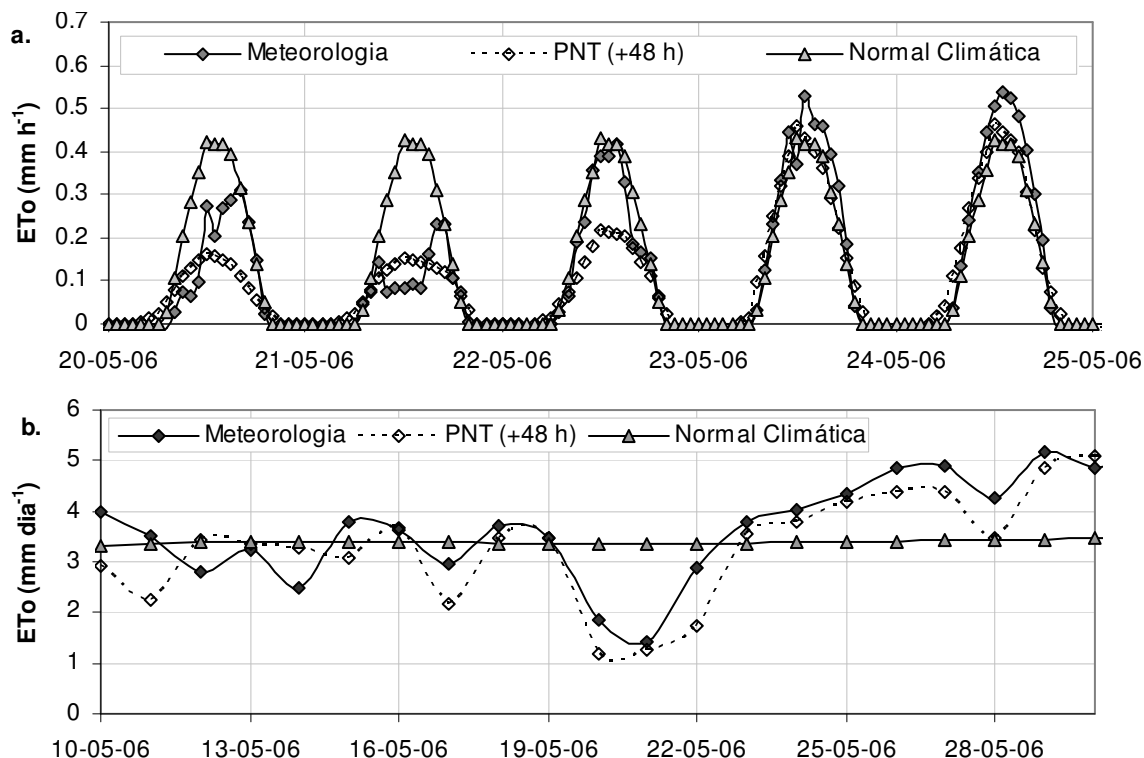


Figura 5.88 – Valores de ETo horários (a.) e diários (b.) determinados com os dados meteorológicos da estação de Gondizalves (Meteorologia), da PNT com um tempo de avanço de 48 h (PNT, +48 h) e com a normal climática da estação de Braga/Posto Agrário (Normal Climática).

Estes resultados obtidos pela análise do período de 10/05 a 30/09 de 2006 (estação seca) permitem concluir que há alguma vantagem de utilização das PNT para a previsão da ETo até 6-7 dias de avanço.

## CAPÍTULO 6

### SISTEMA ISIS – FORMALIZAÇÃO E AVALIAÇÃO



#### SUMÁRIO

Este capítulo apresenta a reunião dos trabalhos realizados, conducentes ao desenvolvimento das componentes do sistema de determinação das necessidades hídricas e do estado hídrico das culturas. Começa-se por apresentar a componente que permite prever a evapotranspiração de referência a que irá estar sujeito o coberto vegetal e que irá determinar a transpiração da cultura. No ponto seguinte apresentam-se alguns aspectos do sistema de fitomonitorização obtido e aspectos a considerar na instalação, operação e processamentos dos dados de monitorização. É feita a formalização e avaliação do sistema SPAC desenvolvido para, considerando o estado presente da cultura, prever a sua evolução com base na modelação do funcionamento hídrico da planta e na previsão da evapotranspiração realizada. Por último é realizada a avaliação *ex-post* do funcionamento do sistema ISIS por aplicação aos casos de estudo do lisímetro e do pomar.

#### 6.1 PREVISÃO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

#### 6.2 SUBSISTEMA DE MONITORIZAÇÃO VEGETAL

#### 6.3 MODELO SPAC

##### 6.3.1 Formalização matemática do modelo SPAC

##### 6.3.2 Implementação numérica do modelo

##### 6.3.3 Parametrização para os casos de estudo

##### 6.3.4 Teste e avaliação nos casos de estudo

#### 6.4 APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DO SISTEMA ISIS NOS CASOS DE ESTUDO

##### 6.4.1 Lisímetro

##### 6.4.2 Pomar

## 6 SISTEMA ISIS – FORMALIZAÇÃO E AVALIAÇÃO

### 6.1 Previsão da evapotranspiração de referência

De acordo com a estrutura do sistema definida em 3.4, a  $E_{To}$  é a variável forçante do funcionamento do modelo SPAC para a determinação da transpiração e do estado hídrico da cultura a curto/médio prazo. Desta forma, é necessário prever o estado futuro da atmosfera, caracterizado pela evapotranspiração de referência. Para tal, são usadas duas fontes de informação: a previsão numérica do tempo (PNT) e a normal climática da região (NC). A PNT, para prever as relações hídricas a curto prazo e a NC para estender o alcance da previsão, quando necessário. Na Figura 6.1 apresenta-se o modo de utilização destas duas fontes de informação para a determinação de  $E_{To}$ . Como demonstrado em 5.5.3.4, as PNT fornecem melhores estimativas face à NC até 6-7 dias de avanço. É contudo conveniente fazer uma transição gradual entre as fontes para não provocar incoerência na previsão. Deste modo, considerou-se a Eq. [6.1] para descrever a contribuição relativa de cada uma das fontes de informação para a previsão de  $E_{To}$  no período de transição, do 5º ao 7º dia, como apresentado na Figura 6.1.

$$\begin{cases} C_{PNT} = 0.5 + 0.5 \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{t-5}{2}\right), & 5 \leq t < 7 \\ C_{NC} = 1 - C_{PNT}, & 5 \leq t < 7 \end{cases} \quad [6.1]$$

onde,

$C_{PNT}$ , contribuição relativa das previsões numéricas do tempo para a determinação de  $E_{To}$  (0 a1);

$C_{NC}$ , contribuição relativa da normal climática para a determinação de  $E_{To}$  (0 a1);

$t$ , tempo (d).

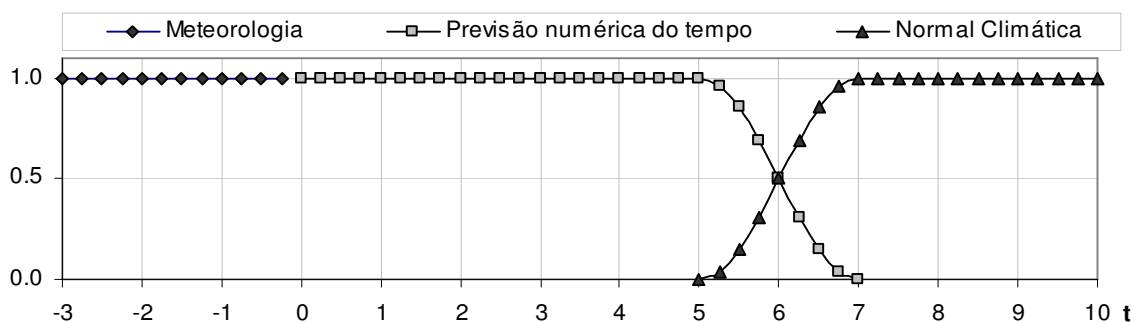


Figura 6.1 – Esquema da contribuição relativa das fontes de informação (meteorologia, PNT e NC) para a determinação de  $E_{To}$ :  $t$  em dias, “0” corresponde ao momento presente, representando os valores negativos o histórico e os positivos o alcance de previsão.

À medida que os dados meteorológicos ficam disponíveis, estes são integrados no sistema para a reanálise das previsões efectuadas nos dias anteriores, suportadas pelas PNT e eventual

ajustamento de parâmetros do sistema. Após o 7º dia de avanço, a estimativa de ETo será realizada com base na NC, prevendo-se contudo que este período possa ser alargado com a utilização das PNT por conjuntos.

Atendendo ao modo de funcionamento do modelo SPAC que será utilizado, é necessário calcular a ETo com discriminação temporal horária. Desta forma, quer os dados das PNT, quer das NC convencionais, terão de ser transformados. Os dados das PNT são disponibilizados pelo modelo numérico de previsão utilizado (GFS) com uma discriminação de 3 horas, obtendo-se os valores horários por simples interpolação linear. Quanto às NC, estas são obtidas por síntese de dados meteorológicos históricos, geralmente agregados ao mês ou ao decêndio. Neste estudo utilizou-se a série decendial de ETo calculada com base nos dados da estação meteorológica de Braga/Posto Agrário, do período de 1975 a 1994 (20 anos)<sup>23</sup>. Com base nesta série (36 valores) foi obtida por interpolação linear a série diária apresentada na Figura 6.2a. Para obter a série horária correspondente foi necessário particionar o valor total diário para que represente o padrão normal diário deste elemento fitoclimático. A ETo apresenta um ciclo circadiano pelo que seria possível construir uma função trigonométrica que descrevesse a curva padrão desta variável, para cada lugar (latitude, longitude e altitude) e época do ano. Contudo, neste trabalho optou-se pela determinação das curvas padrão normalizadas com base na síntese dos dados horários de ETo calculados para o período de 2004 a 2006, com base nos dados da estação meteorológica de Gondizalves. Na Figura 6.3 apresentam-se as curvas normalizadas para alguns decêndios.

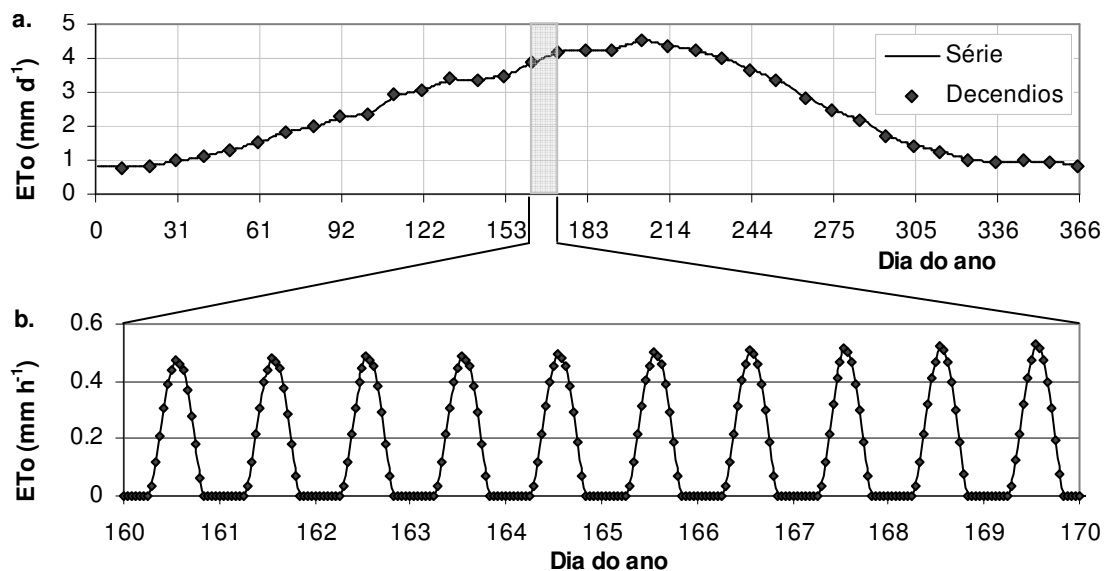


Figura 6.2 – a. série de ETo diária obtida com base na interpolação linear da série decendial de ETo, da normal climática da estação meteorológica de Braga/Posto Agrário (período de 1975 a 1994); b. série de ETo horária, estimada com base no total diário de ETo apresentado em a. e na curva padrão de ETo horária normalizada da região, para cada decêndio.

<sup>23</sup> Disponha-se da NC desta estação com 31 anos com discriminação mensal, no entanto, optou-se por considerar esta série decendial por ter maior resolução temporal, ainda que de menor duração.

Com base nas curvas padrão normalizadas e no valor total diário de ETo, para cada dia do ano, determinou-se a série horária de ETo, como apresentado na Figura 6.2b.

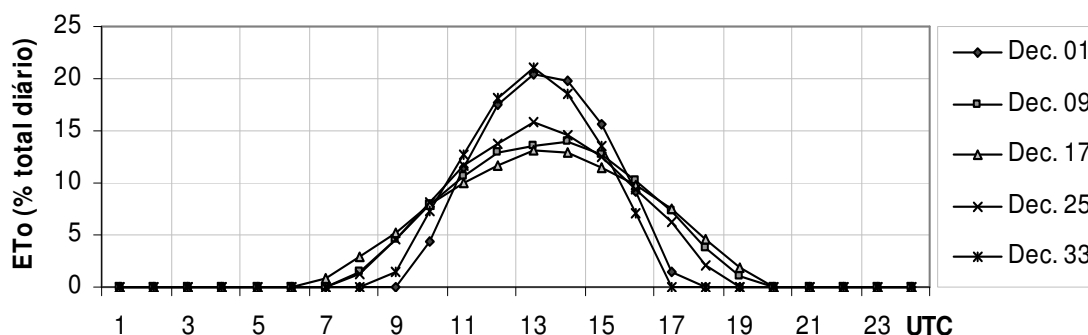


Figura 6.3 – Curvas padrão normalizadas de ETo horária, para alguns decêndios, obtidas com base nos valores horários de ETo (dados da estação meteorológica de Gondizalves do período de 1 Janeiro de 2004 a 31 de Dezembro de 2006).

Na Figura 6.4 apresentam-se os valores de ETo verificados e estimados pela normal climática, de 2003 a 2006, para os dias do ano 162 a 165. Apesar da grande variabilidade interanual verificada (seleccionou-se um período com estas características intencionalmente) verifica-se que os extremos diários da curva são bem descritos pela metodologia utilizada, o mesmo acontecendo com o momento do valor máximo da curva nos dias com um padrão regular de ETo.

Nesta fase considerou-se o valor médio de ETo fornecido pela normal climática. No entanto, dependendo das condições especificadas no plano de gestão hídrica da cultura, poderá ser necessário considerar um percentil, atribuindo-se à simulação uma probabilidade de os valores verificados terem uma determinada probabilidade de virem a ser superiores ou inferiores a um determinado valor. A introdução deste carácter estocástico no sistema ISIS também será possível com as PNT, com a utilização das previsões por conjuntos (vd. 3.2.2.1).

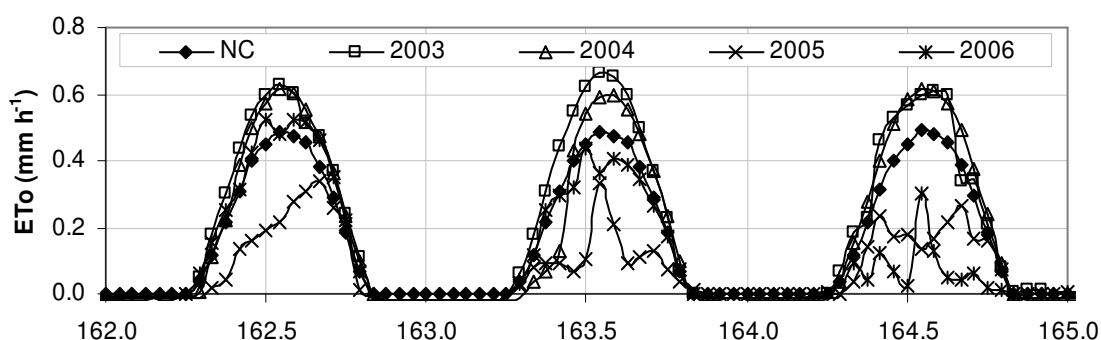


Figura 6.4 – Valores de ETo dos dias do ano 162 a 165, verificada nos anos 2003 a 2006 e estimada com base na NC da região.

Na Figura 6.5 apresentam-se as previsões de ETo efectuadas a 10 de Agosto de 2005 (a.) e 2006 (b.). Há algum desfasamento temporal das séries até ao dia 16 de Agosto (sete dias de avanço), tempo de avanço até ao qual a ETo é determinada exclusiva ou parcialmente pelas PNT. Este desfasamento deve-se à interpolação da série de ETo das PNT, com uma resolução de 3

horas, para a série de ETo horária. De referir que se trabalhou sempre com a mesma referência horária (UTC). Será por isso necessário em trabalhos futuros melhorar o procedimento de obtenção da série horária de ETo com base nas PNT.

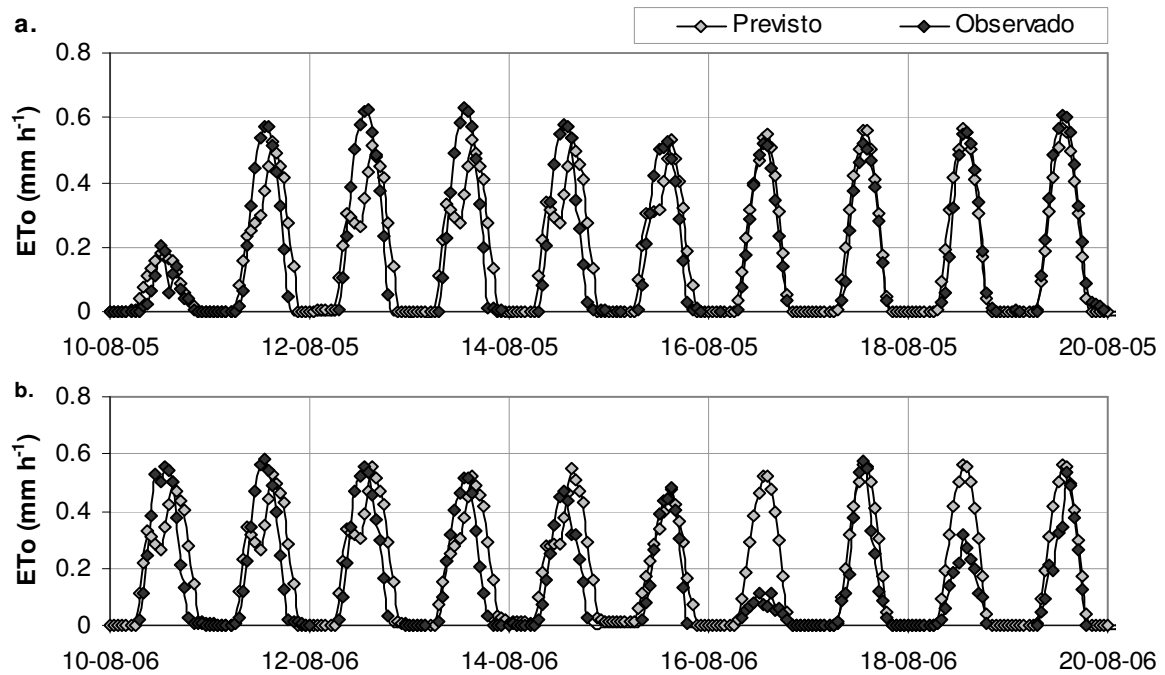


Figura 6.5 – Comparação das previsões de ETo geradas no dia 10 de Agosto de 2005 (a.) e 2006 (b.) com os valores calculados com base nas observações meteorológicas efectuadas.

Na Tabela 6.1 apresentam-se as estatísticas de avaliação da previsão de ETo com base na metodologia apresentada anteriormente: determinada com base em PNT até 5 dias de avanço, ponderação PNT e NC do 5º ao 7º dia, com base na NC para mais de 7 dias de avanço. A análise das estatísticas obtidas permite assinalar um viés que varia de 0.22 a 0.38 mm d<sup>-1</sup> (sobrestimativa) e um erro médio de estimativa na ordem de 0.8 mm d<sup>-1</sup> que, atendendo ao valor médio de ETo dos períodos considerados na análise representa cerca de 20% do valor diário. Atendendo a que já se tinha procedido à correcção das PNT (variáveis meteorológicas previstas) em relação aos valores observados na estação meteorológica de Gondizalves (vd. 5.5.2), optou-se por não introduzir uma nova correcção para eliminar o viés na estimativa de ETo, embora produzisse uma redução do erro da estimativa.

## 6.2 Subsistema de monitorização vegetal

Como apresentado em 3.4 o sistema ISIS integra um subsistema de monitorização vegetal para caracterizar a cada momento o estado do sistema vegetal objecto de observação e controlo. Esta componente do sistema ISIS foi objecto de desenvolvimento ao longo do capítulo anterior. Neste ponto apenas se salientam alguns aspectos que deverão ser contemplados numa futura implementação do sistema.

Tabela 6.1 – Estatísticas de avaliação da previsão de ETo diária (mm d<sup>-1</sup>).

Dias de avanço	10/05 a 14/09 de 2005			10/05 a 14/09 de 2006		
	BE	RMSE	MAE	BE	RMSE	MAE
1	0.38	0.92	0.66	0.32	0.83	0.61
2	0.32	1.00	0.70	0.26	0.85	0.64
3	0.27	1.11	0.76	0.22	0.89	0.67
4	0.28	1.07	0.77	0.25	1.01	0.73
5	0.34	1.15	0.84	0.38	1.11	0.79
6	0.25	1.15	0.84	0.24	0.96	0.66
7	0.25	1.15	0.84	0.24	0.96	0.66
8	0.38	1.15	0.90	0.29	1.06	0.73
9	0.35	1.16	0.90	0.29	1.06	0.73
10	0.35	1.16	0.90	0.29	1.06	0.73
N	123	123	123	127	127	127

Os trabalhos experimentais realizados incidiram principalmente sobre o desenvolvimento e validação de dois fitomonitorios: da transpiração e do estado hídrico das plantas. A quantificação da transpiração instantânea foi obtida através do método Granier, tendo-se procedido à verificação do método, quer em lisímetro, quer em condições de campo. Quanto à medição do estado hídrico das plantas/coberto existe uma lacuna dos métodos disponíveis para a determinação quantitativa. Com base nos trabalhos realizados, foi apresentado um novo índice microdendrométrico, que resulta da combinação de MDS e OGR e que permitiu quantificar relativamente bem o potencial hídrico do ramo, apesar de os casos de validação em pomar serem insuficientes para que essa validação seja totalmente conclusiva.

Quanto à instalação do sistema de fitomonitorização na unidade a monitorizar (parcela ou talhão) será necessário obter uma boa amostragem do coberto para que seja representativa do coberto vegetal, tal como demonstrado em 5.4.3.1 em relação à quantificação da transpiração com base em medições do fluxo de seiva.

Na utilização do método de Granier em tempo real será necessário introduzir uma variante no processo de determinação de  $\Delta T_x$ . Este modo de execução (tempo real) inviabiliza a aplicação de médias e máximos móveis centrados no dia para o qual se está a determinar o parâmetro. A solução poderá passar por utilizar o valor de  $\Delta T_x$  do último dia ao qual é possível aplicar a metodologia apresentada em 5.2.3.2.

A informação recolhida pelo sistema de monitorização deverá ser sintetizada a um único valor por variável, por unidade de observação (valor médio e indicador de dispersão/confiança), para ser integrável no restante sistema, armazenável e posteriormente facilmente acessível. Deverá também ser guardada a ETo e o tempo fisiológico da cultura (estado fenológico). Esta informação deverá ser analisada em duas fases: em tempo de execução, para identificar um desenvolvimento da cultura

diferente do normal e ajustar os parâmetros culturais para as fases seguintes; anualmente para ajustar a curva do coeficiente cultural usada – extracção de conhecimento.

### **6.3 Modelo SPAC**

O modelo SPAC do sistema ISIS tem como propósito realizar a previsão das relações hídricas das plantas/coberto vegetal a curto/médio prazo. Com base no conhecimento do estado actual da cultura, adquirido pelo sistema de monitorização vegetal, pretende-se inferir a evolução do sistema vegetal - transpiração e estado hídrico das plantas. A informação adquirida pelo sistema de fitomonitorização é portanto utilizada para caracterizar o estado inicial (actual) da cultura a partir do qual decorre a previsão/simulação das condições futuras. Atendendo a que a procura evaporativa da atmosfera (ET<sub>o</sub>) é o propulsor da transpiração e dos consequentes movimentos de água no sistema SPAC, incluindo os movimentos de água no solo (em especial em regime não saturado), a previsão será suportada pela previsão de ET<sub>o</sub>. Neste modelo é necessário modelar três processos convenientemente: a extracção de água do solo pela planta; o fluxo de água através do sistema vascular da planta (raiz – folha), incluindo a capacitância hídrica dos tecidos; e a transpiração.

#### **6.3.1 Formalização matemática do modelo SPAC**

Apresentam-se as equações matemáticas que formalizam o modelo SPAC, como apresentado na Figura 3.5, e estabelecem a relação entre o problema e as leis fundamentais que o descrevem.

##### **6.3.1.1. Extracção radicular**

A modelação da extracção radicular e a passagem do vapor de água da folha para a atmosfera são processos difíceis de modelar e apesar de distantes fisicamente estão intimamente ligados. À medida que o solo apresenta menos água disponível, a transpiração deixa gradualmente de ser imposta pelas condições atmosféricas e passa a ser determinada pela disponibilidade hídrica do solo/raiz. Considerando esta relação intricada entre transpiração/absorção radicular, para prever a transpiração da cultura não é suficiente dispor da previsão da procura evaporativa que irá ser imposta às plantas a curto/médio prazo, é preciso liga-la com o processo de extracção radicular que vai determinar o estado hídrico da planta e o controlo estomático exercido.

A modelação da extracção radicular é ainda um aspecto das relações hídricas das plantas menos conseguido e a maioria das aproximações baseia-se numa das formas apresentadas em 2.1.1.1. A implementação de modelos de carácter microscópico é impraticável e mesmo em estudos de investigação científica são de difícil aplicação por requererem estudos exaustivos da geometria do sistema radicular. Os cobertos lenhosos aos quais este sistema se direcciona apresentam

anisotropia na distribuição do sistema radicular no solo, pelo que a definição de camadas de solo com densidade radicular homogénea não é permissível. Deste modo, os tipos de modelação por camadas também não descrevem convenientemente estes cobertos.

Com base nas características específicas dos cobertos lenhosos anisotrópicos (perenes), optou-se por desenvolver uma nova abordagem dando bastante importância à modelação do potencial mátrico do solo na interface solo-raiz, como advogado por Green *et al.* (2006). A abordagem considera um modelo híbrido dos modelos microscópico e macroscópico. Considera uma densidade de raízes em diferentes volumes de solo e o movimento convergente de água no solo em direcção às raízes no interior de cada um dos volumes. Ao modelar o fluxo de água no solo obvia-se a sua medição, conseguindo-se prever quando se torna necessário actuar na disponibilidade hídrica do solo para otimizar a actividade das plantas (Green *et al.*, 2006), traduzindo-se desta forma o aumento de complexidade do sistema (parametrização) num menor custo de instalação (sensores) e operação (realização de medições para calibração, substituição de sensores, etc.).

Esta abordagem é conceptual porque é feita uma abstracção da representação da geometria concreta do sistema radicular. O volume de solo explorado pelo sistema radicular das plantas é particionado em volumes nos quais se consideram características homogéneas quanto à densidade de raízes e propriedades do solo, constituindo deste modo uma abstracção do modelo por camadas. O volume total corresponde ao solo explorado, quer directamente na proximidade de raízes, quer indirectamente pelos movimentos de água no solo originados pelos gradientes de carga hidráulica criados pela extracção de água pelas plantas. A partição deste volume é estabelecida de forma a poder considerar uma densidade média de raízes e características hidráulicas do solo homogéneas em cada volume. A abstracção da delimitação exacta dos volumes permite modelar de forma expedita uma distribuição do sistema radicular desconhecida em concreto, mas considerar o conhecimento existente sobre o processo de fluxo de água no solo e os hábitos de colonização do solo de cada espécie vegetal e sistema cultural, relacionando com as características do local, observáveis pela abertura de perfis no solo e pela avaliação do sistema de rega. Em cada um dos volumes de solo é considerado o processo de extracção de água pelas raízes e o movimento de água no solo originado pela depleção de água na proximidade das raízes.

Para a implementação desta abordagem, consideraram-se três volumes de solo, cuja soma é igual ao volume total do sistema radicular da planta. Para cada volume de solo é considerada uma densidade radicular em termos de área de raízes por unidade de volume. Com este índice de área radicular ( $m^2 m^3$ ), determina-se a espessura da camada fictícia de solo sobre a superfície radicular, de acordo com a Eq.[6.2] e representado esquematicamente na Figura 6.6. Esta espessura traduz o

afastamento entre planos de raízes e a distância do percurso que na situação mais desfavorável a água no solo terá de percorrer até à superfície da raiz, não se considerando nenhum factor de tortuosidade no percurso.

$$x_{\max} = R_d^{-1} \quad [6.2]$$

onde,

$x_{\max}$  espessura da camada de solo hipotética sobre as raízes (m);

$R_d$  densidade radicular, área de raízes activas por unidade de volume de solo ( $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ ).

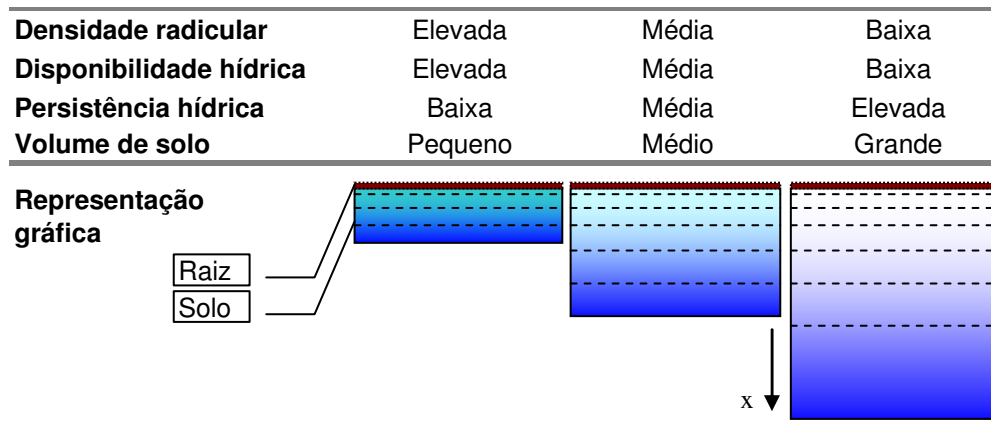


Figura 6.6 – Representação gráfica da modelação da extracção de água pelas plantas com camadas de solo sobre a superfície radicular, identificando-se as propriedades atribuídas a cada uma das partições (considerando três volumes de solo).

Para simplificar a implementação do modelo consideram-se as raízes como superfícies e deste modo considera-se que o volume de cada uma das partições do sistema radicular é ocupado apenas por solo. Esta simplificação não deverá contudo introduzir erros significativos na determinação do volume de solo e respectivo armazenamento hídrico porque o volume das raízes é geralmente pequeno quando comparado com o volume de solo que colonizam.

Para determinar o fluxo no interior dos volumes de solo, originado principalmente pela absorção radicular, é aplicada a equação de Darcy, Eq. [6.3]. Na equação considera-se a pressão efectiva de água no solo e não a carga hidráulica por se considerar que a extracção radicular origina um fluxo convergente para as raízes (em qualquer direcção) e se admitir que este fluxo ocorre principalmente em regime insaturado e a componente gravitacional ( $z$ ) ser desprezável. Considera-se também que o fluxo ocorre apenas segundo a direcção perpendicular à superfície da raiz ( $ox$ ) pelo que o fluxo ( $\varphi_x$ ) é definido pela quantidade de água transferida por unidade de área paralela à superfície da raiz e por unidade de tempo.

$$\varphi_x = -K(\theta) \frac{dh}{dx} \quad [6.3]$$

onde,

$\phi_x$  quantidade de água transferida por unidade de área paralela à superfície da raiz e por unidade de tempo ( $L T^{-1}$ );

$K(\theta)$  condutividade hidráulica em função do teor de água do solo ( $L T^{-1}$ ).

$dh/dx$  gradiente de pressão efectiva ( $L L^{-1}$ ) que representa a força motriz para os movimentos de água no solo, desprezando a variação de  $z$  por se considerar que o fluxo ocorre em qualquer direcção e predominantemente em solo não saturado e deste modo  $dz$  comparado com  $dh$  é desprezável.

Para cada um dos volumes de solo definidos, a aplicação da equação da continuidade permite descrever a variação da massa de água em camadas de solo internas ao volume, durante um intervalo de tempo, que é igual ao balanço da água que entra (*hydraulic lift*, rega, precipitação) e que sai (extracção radicular, drenagem, evaporação). A equação da continuidade, segundo a direcção  $ox$  é traduzida pela Eq. [6.4] (Fernando, 1992). Num determinado intervalo de tempo existe igualdade entre o balanço de água que entra e que sai dessa camada e a variação do armazenamento interno.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial \phi_x}{\partial x} + S \quad [6.4]$$

onde,

$d\theta/dt$  variação do armazenamento de água na camada no intervalo  $dt$ ;

$d\phi_x/dx$  balanço do fluxo de água através dos limites da camada de solo de espessura  $dx$ ;

$S$  termo de produção, negativo se for um sumidouro (ex.: extracção radicular, evaporação, etc.) e positivo se for uma fonte (ex.: *hydraulic lift*, rega, precipitação).

Combinando as equações [6.3] e [6.4] obtém-se a equação geral do escoamento, Eq. [6.5].

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + S \quad [6.5]$$

A resolução desta equação tem de ser feita numericamente o que implica utilizar discriminação temporal e espacial descontínua.

Como referido anteriormente, através da densidade radicular atribuída a cada volume de solo determina-se a relação entre a área de raízes activas e o volume de solo. Conhecida esta relação é determinado o valor de  $x_{max}$  (Eq. [6.2]). Considerando como exemplo uma relação de 25 m<sup>2</sup> de raízes por m<sup>3</sup> de solo, a espessura  $x_{max}$  obtida é de 0.04 m (4 cm). No volume de solo (de cada partição), de espessura  $x_{max}$ , são definidas as camadas representadas na Figura 6.7, que são utilizadas para a resolução numérica da equação geral do escoamento. O número ( $i$ ) e o espaçamento ( $x$ ) das camadas internas, para reduzir o tempo de cálculo e garantir estabilidade numérica, depende de  $x_{max}$ , introduzindo-se a condição de a última camada ser mais espessa que a penúltima. A Eq. [6.6] é utilizada para determinar a espessura de cada uma das camadas, definindo-

se camadas exponencialmente mais próximas na proximidade da raiz onde os gradientes de  $\Psi$  são maiores, como utilizado por Sperry *et al.* (1998).

$$x_i = (x_r + 1)^{(i/m)} - 1 \quad [6.6]$$

onde,

$i$  número da camada de solo (-);

$x_i$  espessura da camada de solo sobre a raiz até ao limite da camada  $i$  (mm);

$x_r$  espessura máxima da camada de solo sobre a raiz na qual se considera haver fluxo radial (mm);

$m$  numero de camadas (-).

Para a resolução numérica da Eq. 6.5 são considerados pequenos acréscimos de tempo ( $\Delta t$ ) e de espaço ( $\Delta x$ ), considerando que a variação de  $\theta(t)$  é linear no intervalo  $\Delta t$  e que  $h(x)$  é linear no intervalo  $\Delta x$ .

Para a determinação da condutividade hidráulica nos limites entre camadas, considerou-se a média geométrica das condutividades das camadas adjacentes, como considerado por Fernando (1992).

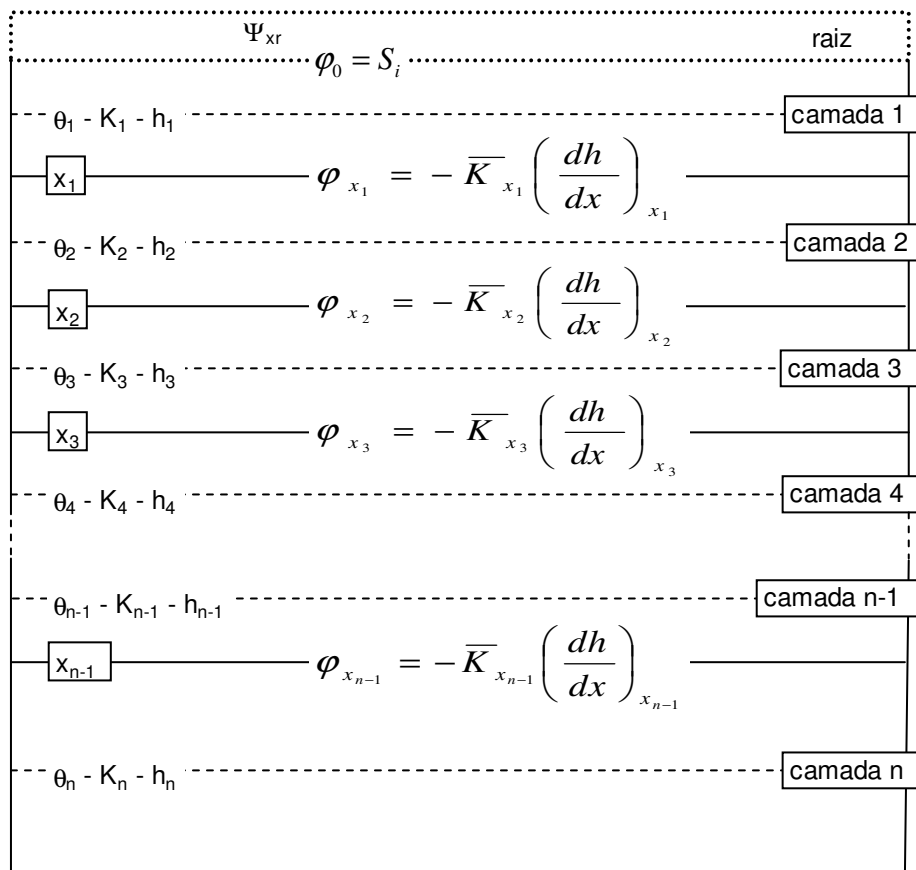


Figura 6.7 – Esquema da divisão do solo na proximidade das raízes para a resolução da equação do escoamento.

Como apresentado em 3.4.3, a extracção de água pelo sistema radicular é particionada pelos três volumes em função da condutância hidráulica do sistema radicular e da diferença de potencial hídrico operante entre o solo e a raiz. A modelação do fluxo de água no solo permite determinar o

potencial na proximidade da raiz que se considera ser equivalente à pressão efectiva da camada <sup>124</sup>. A modelação da extracção radicular passa agora a depender exclusivamente da resistência imposta à passagem solo-raiz – Eq. [6.7], eliminando-se a resistência do solo e o funcionamento do sistema radicular é descrito pela Eq. [6.8].

$$Q_{r,i} = S_i = G_{r,i} (\Psi_{xr} - \Psi_{r,i}) \quad [6.7]$$

$$Q_{rs} = G_{r1} (\Psi_{xr} - \Psi_{r1}) + G_{r2} (\Psi_{xr} - \Psi_{r2}) + G_{r3} (\Psi_{xr} - \Psi_{r3}) \quad [6.8]$$

onde,

$Q_{r,i}$ ,  $Q_{rs}$  fluxo da macrorraiz  $i$  e do sistema radicular, respectivamente ( $\text{g s}^{-1}$ );

$G_{r,i}$ ,  $G_{r1}$ ,  $G_{r2}$  e  $G_{r3}$  condutâncias hidráulicas das diferentes macrorraízes ( $\text{g MPa s}^{-1}$ );

$\Psi_{r,i}$ ,  $\Psi_{r1}$ ,  $\Psi_{r2}$ ,  $\Psi_{r3}$  potenciais hídricos à superfície da raiz nos diferentes volumes de solo (MPa);

$\Psi_{xr}$  potencial hídrico no xilema da raiz na zona de convergência das raízes finas com o sistema radicular de transporte (raízes grossas) (MPa).

Nesta formulação considerou-se a resistência total verificada na passagem solo-xilema da raiz (fluxo radial) e no fluxo axial através do xilema da raiz até às raízes principais. Esta simplificação é baseada no facto da resistência ao fluxo axial ser geralmente muito inferior à verificada no fluxo radial (Steudle e Peterson, 1998). Alguns estudos de comparação da anatomia do xilema de raízes e de ramos demonstraram que tipicamente as raízes têm feixes condutores com células mais longas e de maior diâmetro (Jackson *et al.*, 2000). Segundo estes autores é possível aplicar aqui o princípio de que a condutividade dos feixes condutores é proporcional à quarta potência do raio das células de xilema (como enunciado na lei de Poiseuille) e o fluxo é geralmente mais eficiente em células longas devido à água ter de passar através de menos membranas que separam as células de xilema nos feixes condutores. Desta forma, a condutância da raiz, ainda que difícil de medir, deverá ser superior à do restante sistema vascular axial. Steudle e Peterson (1998) referem também que a resistência hidráulica axial no xilema não limita geralmente o fluxo. Estes pressupostos foram considerados no modelo construído, tal como assumido também por Steudle e Peterson (1998) e Lhomme *et al.* (2001). A modelação utilizada considera que o xilema das raízes médias e grossas funciona como uma rede hidráulica que concentra a água absorvida, principalmente pelas raízes finas, da mesma forma que o tronco se ramifica em ramos para vincular a água até às folhas.

Neste modelo considerou-se como domínio da extracção radicular os movimentos de água no solo na proximidade da raiz e o fluxo nas raízes (finas e médias) até chegar às raízes de maiores dimensões, que se consideram ramificações do tronco.

---

<sup>24</sup> Nesta fase de desenvolvimento não se considerou o efeito da salinidade neste processo e consequentemente o potencial hídrico modelado não considera a componente osmótica.

Ao considerar uma resistência constante à passagem solo-raiz não se está a considerar a variação de resistência de contacto solo-raiz que se admite aumentar significativamente com a dessecação do solo (argilas expansíveis) e contração da raiz pela redução do potencial hídrico (Burch, 1979).

### 6.3.1.2. Fluxo de água e capacitância hídrica da planta

A ligação da transpiração à absorção radicular está dependente de dois processos: do fluxo de água no sistema vascular e da capacitância hídrica dos tecidos.

Para permitir a inclusão da capacitância hídrica dos tecidos, o sistema vascular da planta foi dividido em dois segmentos com as mesmas propriedades hidráulicas (Figura 6.8). O modelo proposto considera um sistema radicular constituído por três macrorraízes, como apresentado na modelação da extracção radicular, dois locais de armazenamento interno na planta (capacitância) e segmentos de transporte nos quais não se admite haver variação de armazenamento.

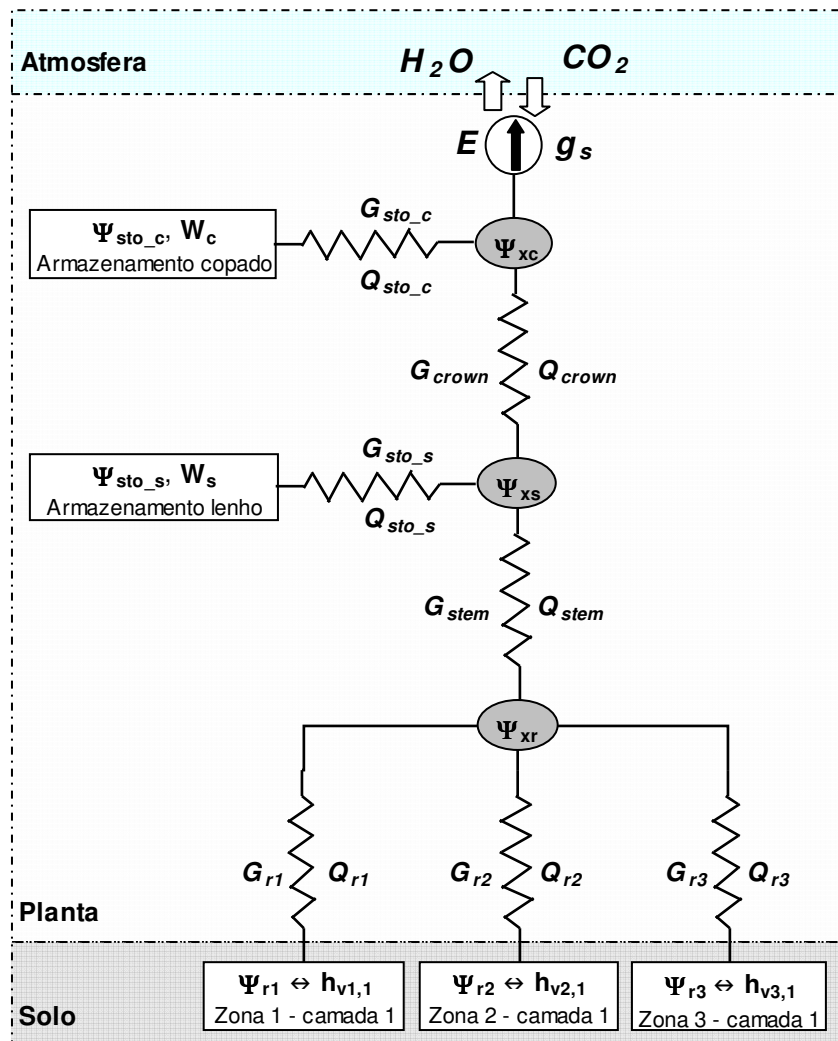


Figura 6.8 – Representação do modelo SPAC utilizado para descrever a extracção radicular, fluxo de água na planta e capacitância hídrica dos tecidos. O modelo compreende três macrorraízes ligadas em paralelo ao sistema vascular e dois locais de armazenamento hídrico variável (tronco e copado).

Foram considerados dois tipos de locais de armazenamento: armazenamento de variação rápida, associado às folhas e ramos jovens, localizados no copado, por apresentarem maior disponibilidade; armazenamento de variação lenta, associado aos tecidos lenhosos da planta, essencialmente no tronco, ramos grossos (eixos) e raízes grossas (vd. 3.2.1.1 - microdendrometria).

O modelo SPAC representado na Figura 6.8 é suportado pelas equações que descrevem os fluxos nos segmentos de ligação, pelos valores dos potenciais hídricos no solo e nos locais de armazenamento e pela transpiração imposta pelas condições do meio, regulada pela planta. As equações que traduzem os fluxos nos segmentos são apresentadas na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Equações matemáticas que descrevem os fluxos nos percursos de ligação e nos elementos de ligação ao exterior ou a locais de armazenamento (Figura 6.8).

<b>Equações</b>	<b>Variáveis e parâmetros</b>
$Q_{r,i} = G_{r,i} (\Psi_{xr} - \Psi_{r,i})$ $i=1,2,3$ Equação 6.9	$Q_{r,i}$ fluxo/absorção radicular da macrorraiz $i$ ( $g\ s^{-1}$ ); $G_{r,i}$ condutância hidráulica da macrorraiz $i$ ( $g\ MPa\ s^{-1}$ ); $\Psi_{r,i}$ potencial hídrico à superfície da macrorraiz $i$ (MPa); $\Psi_{xr}$ potencial hídrico no xilema da raiz na zona de convergência do sistema radicular (MPa).
$Q_{stem} = G_{stem} (\Psi_{xs} - \Psi_{xr})$ Equação 6.10	$Q_{stem}$ fluxo solo-tronco ( $g\ s^{-1}$ ) $G_{stem}$ condutância hidráulica solo-tronco ( $g\ MPa\ s^{-1}$ ); $\Psi_{xs}$ potencial hídrico no xilema do tronco (MPa); $\Psi_{xr}$ potencial hídrico no xilema da raiz na zona de convergência do sistema radicular (MPa).
$Q_{crown} = G_{crown} (\Psi_{xc} - \Psi_{xs})$ Equação 6.11	$Q_{crown}$ fluxo tronco-copado ( $g\ s^{-1}$ ); $G_{crown}$ condutância hidráulica tronco-copado ( $g\ MPa\ s^{-1}$ ); $\Psi_{xc}$ potencial hídrico no xilema do copado (MPa); $\Psi_{xs}$ potencial hídrico no xilema do tronco (MPa).
$Q_{sto_s} = G_{sto_s} (\Psi_{xs} - \Psi_{sto_s})$ Equação 6.12	$Q_{sto_s}$ fluxo entre o xilema do tronco e o local de armazenamento situado no tronco ( $g\ s^{-1}$ ); $G_{sto_s}$ condutância hidráulica do elemento de ligação do xilema do tronco ao local de armazenamento hídrico do tronco ( $g\ MPa\ s^{-1}$ ); $\Psi_{xs}$ potencial hídrico no xilema do tronco (MPa); $\Psi_{sto_s}$ potencial hídrico nos tecidos de armazenamento hídrico do tronco (MPa).
$Q_{sto_c} = G_{sto_c} (\Psi_{xc} - \Psi_{sto_c})$ Equação 6.13	$Q_{sto_c}$ fluxo entre o xilema do copado e o local de armazenamento situado no copado ( $g\ s^{-1}$ ); $G_{sto_c}$ condutância hidráulica do elemento de ligação xilema do copado ao local de armazenamento hídrico do copado ( $g\ MPa\ s^{-1}$ ); $\Psi_{xc}$ potencial hídrico no xilema do copado (MPa); $\Psi_{sto_c}$ potencial hídrico nos tecidos de armazenamento hídrico do copado (MPa).

A aplicação da equação de balanço a cada um dos pontos identificados a sombreado na Figura 6.8 ( $\Psi_{xr}$ ,  $\Psi_{xs}$ ,  $\Psi_{xc}$ ) permite formular o sistema de equações Eq. [6.14]. A resolução deste

sistema de equações lineares permite determinar o valor do potencial hídrico nos 3 pontos ( $\Psi_{xr}$ ,  $\Psi_{xs}$ ,  $\Psi_{xc}$ ) em cada instante e determinar os fluxos ao nível radicular e nos órgãos de armazenamento.

$$\left. \begin{aligned} Q_{sto\_c} + Q_{crown} - E &= 0 \\ Q_{sto\_s} + Q_{stem} - Q_{crown} &= 0 \\ Q_{r1} + Q_{r2} + Q_{r3} - Q_{stem} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad [6.14]$$

A quantidade de água perdida (E), considerando o princípio de conservação de massa, terá de ser fornecida pela variação do armazenamento interno dos tecidos (capacitância) e pela absorção radicular. A contribuição relativa de  $Q_{rs}$  e  $Q_{sto}$  depende do estado hídrico do solo e dos tecidos de armazenamento da planta, bem como da condutância associada a estas fontes.

Nesta versão do modelo, para simplificar o processo de cálculo, considerou-se que a capacitância de variação rápida ocorre directamente entre os locais de armazenamento e os de evaporação e que a capacitância de variação lenta se encontra localizada a meio do percurso do sistema vascular raiz-folha. Ao considerar-se a ligação directa do fluxo originado pela variação do armazenamento de variação rápida e as perdas de água pela planta, está-se a admitir que as células do mesófilo da folha funcionam como um *buffer* da transpiração. Esta configuração corresponde à utilizada por Zweifel *et al.* (2001), considerando-se também neste estudo igual condutância hidráulica dos segmentos de xilema que ligam o sistema radicular à posição intermédia do tronco ( $G_{stem}$ ) e deste ponto às folhas ( $G_{crown}$ ). Para servir efectivamente como reservatórios de água os tecidos que se admite contribuir para a capacitância hídrica têm de estar relativamente perto e dispor de uma boa ligação hidráulica ao sistema vascular (Meinzer *et al.*, 2001).

A capacitância dos tecidos de armazenamento foi considerada constante (analogia a circuitos eléctricos), devido à maior simplicidade de implementação e por ter fornecido melhores resultados num modelo desenvolvido por Steppe *et al.* (2006a) em relação à utilização de uma capacitância variável em função do potencial hídrico. Segundo resultados obtidos por Meinzer *et al.* (2003), num estudo com quatro espécies lenhosas tropicais, a relação entre a libertação de água e a variação do potencial hídrico nos locais de armazenamento é linear na gama de valores geralmente verificada na espécie (capacitância hídrica constante): à medida que o armazenamento hídrico diminui, o potencial hídrico destes locais baixa linearmente, sendo neste modelo o fluxo entre estes locais e o sistema vascular da planta traduzido pela Eq. [6.12] e Eq. [6.13]. O valor de  $Q_{sto}$  é negativo sempre que ocorre uma diminuição da carga do local de armazenamento e positivo quando ocorre o seu carregamento.

A formulação apresentada permite modelar fluxos internos no sistema SPAC na ausência de perdas por evaporação. Existe fluxo sempre que exista uma diferença de potencial hídrico entre dois pontos do sistema. Pode haver absorção radicular para restituir o armazenamento hídrico dos tecidos ou pode haver redistribuição de água no solo através do sistema radicular (*hydraulic lift* e *reverse hydraulic lift*).

Neste modelo não foi considerada a variação da condutância hidráulica do sistema vascular das plantas provocada pela cavitação do xilema. A modelação deste processo é bastante complexa (Hölttä *et al.*, 2002; Vesala *et al.*, 2003) subsistindo mecanismos por explicar convenientemente. A variação do teor de água do próprio sistema vascular devido à cavitação também não foi considerada.

### 6.3.1.3. Transpiração e regulação

As perdas de água verificadas no copado são modeladas considerando uma aproximação à metodologia FAO, Eq. [6.15]. A utilização do conceito  $ET_o$  permite considerar o efeito dos factores ambientais no funcionamento hídrico das plantas, sendo apenas necessário considerar o efeito da regulação estomática na transpiração que, como apresentado em 2.1.3, tem um grande impacto na transpiração nos cobertos rugosos. A regulação do funcionamento estomático foi revisto em 2.1.3.1, pretendendo-se no modelo SPAC aqui apresentado integrar o efeito da disponibilidade hídrica do solo/sistema radicular na redução da transpiração – Eq. [6.15].

$$T = ET_o K_{cb} T_r \quad [6.15]$$

onde,

- $E$  taxa de transpiração ( $\text{g s}^{-1}$ );
- $ET_o$  evapotranspiração de referência ( $\text{g planta}^{-1}$ );
- $K_{cb}$  coeficiente cultural de base (-);
- $T_r$  transpiração relativa (-).

Admitiram-se dois pressupostos:

- A transpiração da cultura em condições de pleno conforto hídrico é determinada pelos factores ambientais da mesma forma que na cultura hipotética de referência, utilizando-se a equação de Penman-Monteith para descrever o processo e um coeficiente cultural;
- Em condições de restrições hídricas, a transpiração é reduzida através do controlo estomático, governado exclusivamente pelo potencial hídrico da planta.

O segundo pressuposto é uma simplificação relativamente grosseira que consiste em admitir que o controlo estomático é governado apenas por aspectos físicos relacionados com a turgescência das células estomáticas e da epiderme da folha, o que representa uma simplificação da regulação do processo ao não considerar a fotossíntese e a concentração interna de  $\text{CO}_2$  (Assmann, 1999; Tuzet *et al.*, 2003), nem os efeitos da regulação hormonal.

Para a modelação da condutância estomática considerou-se como base de trabalho o modelo de Tuzet *et al.* (2003). Este, na sua versão completa, considera que a condutância depende da radiação, temperatura e concentração intercelular de CO<sub>2</sub>, regulada pela fotossíntese e pelo potencial hídrico da folha, que é determinado pelo estado hídrico do solo e pelo fluxo de água no solo e na planta. Este modelo (Tuzet *et al.*, 2003) usa o modelo de Farquhar *et al.* (1980) para a fotossíntese, da qual depende a concentração interna de CO<sub>2</sub>, mas a inclusão destes factores aumentaria significativamente a complexidade do modelo e o número de parâmetros, pelo que, tendo por base a equação proposta por Tuzet *et al.* (2003), para a condutância estomática para o CO<sub>2</sub>, foi aqui considerada apenas como variável descritora do potencial hídrico da folha. Desta forma, utiliza-se a Eq. [6.16] para descrever o controlo estomático da transpiração.

$$g_s = g_{\min} + (g_{\max} - g_{\min}) \frac{1 + \exp[s_f \Psi_f]}{1 + \exp[s_f (\Psi_f - \Psi_l)]} \quad [6.16]$$

onde,

- $g_s$  condutância estomática (mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>);
- $g_{\min}$  condutância estomática residual (mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>);
- $g_{\max}$  condutância estomática máxima (mmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>);
- $\Psi_l$  potencial hídrico da folha (MPa);
- $\Psi_f$  potencial hídrico de referência (MPa);
- $s_f$  parâmetro de sensibilidade (MPa<sup>-1</sup>).

Esta função empírica, tal como a equação original, permite descrever a baixa sensibilidade estomática para valores de potencial hídrico próximos de zero e a rápida redução da condutância com o aumento do potencial acima de determinado valor.

Naor (2000) demonstrou existir uma boa correlação entre a condutância estomática, a transpiração e o potencial hídrico do solo, mas uma má correlação com o potencial hídrico da folha. Neste trabalho, na Eq. [6.16] utilizou-se o potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{xc}$ ) que tem menor variabilidade que o potencial hídrico da folha ( $\Psi_l$ ) e reflecte melhor o estado hídrico do solo.

A transpiração relativa ( $Tr$ ) é obtida pela relação entre a condutância estomática actual e a máxima, como traduzido pela Eq. [6.17].

$$Tr = \frac{g_s}{g_{\max}} \quad [6.17]$$

### 6.3.2 Implementação numérica do modelo

A implementação da formulação matemática apresentada requer o uso de métodos numéricos para modelar o fluxo hídrico no sistema SPAC. O fluxo é determinado por  $ET_o$ , considerando o desenvolvimento da cultura e ajustado pela regulação estomática ( $Tr$ ). O fluxo

originado na folha (transpiração) é propagado no sistema vascular da planta à raiz onde ocorre absorção radicular. Neste processo, ao ocorrer variação do potencial hídrico no xilema em qualquer parte da planta, ocorre variação do armazenamento hídrico dos tecidos adjacentes ao sistema vascular. O fluxo no sistema radicular, considerando  $G_{rs}$ , será conseguido através de uma quebra de potencial hídrico entre o solo e o xilema da raiz, ao qual acresce a quebra de potencial do restante percurso na planta até às folhas para determinar o novo valor de  $\Psi_{xc}$ . A extracção total de água do solo é particionada pelos três volumes de solo em função da condutância hidráulica de cada conjunto solo/raiz e do potencial hídrico de cada um dos volumes de solo. Esta extracção determina um novo estado hídrico do solo, no caso de não haver outros fluxos (rega, precipitação, etc.). Em cada passo de integração, obtém-se também a variação de armazenamento em cada um dos locais com capacitância hídrica e respectivo potencial hídrico final.

A implementação computacional do modelo foi efectuada em linguagem de programação C# (Microsoft Visual Studio 2005, Microsoft .Net Framework). Os dados de entrada e de saída do modelo foram passados em formato "csv" (texto separado por vírgulas), preparados e analisados em Excel (Microsoft Office Excel 2003).

Para a resolução numérica das equações que descrevem o movimento de água no solo e na planta foi utilizado o método de Euler, com um passo de integração de 1 s.

### **6.3.3 Parametrização para os casos de estudo**

Os parâmetros do modelo foram obtidos com base em medições locais, valores encontrados na bibliografia e por ajustamento. Em relação aos valores encontrados na bibliografia, ou mesmo em relação aos medidos, foram realizados alguns ajustamentos que permitiram uma melhoria do desempenho do modelo.

#### **6.3.3.1. Propriedades hidráulicas do solo**

Para a modelação dos movimentos de água no solo é necessário relacionar a pressão efectiva e a condutividade hidráulica, com o teor de água do solo – funções hidrodinâmicas. A determinação destas relações *in situ* é onerosa, a variabilidade dos resultados obtidos é grande e variam ao longo do tempo com as condições do solo (compactação, teor de matéria orgânica, agregação, etc.). Atendendo a estas dificuldades, nos últimos anos surgiram funções, designadas de funções de pedotransferência, que relacionam estas propriedades hidráulicas dos solos, e outras de difícil determinação, com propriedades e parâmetros dos solos de mais fácil determinação (Netto, 2007). Em Portugal, foram realizados alguns trabalhos com estas funções (Paz, 2004). Porém, para os solos do EDM não foram encontradas funções que permitam estimar as propriedades hidrodinâmicas dos solos, requeridas neste estudo.

Tradicionalmente, em hidrologia, para a modelação dos movimentos de água no solo usam-se funções analíticas genéricas por classes de textura dos solos. Para a curva característica dos solos e para a condutividade hidráulica em função do teor de água do solo, as funções mais utilizadas são as de Brooks – Corey e de van Genuchten (Fernando, 1992).

Neste trabalho, optou-se por considerar as de Brooks e Corey, utilizando-se a aplicação SOILPAR<sup>25</sup> para fazer o ajustamento dos parâmetros. Utilizaram-se 6 pontos da curva característica do solo, relativa ao solo do pomar de Briteiros, obtidos pelas medições do teor de água do solo e do potencial hídrico, realizadas em pontos comparáveis com sensores FDR e tensiómetros, respectivamente (vd. 4.4.3). Na Tabela 6.3 apresentam-se os parâmetros obtidos. No entanto, a condutividade hidráulica saturada do solo não foi medida pelo que o valor considerado foi obtido da bibliografia (Fernando, 2002). Optou-se por considerar também esta parametrização para o solo do lisímetro, por apresentar a mesma textura e origem pedológica. No Anexo V apresenta-se a curva característica e da condutividade hidráulica, em função do teor de água do solo, obtidas com a parametrização realizada.

Tabela 6.3 – Parâmetros ajustados das funções hidrodinâmicas de Brooks e Corey.

Parâmetro	Unidades	Valor
Porosidade	cm <sup>3</sup> cm <sup>3</sup>	0.386
Teor de água residual	cm <sup>3</sup> cm <sup>3</sup>	0.020
Pressão de entrada de ar	cm	10.0
Parâmetro de distribuição dos poros	-	0.160
Condutividade hidráulica saturada	cm h <sup>-1</sup>	0.215

### 6.3.3.2. Sistema radicular: configuração e propriedades hidráulicas

O sistema radicular da actinidia, em plantações comerciais adultas, pode explorar até 80 m<sup>3</sup> de solo, com uma densidade média de raízes no volume de solo explorado de 0.5 a 1.1 cm cm<sup>-3</sup>, podendo atingir 7 cm cm<sup>-3</sup> na proximidade da base do tronco (Hugles *et al.*, 1991). Esta densidade é maior perto da base do tronco e diminui com a profundidade e com o aumento da distância radial à base do tronco (Hugles *et al.*, 1991). Contudo o desenvolvimento radicular desta espécie é lento, Segundo observações realizadas por Xiloyannis *et al.* (1997), o sistema radicular de uma planta com 4 anos explorava apenas 1.4 m<sup>3</sup> de solo. O diâmetro das raízes finas, não lenhificadas, varia de 0.5 a 1.5 mm, sendo superior ao da maioria das espécies fruteiras (Hugles *et al.*, 1991). O sistema radicular desta espécie apresenta a particularidade de não ocupar totalmente o solo entre as raízes principais, apresentado zonas com muita densidade de raízes e zonas não exploradas (Hugles *et al.*, 1991). Xiloyannis *et al.* (1993) mediram uma densidade no volume de solo explorado

<sup>25</sup> SOILPAR, soil parameter estimate (v. 2.00), ISCI, Research Institute for Industrial Crops, Bolonha, Itália.

pela planta de  $0.21 \text{ cm}^2 \text{ cm}^3$  no ano de instalação do pomar e de  $0.55 \text{ cm}^2 \text{ cm}^3$  ao quarto ano de produção.

No pomar de Briteiros, abriram-se dois perfis para observação do solo. Estes perfis foram abertos a cerca de um metro da linha, tendo-se na altura identificado uma grande densidade radicular até 50 cm de profundidade. Em ambos perfis foram observadas raízes até 170 cm, embora em pequeno número a essa profundidade.

A planta do lisímetro foi retirada do contentor no final de 2007<sup>26</sup> (30 meses após a instalação no contentor) tendo-se procedido à análise visual da estrutura do sistema radicular. A documentação desta análise encontra-se no Anexo VI. Após a remoção da planta do interior do contentor removeu-se a terra do sistema radicular observando-se uma densidade muito elevada de raízes numa semi-esfera centrada no colo da planta e com um raio de cerca de 40 cm. Apenas na parte inferior havia um volume de solo com menor densidade de raízes. De referir que esta situação deverá diferir significativamente da situação existente no período de realização do ensaio, dado que, na instalação da planta no lisímetro não era visível uma densidade tão elevada. Contudo, o principal objectivo da realização desta observação em 2007 foi o estudo da estrutura do sistema radicular principal e a sua ligação ao tronco, dado que a bibliografia consultada é omissa em relação a este aspecto. Na observação realizada foi possível verificar que as raízes principais do sistema radicular da actinidia ligam todas à base do tronco e que a estas raízes ligam outras mas de dimensões muito inferiores, não se tendo identificado a ramificação destas raízes em duas de dimensões semelhantes. No Anexo VI (imagens 7, 8, 10 e 11) é possível observar esta estrutura, apresentando-se na Tabela A4 a análise à secção condutora do sistema radicular principal em relação à base do tronco. Pela análise destes valores, verifica-se que a soma da área da secção das raízes ( $44.4 \text{ cm}^2$ ) que ligam à base do tronco é aproximadamente igual à secção da base do tronco ( $44.2 \text{ cm}^2$ ). Considerando que estas raízes apresentam igual ou maior condutância hidráulica que o tronco, como assertado em 6.3.1.1, é sustentável considerar o sistema vascular da planta no percurso raiz-copado como um único percurso.

Sperry *et al.* (1998) realizaram testes com um modelo utilizando uma aproximação de modelação deste processo com uma raiz cilíndrica e fluxo radial tendo verificado que a utilização de apenas 3 camadas de solo, quando comparado com a utilização de 50 camadas, introduzia um erro de apenas 2 %. Neste estudo, nas camadas de solo sobre a raiz, foi considerado um máximo de 10 camadas ( $m$ ) para a modelação do fluxo de água no solo e uma zona de influência directa da raiz de 35 mm ( $x_r$ ), obtendo-se as camadas presentes na Figura 6.9. Na modelação dos diferentes casos de

---

<sup>26</sup> Esta operação não foi realizada após o término dos ensaios de 2005, porque havia a possibilidade de voltar a realizar estudos no lisímetro.

estudo e volumes de solo (macrorraízes), foram considerados os mesmos espaçamentos entre camadas, variando o número de camadas em função de  $x_{max}$ , conforme apresentado na Tabela 6.4, respeitando a condição da camada mais distante da raiz apresentar espessura superior à subjacente.

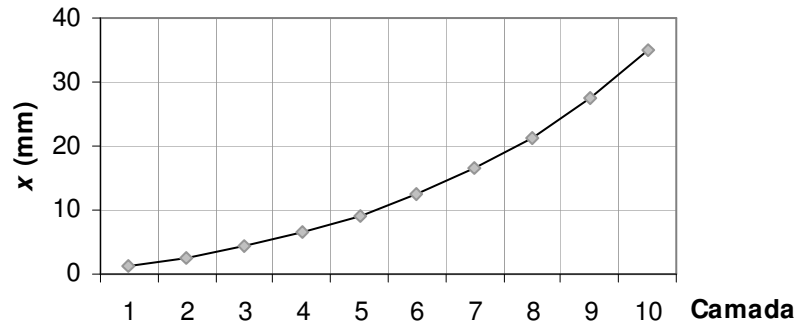


Figura 6.9 – Espessura (x) das camadas de solo consideradas para a resolução da equação geral do escoamento no interior dos volumes de solo associados a cada macrorraiz (Eq. [6.6], considerando  $x_r=35$  mm e  $m=10$ ).

Na Tabela 6.4 apresentam-se as configurações e os parâmetros para os dois casos de estudo analisados. Os valores apresentados foram fundamentados na bibliografia consultada (referida anteriormente), medições locais e ajustamentos para otimização do desempenho do modelo de extracção radicular.

Tabela 6.4 – Parâmetros da configuração do sistema radicular e propriedades hidráulicas do sistema radicular das plantas - lisímetro e pomar (V – volume, A – área, Ra – área de raízes).

	Sistema radicular			Macrorraiz 1					Macrorraiz 2					Macrorraiz 3							
	V	A	$G_{rs}$	V	$R_d$	$R_a$	$x_{max}$	N	$G_r$	V	$R_d$	$R_a$	$x_{max}$	N	$G_r$	V	$R_d$	$R_a$	$x_{max}$	N	$G_r$
	$m^3$	$m^2$	$g MPa^{-1} s^{-1}$	$m^3$	$m^2 m^3$	$m^2$	mm	(camadas)	$g MPa^{-1} s^{-1} G_r$	$m^3$	$m^2 m^3$	$m^2$	mm	(camadas)	$g MPa^{-1} s^{-1} G_r$	$m^3$	$m^2 m^3$	$m^2$	mm	(camadas)	$g MPa^{-1} s^{-1} G_r$
Lisímet.	0.45	30.0	0.65	0.15	120.0	18.0	8.33	4	0.39	0.15	40.0	6.0	25.0	7	0.13	0.15	40.0	6.0	25.0	7	0.13
Pomar	37.0	270.0	8.0	1.0	60.0	60.0	16.7	6	1.8	6.0	15.0	90.0	66.7	10	2.7	30.0	4.0	120.0	250.0	10	3.6

As configurações dos sistemas radiculares (lisímetro e pomar) foram determinadas com base no volume do contentor do lisímetro e no compasso de plantação do pomar, respectivamente. Foram também considerados aspectos relacionados com a espécie vegetal em estudo, ajustados durante a parametrização do modelo. A partição deste volume teve por base as observações dos estudos realizados por Hugles *et al.* (1991) e, no caso de estudo do pomar, as características do sistema de rega (volume de solo humedecido). A condutância hidráulica do sistema radicular foi determinada considerando o estudo de Clearwater *et al.* (2004) e a condutância hidráulica total determinada no ponto seguinte.

### 6.3.3.3. Sistema vascular e capacitância hídrica

Para a implementação do modelo, fizeram-se algumas considerações em relação às propriedades do sistema vascular da planta. Admitiu-se que os dois segmentos do sistema vascular, raiz-tronco e tronco-folha, apresentam a mesma condutância hidráulica, conforme admitido por

Steppe *et al.* (2006a) e Zweifel *et al.* (2001). Admitiu-se também que os segmentos do sistema vascular não apresentam capacitância hídrica. Considerou-se que o potencial hídrico em todo o sistema vascular e locais de armazenamento é resultado apenas da componente de pressão, desprezando-se assim as componentes osmótica e gravitacional, que se admite terem pouca relevância para o fluxo no xilema (Jones, 1992).

A condutividade hidráulica da actinidia (raízes, tronco e ramos) é uma das mais elevadas observadas em fruteiras, com valores de  $6.4 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$  (McAneney e Judd, 1983; Dicho *et al.*, 1999).

Para a estimativa da condutância hidráulica das plantas nos casos de estudo, usou-se o método convencional, designado por método do fluxo evaporativo (*evaporative flux method*; Tsuda e Tyree, 2000). Este método envolve a medição, em situação de fluxo estacionário, do fluxo ( $Q$ ) e a diferença de potencial hídrico entre os dois extremos do percurso. O fluxo nesta situação é proporcional à diferença de potencial hídrico, como apresentado na Eq. [6.18].

$$Q = G \cdot \Delta\Psi \quad [6.18]$$

onde,

$Q$  fluxo no segmento do percurso ( $\text{g s}^{-1}$ );

$G$  condutância hidráulica do segmento ( $\text{g MPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$ );

$\Delta\Psi$  diferença de potencial hídrico entre os dois extremos do segmento (MPa).

Como o potencial hídrico do solo na proximidade da raiz é de difícil medição, fez-se a aplicação da Eq. [6.18] aos casos de estudo, considerando como força motriz o potencial hídrico do ramo, apresentando-se os resultados da Figura 6.10. Desta forma, pretendia-se obter uma estimativa inicial da condutância hidráulica das plantas, que seria posteriormente verificada e ajustada durante o processo de ajustamento de parâmetros no modelo SPAC desenvolvido.

Os valores de condutância calculados (Figura 6.10) foram considerados no ajustamento de parâmetros hidráulicos do modelo SPAC, obtendo-se uma condutância de 0.52 e 4.8  $\text{g MPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$  para as plantas do lisímetro e do pomar, respectivamente (valores finais). Estas condutâncias referem-se ao percurso da interface solo/raiz até ao copado, atendendo que se considerou na calibração o potencial hídrico do ramo, como apresentado em 6.3.4. A partir destes valores, foram obtidas as condutâncias do sistema radicular e do sistema vascular como fracções da condutância global (Tabela 6.4 e Tabela 6.5). O melhor desempenho do modelo foi obtido considerando que 60% e 80% da resistência imposta ao fluxo se verifica ao nível da extracção radicular nos casos de estudo do pomar e do lisímetro, respectivamente. A maior resistência verificada no processo de extracção radicular no lisímetro é justificado pelo corte de parte significativa do sistema radicular quando da instalação da planta no contentor. Segundo estudos realizados em actinidia por

Clearwater *et al.* (2004) aproximadamente 50% da quebra total de potencial hídrico das raízes às folhas (planta) ocorre entre o solo e a base do tronco, menos de 10% entre a base do tronco e as folhas e os restantes 40% nas folhas. Saliendo que neste estudo se considerou o potencial hídrico do ramo e não o potencial hídrico da folha, as relações de quebra de potencial hídrico nas diferentes partes da planta estão próximas das encontradas por este autor.

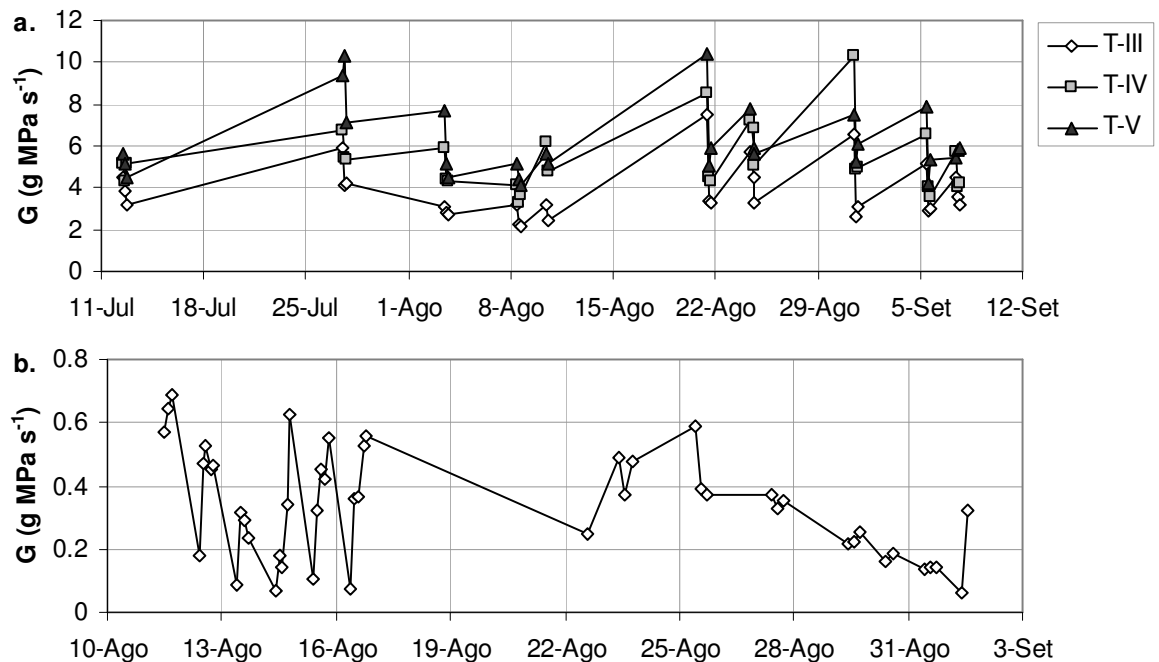


Figura 6.10 – Condutância hidráulica calculada pela Eq. [6.18] para as plantas dos casos de estudo em pomar (a.) e lisímetro (b.), considerando o fluxo de seiva e o potencial hídrico do ramo medidos.

A contribuição dos locais de armazenamento para o fluxo imposto pela transpiração, a cada instante, depende da ligação hidráulica entre estes locais e o sistema vascular principal da planta (Steppe e Lemeur, 2004; Zweifel *et al.*, 2000, 2001). Neste modelo a ligação hidráulica é traduzida pelas condutâncias hidráulicas ( $G_{sto}$ ) considerando-se valores independentes para os dois locais por se admitir tempos de variação diferentes, com o armazenamento do copado mais ligado ao sistema vascular requerendo menos tempo para atingir o equilíbrio com as variações de potencial hídrico do xilema. Segundo Sperry *et al.* (1998) a capacitância hídrica do copado representa cerca de metade do total da planta, tendo utilizado uma partição de 0.4 para as folhas, 0.5 para o tronco, 0.05 para as raízes finas e 0.05 para as raízes de transporte. Zweifel *et al.* (2001) verificaram que, em *Picea abies* L., a transferência da água armazenada no copado para o sistema vascular da planta era três vezes mais rápida que no armazenamento hídrico do tronco. Nos casos de estudo considerados, a condutância hidráulica da ligação do armazenamento hídrico do copado ao sistema vascular, após optimização, foi 5 a 6 vezes superior à do armazenamento hídrico do tronco. Como na bibliografia consultada não foi possível encontrar valores comparáveis com os casos de estudo utilizados, o ajustamento de parâmetros foi efectuado de forma a optimizar o funcionamento do modelo SPAC e

a concordância entre a variação do armazenamento hídrico dos tecidos (tronco e copado) e a variação do diâmetro dos órgãos medidos nesses locais durante os ensaios (vd. 6.3.4.2).

Tabela 6.5 – Propriedades hidráulicas do sistema vascular e dos locais de armazenamento – lisímetro e pomar.

	Sistema vascular		Armazenamento hídrico			
	$G_{stem}$	$G_{crown}$	Lenho		Copado	
			$C_{sto_s}$	$G_{sto_s}$	$C_{sto_c}$	$G_{sto_c}$
	$g MPa^{-1} s^{-1}$	$g MPa^{-1} s^{-1}$	$g MPa^{-1}$	$g MPa^{-1} s^{-1}$	$g MPa^{-1}$	$g MPa^{-1} s^{-1}$
<b>Lisímetro</b>	5.2	5.2	1500	0.15	1500	0.75
<b>Pomar</b>	24.0	24.0	3000	0.3	4000	2

Carlson e Lynn (1991) indicam uma capacitância de 0.2 mm MPa<sup>-1</sup> por unidade de área foliar para pequenas árvores o que, considerando o valor indicativo de LAI dos pomares de actinidia (2.5 a 3.0, Xiloyannis *et al.*, 1997), forneceria para este compasso de plantação (pomar) uma capacitância de 10 a 12 kg MPa<sup>-1</sup>, um pouco acima do utilizado (7 kg MPa<sup>-1</sup>). Meinzer *et al.* (2003) verificaram que existe uma relação entre a densidade dos tecidos, a capacitância hídrica, a contribuição das reservas internas para as perdas diárias por transpiração, a condutividade hidráulica, o potencial hídrico mínimo da folha e a vulnerabilidade do xilema à cavitação. De acordo com esta hipótese, a actinidia, que apresenta baixa densidade e elevado teor de água dos tecidos, deverá portanto ter uma grande capacitância, depender significativamente das reservas armazenadas na planta e ter elevada condutividade hidráulica, potencial hídrico mínimo da folha elevado e alta vulnerabilidade do xilema à cavitação. A justificar a maior capacitância do copado e a maior condutância do elemento de ligação ( $G_{sto}$ ), Zweifel *et al.* (2001) verificaram que, numa árvore de *Picea abies* L. com 6 anos, a contribuição à escala diária do armazenamento hídrico do copado era oito vezes superior à contribuição do armazenamento do tronco.

#### 6.3.3.4. Controlo estomático e transpiração

Como apresentado em 6.3.1.3, para a modelação da transpiração com a Eq. [6.15] é necessário determinar o coeficiente cultural de base ( $k_{cb}$ ) e modelar o funcionamento estomático para a determinação do factor de redução da transpiração em relação à situação de pleno conforto hídrico ( $T_r$ ).

A condutância do copado, considerada no cálculo da transpiração, deveria resultar da integração da condutância estomática das folhas em diferentes zonas do copado para o nível do coberto (Ronda *et al.*, 2001). No entanto, na modelação da transpiração admitiu-se que a condutância do copado apresenta um comportamento semelhante ao verificado ao nível das folhas expostas, nas quais foi medida a condutância estomática que serviu de base para a parametrização do modelo. Para o ajustamento dos parâmetros da Eq. [6.16] utilizaram-se as medições da

condutância estomática realizadas nos diversos estudos (pomar e lisímetro; Figura 6.11). Os parâmetros ajustados foram os seguintes:  $g_{min}=80 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $g_{max}=700 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $\Psi_f=0 \text{ MPa}$  e  $s_f=3 \text{ MPa}$ . O valor elevado de  $g_{min}$  ajustado tem concordância com a baixa capacidade de regulação da transpiração através do controlo estomático nesta espécie (Judd *et al.*, 1989). O potencial hídrico da folha ( $\Psi_f$ ) na Eq. [6.16] foi substituído pelo potencial hídrico do ramo, que se pensa ter a vantagem de integrar melhor o estado hídrico geral da planta.

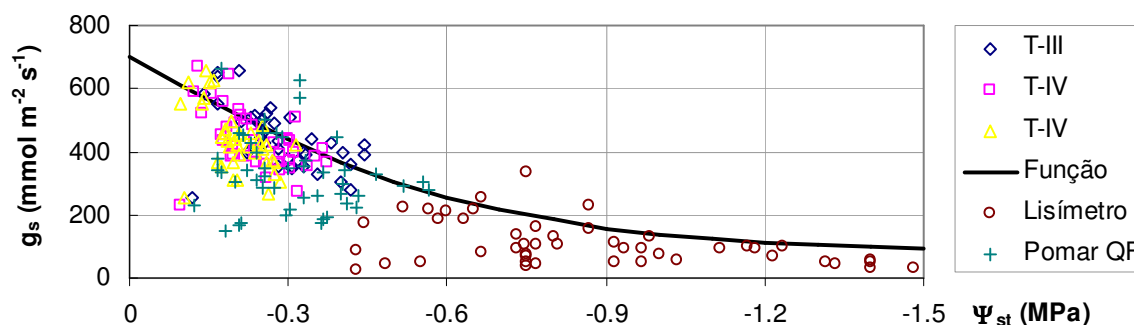


Figura 6.11 – Representação dos valores de condutância estomática observados nos estudos realizados em actinidia e função ajustada (Eq. [6.16],  $g_{min}=80 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $g_{max}=700 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ,  $\Psi_f=0 \text{ MPa}$  e  $s_f=3 \text{ MPa}$ ); T-III, T-IV e T-V valores observados no pomar de Briteiros; Lisímetro e Pomar QF valores observados no ensaio em lisímetro, planta do contentor e do pomar contíguo, respectivamente.

A determinação dos valores de  $K_{cb}$  foi baseada na quantificação da transpiração (vd. 5.2.3.3 e 5.3.4.4), posteriormente ajustada para optimização do modelo. O coeficiente cultural para o caso de estudo do lisímetro foi mantido constante ao longo de todo o período considerado. Considerando uma área de  $20 \text{ m}^2$  para a aplicação da Eq. [6.17], o  $K_{cb}$  foi de 0.56. Para o pomar, utilizaram-se os talhões T-III e T-IV na avaliação do modelo SPAC e posterior avaliação do sistema ISIS. Neste caso utilizou-se um período mais alargado pelo que houve necessidade de considerar a evolução de  $K_{cb}$ , como verificado nas medições efectuadas (vd. 5.3.4.4). O valor inicial em 7 de Julho (2006) foi de 0.52 para ambos os talhões e o valor final em 13 de Setembro foi de 0.64 e 0.67 para os talhões T-III e T-IV, respectivamente. A variação de  $K_{cb}$  foi ajustada em função do fluxo total acumulado no intervalo.

### 6.3.4 Teste e avaliação nos casos de estudo

A avaliação do modelo foi realizada em duas etapas. Primeiro utilizou-se a transpiração medida (fluxo de seiva corrigido) para calibrar e avaliar a “qualidade” da abordagem considerada na modelação do processo de extracção radicular, procedendo-se posteriormente à calibração e avaliação do submodelo de determinação da transpiração e sua regulação.

#### 6.3.4.1. Extracção radicular com transpiração medida

Na parametrização da modelação deste processo, com imposição do fluxo equivalente ao fluxo de seiva medido, considerou-se apenas metade da capacitância hídrica de variação lenta

(tronco), por se considerar que 50% da variação do armazenamento hídrico ocorre abaixo do ponto de medição do fluxo de seiva (tronco a cerca de 120 cm do solo).

▪ **Caso estudo - Lisímetro**

Como se considerou um período longo para a simulação, de 6 de Agosto a 4 de Setembro de 2005, houve necessidade de incluir a variação do estado do armazenamento hídrico do solo originada pelas regas efectuadas neste período. A forma expedita de incluir as regas na simulação passou por considerar que 75% da rega fica retida no volume de solo correspondente à macrorraiz 1 (até à saturação do solo) e o restante no volume correspondente à macrorraiz 2, caso não se atinja a saturação do solo, situação na qual o remanescente passa para o volume explorado pela macrorraiz 3, até se atingir a saturação.

A modelação da extracção radicular, com a parametrização efectuada, permitiu simular a variação do potencial hídrico do xilema ao nível do copado ( $\Psi_{xc}$ ) (Figura 6.12 e Figura 6.13), que se considerou ter correspondência directa com o potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido.

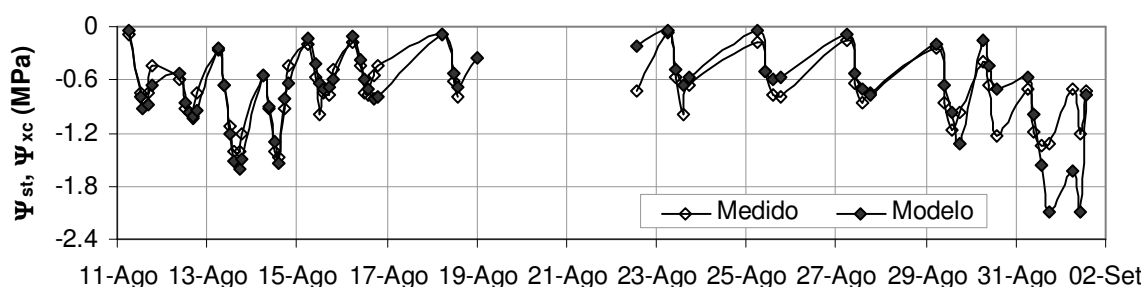


Figura 6.12 – Potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ , Modelo) resultante da imposição do fluxo equivalente à transpiração medida (fluxo de seiva) e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ , Medido) medido ao longo do ensaio no Lisímetro.

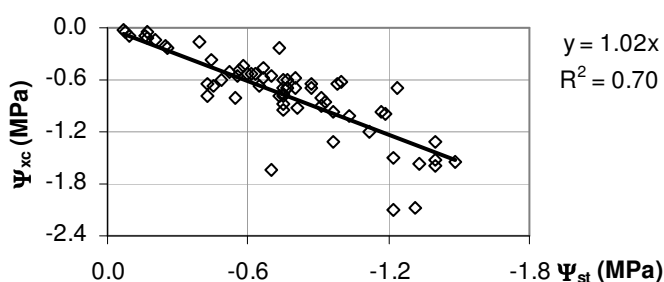


Figura 6.13 – Relação entre o potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo SPAC e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido durante o ensaio no Lisímetro.

Atendendo aos valores de pressão efectiva de água no solo nas camadas adjacentes às raízes (Figura 6.16), cerca de 80% da quebra de potencial hídrico verificado no sistema SPAC até ao copado é originado no processo de extracção radicular, como observado na Figura 6.14. Este aspecto está de acordo com o conhecimento geral do funcionamento hidráulico das plantas: em condições normais, as maiores variações de potencial hídrico ocorrem ao nível da interface solo-raiz e da folha (Kramer, 1983; Hillel, 1998).

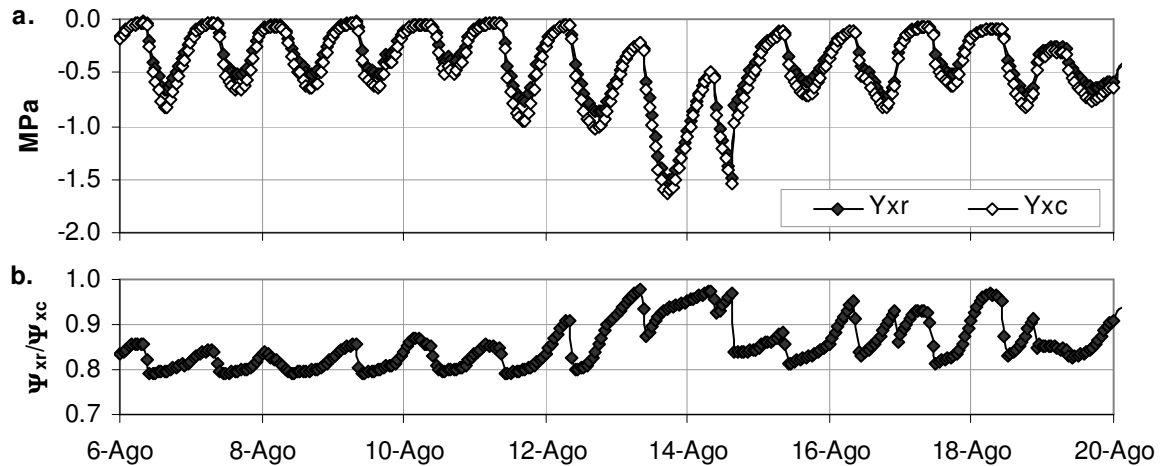


Figura 6.14 – a. potenciais hídricos do xilema na raiz (Yxr) e no copado (Yxc) simulados por imposição do fluxo de seiva medido (caso de estudo do lisímetro); b. relação entre o potencial hídrico do xilema na raiz e no copado.

Na Figura 6.15 (a. e b.) apresentam-se os fluxos simulados nas três macrorraízes, verificando-se a redistribuição de água no solo através do sistema radicular na simulação. Com base na modelação conceptual da extracção radicular utilizada, a macrorraiz 1 está associada a zonas do solo com maior densidade radicular, geralmente localizadas junto à superfície e perto da base do tronco e (neste caso), as macrorraízes 2 e 3 estão associadas à situação oposta, baixa densidade radicular e maior profundidade. Deste modo, o fluxo inverso registado na macrorraiz 1 corresponde à situação de *hydraulic lift* e o fluxo inverso na macrorraiz 3 ao *reverse hydraulic lift*. A transição abrupta na taxa de absorção na zona 1 após o abastecimento hídrico do solo no dia 14 de Agosto, exclusivamente justificada neste modelo por aspectos físicos, foi observada em condições experimentais por Fernández *et al.* (2001) com sensores de fluxo de seiva instalados em raízes de oliveira (*Olea europaea* L.). Os autores verificaram que a extracção de água mudava rapidamente para a zona do solo humedecida, mesmo após longos períodos de stress hídrico, indicando que as raízes mantêm a actividade. Igual comportamento foi observado nesta espécie por Green e Clothier (1995). O fluxo inverso do *hydraulic lift* já foi reportado em alguns estudos como referido por Jackson *et al.* (2000) e corresponde ao fluxo de camadas do solo superficiais, através do sistema radicular, para zonas mais profundas, quando a camada superficial do solo tem maior potencial hídrico. Há evidências que em certas condições a maioria do fluxo vertical de água no solo ocorre através das raízes e não através do solo (Jackson *et al.*, 2000).

Apesar de se ter considerado uma densidade radicular igual nas macrorraízes 2 e 3, a desigual aplicação da água de rega aos diferentes volumes de solo considerados originou um comportamento diferente das três macrorraízes. Um aspecto que ressaltou na parametrização e análise do comportamento do modelo desenvolvido é o facto de muito dificilmente a tensão de água no solo na camada adjacente às raízes descer abaixo dos  $-1.5 \times 10^4$  cm (1.5 MPa), valor geralmente

considerado para o ponto de emurchecimento dos solos. No dia 14 de Agosto, a planta atingiu um estado hídrico bastante severo com a perda de turgescência das folhas ao meio-dia solar. Ao analisar a Figura 6.15c, constata-se que, segundo a simulação efectuada, neste dia, o valor de -1.5 MPa foi atingido na superfície de duas macrorraízes, com o valor na macrorraiz 2 a aproximar-se também deste valor crítico.

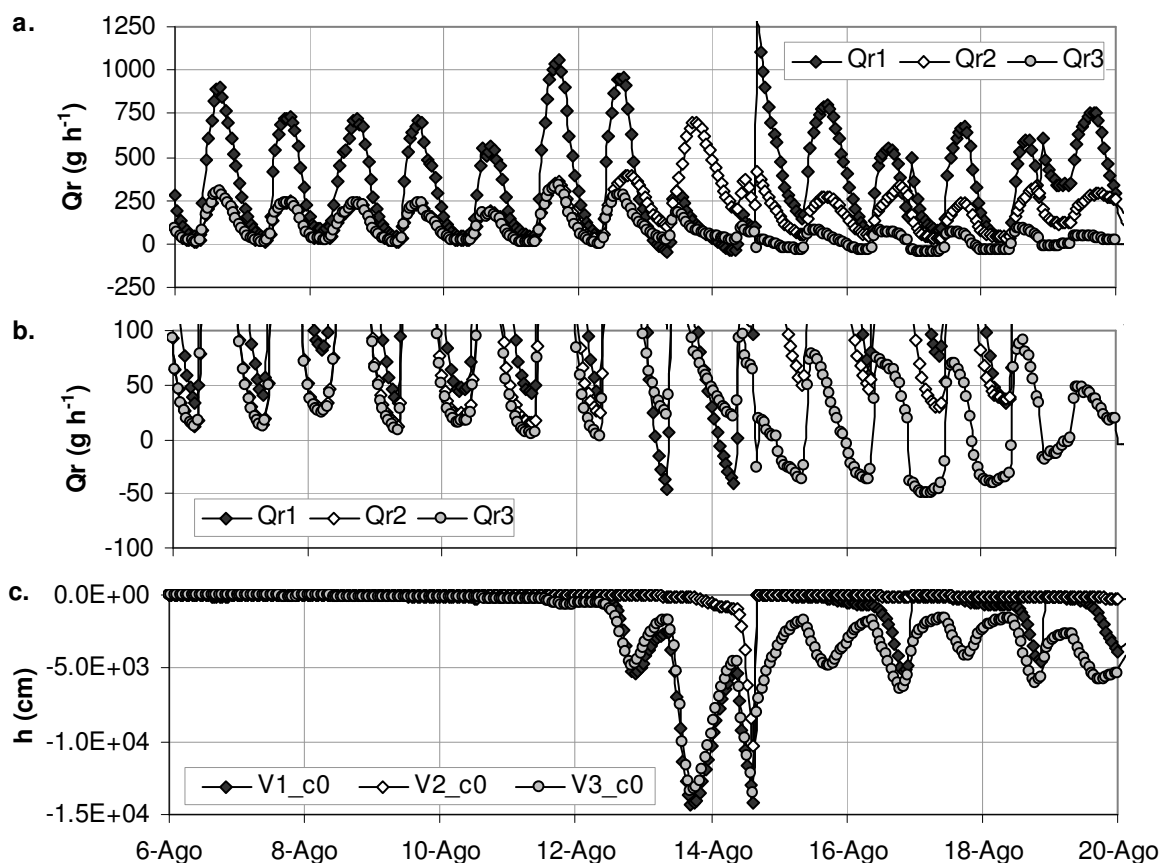


Figura 6.15 – a. e b. (pormenor de a.) fluxo simulado nas macrorraízes do sistema radicular; c. pressão efectiva de água à superfície da raiz nos volumes de solo explorados pelas diferentes macrorraízes, por imposição do fluxo de seiva medido (caso de estudo do lisímetro).

A rápida adaptação do padrão de extracção radicular à disponibilidade hídrica dos diferentes volumes de solo está em consonância com as observações de Green *et al.* (2006), quer na resposta à secura da zona superficial do solo com maior densidade de raízes, aumentando a extracção nas camadas subjacentes, quer num estudo de PRD (*partial root drying*) com a contribuição relativa dos dois volumes de solo a variar significativamente em curtos intervalos de tempo.

Na Figura 6.16 apresenta-se a pressão efectiva de água no solo nas 3 camadas mais próximas das raízes, verificando-se que a quebra abrupta de potencial hídrico na camada de solo adjacente às raízes origina uma descontinuidade no fluxo de água no solo, numa distância de 1.4 mm (vd. Figura 6.9). Como referido em 2.1.1 o estado hídrico do solo pode sofrer uma grande quebra na proximidade das raízes, especialmente para baixos valores de potencial hídrico, podendo

apresentar diferenças de potencial até 1 MPa em distâncias da ordem de um decímetro (Jones e Tardieu, 1998). Por oposição às camadas mais próximas da raiz, onde ocorre a depleção durante o dia e a rehidratação em momentos de menor fluxo, a camada mais distante, que se pode considerar a matriz do solo, apresenta maior constância, não acusando tanto a variação diária (Figura 6.16c). Apesar da redução gradual do teor de água da matriz do solo (camadas mais afastadas da raiz) originar uma redução ainda gradual do potencial hídrico nestas camadas, vai originar uma redução brusca do potencial hídrico nas camadas junto à raiz, o que está relacionado com a forte redução da condutividade hidráulica do solo. A quebra acentuada de potencial hídrico do xilema verificada no período de 13 e 14 de Agosto ficou a dever-se à redução da disponibilidade hídrica do solo, como também demonstrado pela relação  $\Psi_{xr}/\Psi_{xc}$  apresentada na Figura 6.14.

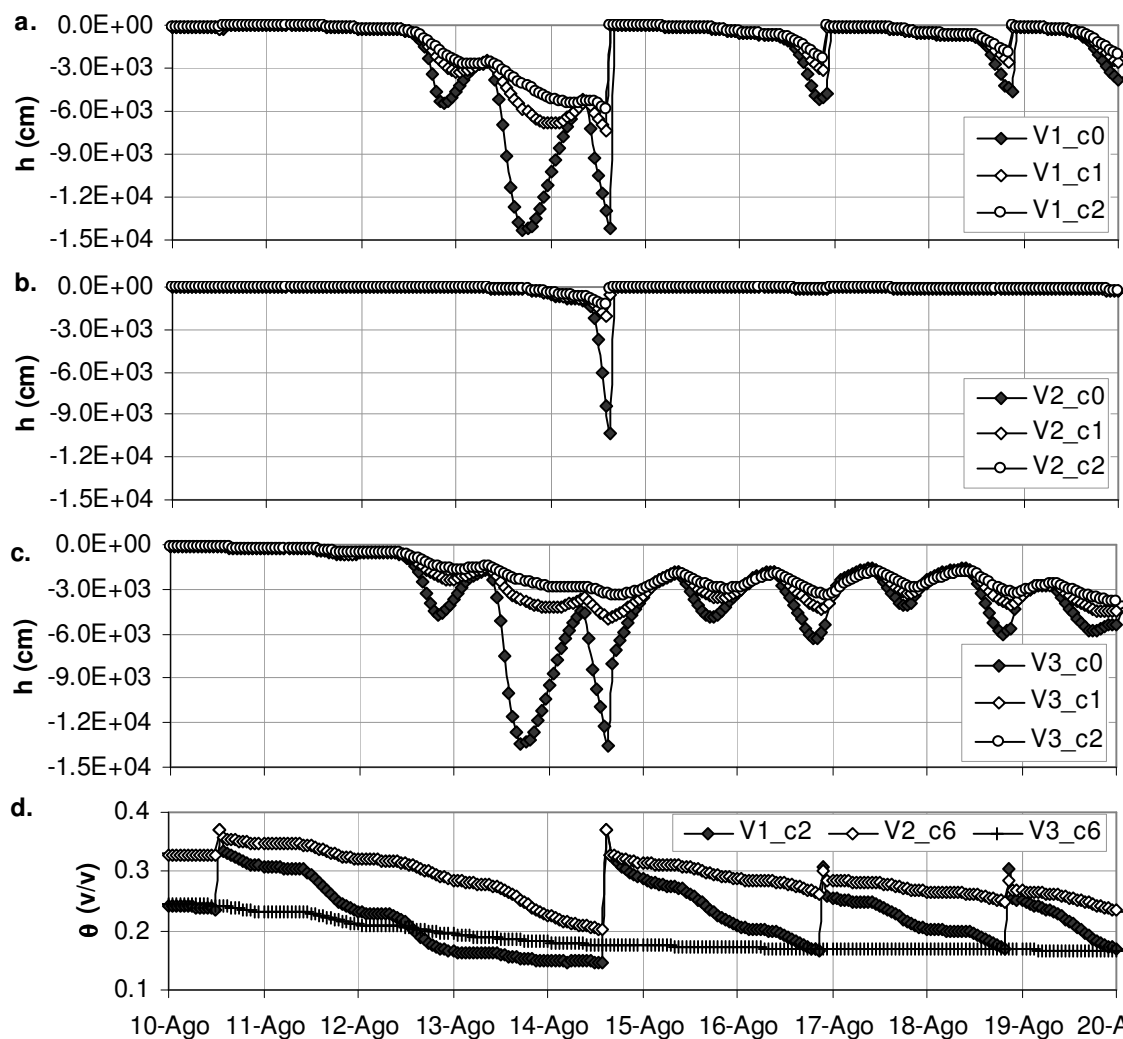


Figura 6.16 – Pressão efectiva de água no solo nas três camadas mais próximas das macrorraízes 1 (a.), 2 (b.) e 3 (c.); d. teor de água no solo na camada mais distante da raiz nas três macrorraízes; simulação para o caso de estudo do lisímetro com transpiração medida.

Da análise dos resultados da simulação verifica-se que muitos aspectos do funcionamento hídrico das plantas são justificados pelo funcionamento hidráulico do conjunto solo-raiz, tais como a

redução do potencial hídrico da planta em condições de elevada transpiração imposta, para igual estado hídrico do solo.

Na Figura 6.17 apresentam-se os fluxos totais diários registados ao nível do sistema radicular. A macrorraiz 1 apresentou sempre maior fluxo, à excepção do dia 13 de Agosto em que houve uma compensação da macrorraiz 2 à carência hídrica do volume de solo explorado pela macrorraiz 1 (vd. Figura 6.16). A macrorraiz 3, apesar de ter a mesma configuração da macrorraiz 2 e as mesmas condições iniciais, devido à ausência de rega neste volume, apresentou um fluxo bastante baixo, atingindo um valor ligeiramente negativo no dia 17 de Agosto, período posterior a uma rega que aumentou a disponibilidade hídrica nos volumes de solo das macrorraízes 1 e 2.

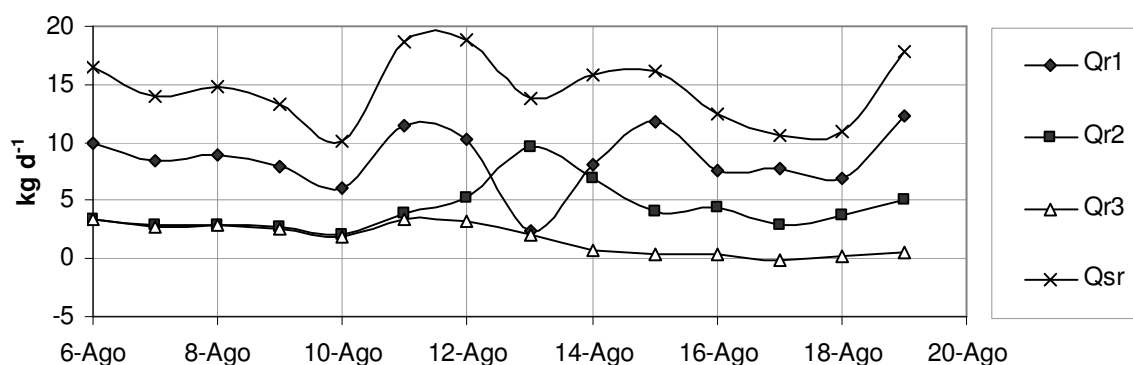


Figura 6.17 – Fluxo total diário registado no sistema radicular (Qrs) e ao nível das diferentes macrorraízes (1, 2 e 3); caso de estudo do lisímetro com transpiração medida.

#### ▪ Caso estudo – Pomar

A análise efectuada para o caso de estudo do lisímetro foi repetida para este caso de estudo, que comportava três talhões com tratamentos de rega distintos, admitindo-se que no início apresentavam as mesmas condições. A apresentação dos resultados da simulação para os três talhões tornava o estudo repetitivo e com pouca informação adicional, pelo que se optou por apresentar os resultados dos talhões T-III e T-IV.

Neste caso de estudo foi considerado na modelação o período de 7 de Julho a 13 de Setembro de 2006. Durante este período foram efectuadas regas no pomar e ocorreu precipitação, pelo que foi necessário integrar estas componentes no balanço hídrico do solo. Tal como para o caso de estudo do lisímetro foi utilizada uma solução expedita. Em relação à rega considerou-se que 75% da rega fica retida no volume de solo correspondente à macrorraiz 1 (até à saturação do solo) e o restante no volume correspondente à macrorraiz 2, caso não se atinja a saturação do solo, situação na qual o remanescente passa para o volume explorado pela macrorraiz 3. Em relação à precipitação foi considerada uma partição de 0.02, 0.30 e 0.60 da precipitação efectiva (vd. 5.4.1), para as macrorraízes 1, 2 e 3, respectivamente (considerou-se uma perda de 8% para perdas superficiais e por percolação). Foi também considerada a condição de caso a capacidade máxima

de retenção do solo seja excedida, a quantidade remanescente passar para a macrorraiz 3 e, se neste volume de solo também for excedida a capacidade de retenção, a água considera-se perdida (drenagem).

Neste caso de estudo foi também necessário considerar a evapotranspiração do estrato inferior (ET<sub>ei</sub>) que é uma componente que diminui a disponibilidade hídrica do solo para a cultura instalada. Nesta fase de desenvolvimento consideram-se os valores determinados em 5.3.4.2. Em desenvolvimentos posteriores para aplicação prática do sistema terá de ser calculada com a ETo prevista com os dados de PNT.

A modelação da extracção radicular, com a parametrização efectuada, permitiu simular a variação do potencial hídrico do xilema ao nível do copado ( $\Psi_{xc}$ ), Figura 6.18 e Figura 6.19, que se considerou ter correspondência directa com o potencial hídrico do ramo medido ( $\Psi_{st}$ ).

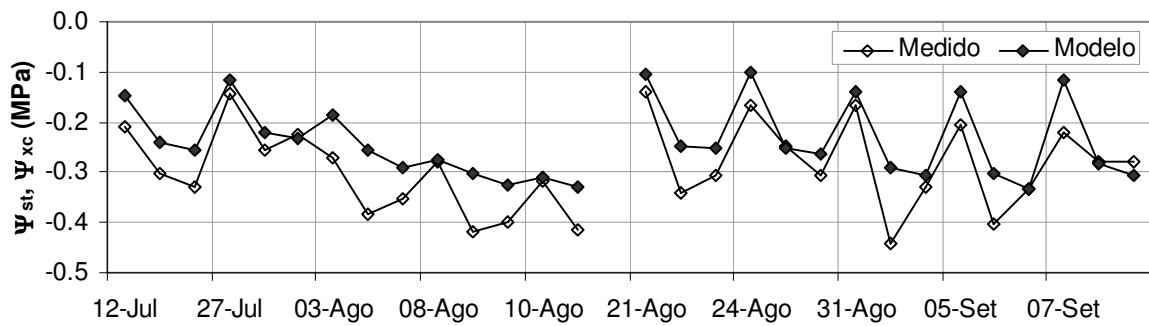


Figura 6.18 – Potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado, resultante da imposição do fluxo equivalente à transpiração medida (fluxo de seiva) e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido ao longo do ensaio no Pomar, T-III.

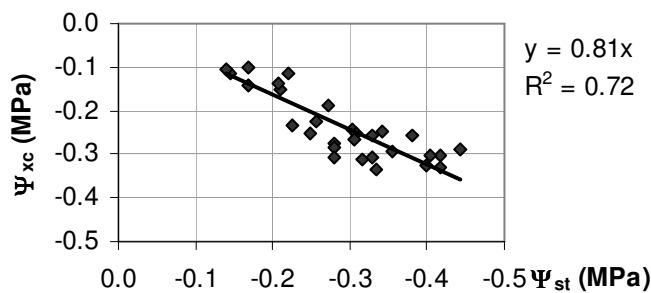


Figura 6.19 - Relação entre o potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ), simulado pelo modelo SPAC e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ), medido durante o ensaio no Pomar, T-III.

Nas figuras seguintes (Figura 6.20 e Figura 6.21) apresentam-se os resultados da simulação efectuada para o talhão T-IV. Nesta simulação utilizou-se exactamente a mesma parametrização utilizada para o talhão T-III, o que fortalece a modelação utilizada para a extracção radicular.

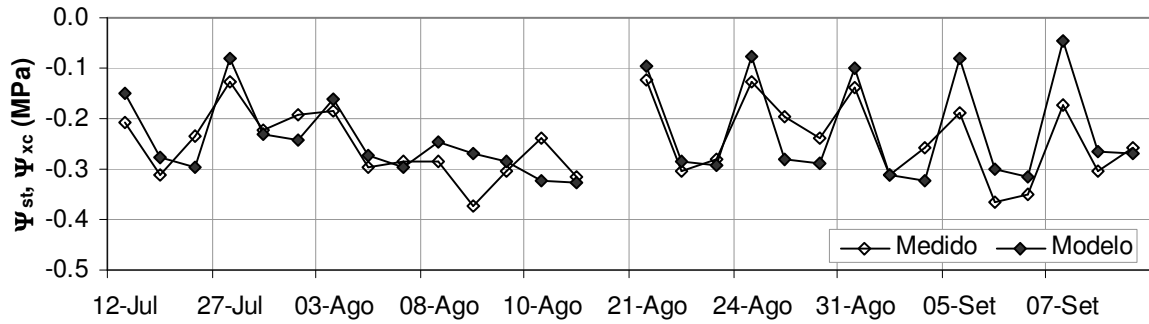


Figura 6.20 - Potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado, resultante da imposição do fluxo equivalente à transpiração medida (fluxo de seiva) e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ), medido ao longo do ensaio no Pomar, T-IV.

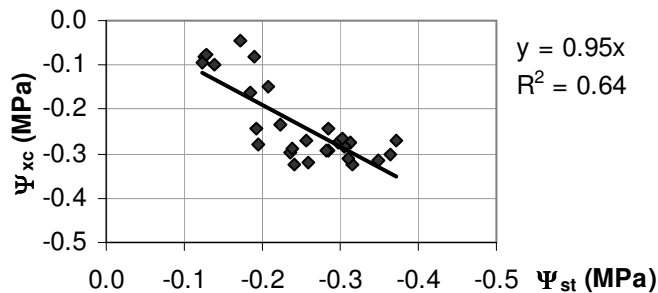


Figura 6.21 - Relação entre o potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ), simulado pelo modelo SPAC e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ), medido durante o ensaio no Pomar, T-IV.

Tal como verificado no caso de estudo do lisímetro, as limitações hidráulicas no sistema SPAC ficam a dever-se à condutância hidráulica do solo/raiz - Figura 6.22.

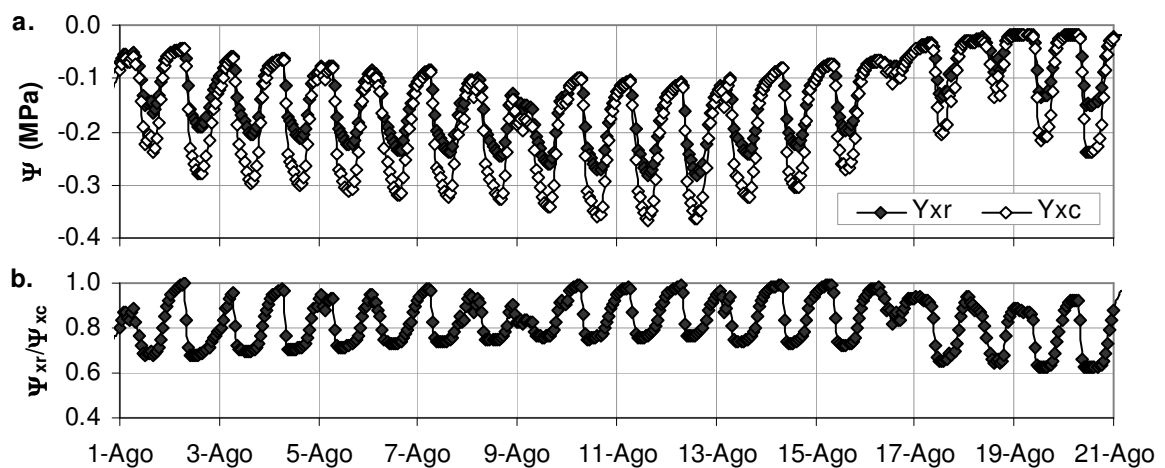


Figura 6.22 - a. potenciais hídricos do xilema na raiz ( $Y_{xr}$ ) e no copado ( $Y_{xc}$ ) simulados por imposição do fluxo de seiva medida (caso de estudo pomar, T-III); b. relação entre o potencial hídrico do xilema na raiz e no copado; caso de estudo pomar, T-III.

Considerando o período apresentado na Figura 6.23, em que o solo no talhão T-III já apresentava alguma carência hídrica, como medido e apresentado na Figura 5.59 e Figura 5.60, a simulação efectuada demonstra um aumento da contribuição da macrorraiz 3 e a existência de *hydraulic lift* para as macrorraizes 1 e 2. As regas efectuadas e a forte precipitação ocorrida de 12 a 18 de Agosto reverteram a situação.

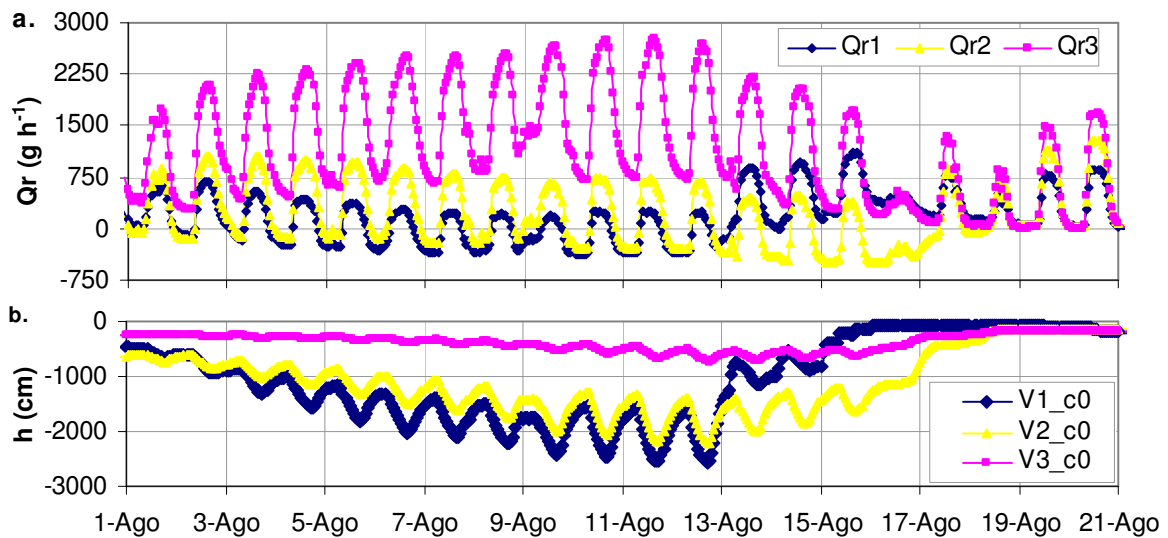


Figura 6.23 - a. fluxo simulado nas macrorraízes do sistema radicular; c. pressão efectiva de água nas camadas de solo adjacentes às raízes nos volumes de solo explorados pelas diferentes macrorraízes, por imposição do fluxo de seiva medido (pomar, T-III).

Na Figura 6.24 apresentam-se alguns gráficos do estado hídrico do solo simulados para o talhão T-III. Considerando os fluxos totais diários simulados para o sistema radicular, apresentados na Figura 6.25, a macrorraiz 3 é a que tem maior contributo, que aumenta em períodos de carência hídrica nas zonas de solo com maior densidade radicular (macrorraízes 1 e 2).

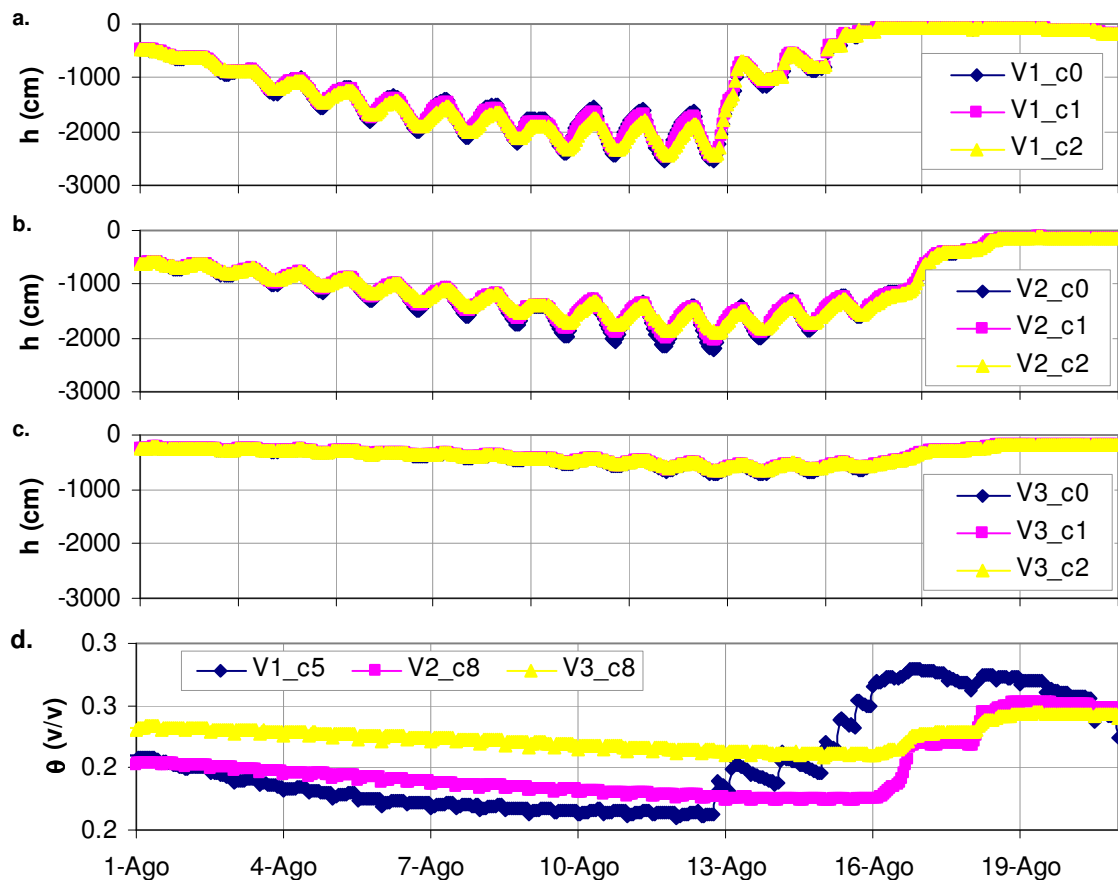


Figura 6.24 – Pressão efectiva de água nas três camadas de solo adjacentes às raízes nas macrorraízes 1 (a.), 2 (b.) e 3 (c.); teor de água na camada de solo mais afastada das raízes nas diferentes macrorraízes; caso de estudo do pomar, T-III.

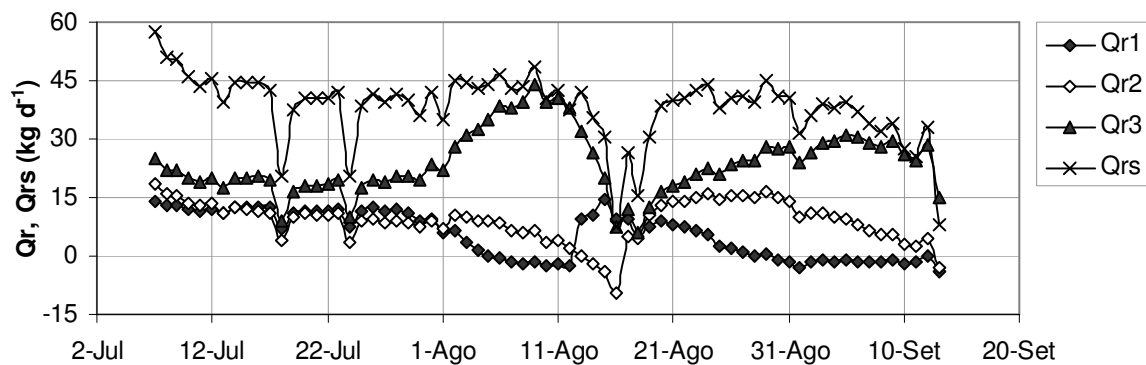


Figura 6.25 - Fluxo total diário registado no sistema radicular e ao nível das diferentes macrorraízes (caso de estudo pomar, T-III).

A modelação utilizada, apesar de não considerar a variação da condutividade hidráulica do sistema radicular em função da natureza da força dominante (osmótica vs. hidráulica) e intensidade do fluxo (Steudle, 2000), permitiu modelar convenientemente o processo.

A redistribuição hidráulica (*hydraulic lift*) pensa-se que é um processo predominantemente passivo (estritamente físico), requerendo apenas um gradiente de potencial hídrico no solo, um potencial hídrico no xilema da raiz superior ao do solo envolvente (zona do solo mais seca) e uma resistência relativamente pequena ao fluxo reverso da raiz para o solo (Meinzer *et al.*, 2001). Estas condições postuladas para a existência do processo, suportadas pela sua observação em mais de 60 casos (Jackson *et al.*, 2000), corroboram a simulação do processo pelo modelo utilizado nos casos de estudo. A distribuição desigual do sistema radicular no solo (densidade de raízes) e a aplicação de água a apenas uma fracção do volume de solo originam diferentes estados hídricos do solo, pelo que durante o final da noite, com a cessação ou redução da transpiração, o potencial hídrico do xilema da raiz excede o das zonas do solo mais seco e verifica-se o fluxo reverso. Segundo Feddes *et al.* (2001), árvores de *Acer saccharum* podem transferir até 100 L de água por dia, de camadas profundas do solo para camadas mais superficiais, o que enquadra os valores elevados de *hydraulic lift* simulados.

Vários estudos apontam que a condutividade hidráulica do xilema é fortemente dependente do potencial hídrico, decrescendo rapidamente abaixo de um determinado valor de potencial por cavitação (Brodribb e Holbrook, 2006). Desta forma, o bom comportamento do modelo evidencia que os valores de potencial hídrico verificados nos ensaios, com a possível excepção de alguns períodos no lisímetro, não foram suficientes para provocar uma redução acentuada da condutância hidráulica. Este facto foi também observado por Clearwater *et al.* (2004) que num estudo realizado nesta espécie não observou nenhuma alteração consistente, diária ou sazonal, na condutância hidráulica da planta.

### 6.3.4.2. Extracção radicular com transpiração modelada

No ponto anterior foi realizada a avaliação da parte do modelo que permite descrever o movimento de água no solo na proximidade da raiz, a extracção radicular e o fluxo na planta. Como referido em 6.3.1.3, a  $E_{To}$  é a variável preditora do funcionamento do modelo SPAC. Deste modo, neste ponto considerou-se o modelo SPAC completo, com a modelação da transpiração e capacitância hídrica do copado. Todos os resultados apresentados neste ponto foram obtidos com o fluxo na planta determinado com base na modelação da transpiração apresentada em 6.3.1.3 e com a parametrização apresentada em 6.3.3.4.

#### ▪ Caso estudo - Lisímetro

Ao incluir no modelo SPAC a capacitância hídrica das plantas é possível relacionar a variação do armazenamento hídrico dos locais de reserva com a correspondente variação da dimensão dos órgãos (diâmetro tronco ou ramos), quando medidos. Desta forma, foi possível utilizar as medições da variação do diâmetro do tronco realizadas (vd. 5.2.5) para calibrar a capacitância hídrica dos tecidos e a condutância hidráulica do sistema vascular de ligação ( $G_{sto}$ ). Na Figura 6.26 e Figura 6.27 faz-se uma análise da modelação da capacitância hídrica da planta e relação com a variação do diâmetro do tronco.

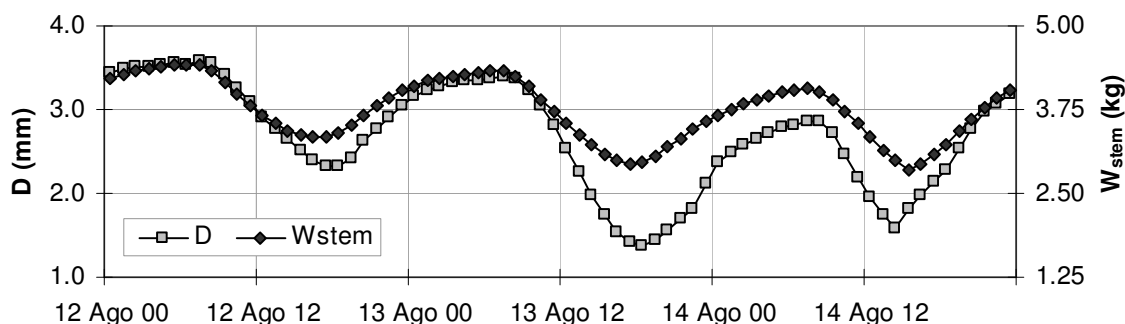


Figura 6.26 – Diâmetro do tronco ( $D$ ) registado pelo sensor  $De\_2$  e armazenamento hídrico de variação lenta ( $W_{stem}$ ) simulado pelo modelo SPAC, considerando o fluxo imposto pela transpiração modelada com  $E_{To}$ , para o caso estudo Lisímetro.

A Figura 6.26 permite identificar uma forte correlação entre a variação do armazenamento hídrico simulado ( $W_{stem}$ ) e a variação do diâmetro do tronco medido ( $D$ ). Na Figura 6.27 faz-se uma análise estatística desta relação, observando-se uma boa relação linear entre variáveis, o que permite adquirir alguma confiança na modelação do processo e parametrização efectuada. Nesta figura, nos gráficos c./e. e d./f. verifica-se que o diâmetro do tronco medido tem melhor correlação com o armazenamento hídrico do tronco ( $W_{stem}$ ) do que com o potencial hídrico do xilema no tronco ( $\Psi_{xs}$ ), ambos simulados. Este aspecto poderá justificar a dificuldade em estabelecer relações directas entre medições do potencial hídrico da planta e do diâmetro do tronco, tal como observado

por Genard *et al.* (2001). A inclusão no modelo SPAC de uma resistência na transferência hídrica dos locais de reserva para o sistema vascular permitiu descrever o processo convenientemente.

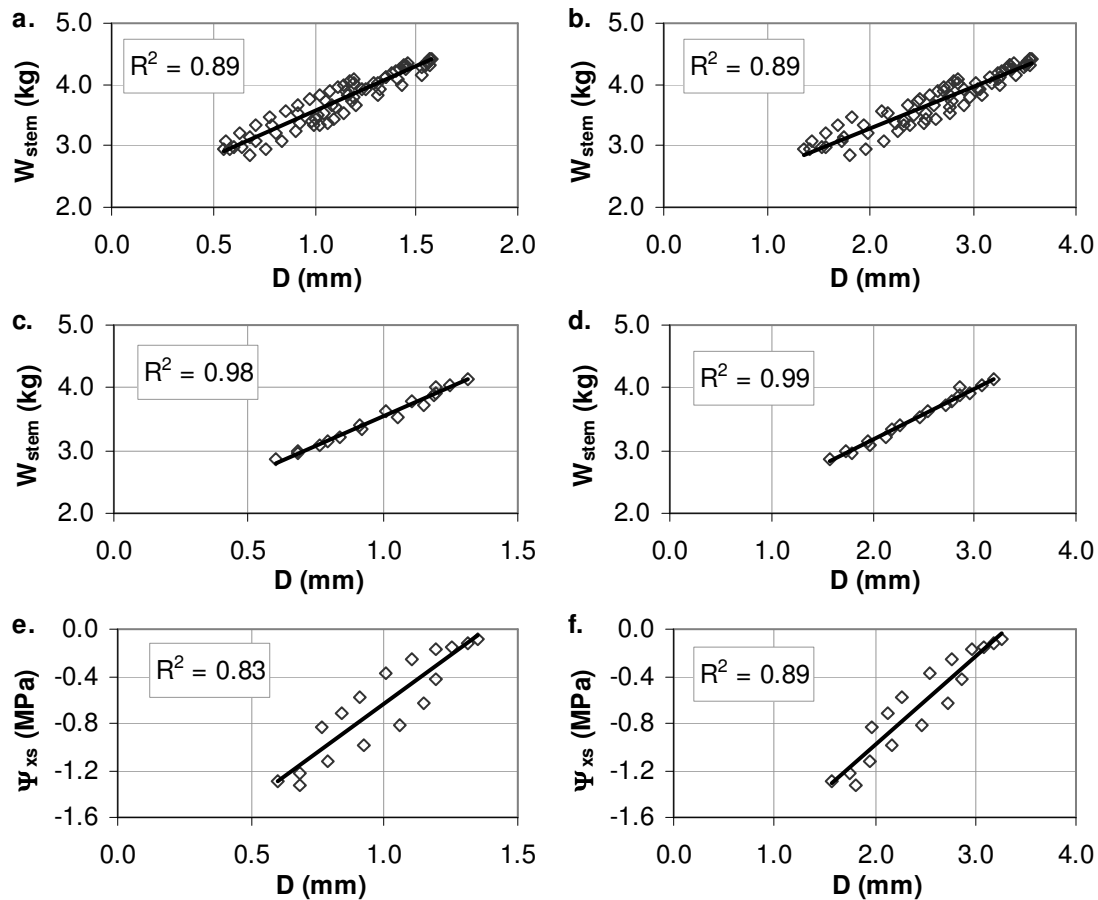


Figura 6.27 – Relação entre o armazenamento hídrico de variação lenta e o diâmetro do tronco registado pelos sensores De\_1 (a. e c.) e De\_2 (b. e d.) no período de 12 a 14 de Agosto de 2005 (a. e b., N=72) e no dia 14 de Agosto das 8:00 às 24:00 (c. e d., N=17); relação entre o potencial hídrico do xilema do tronco ( $\Psi_{xs}$ ) simulado com o modelo SPAC e o diâmetro do tronco medido pelos sensores De\_1 (e.) e De\_2 (f.) no dia 14 de Agosto das 8:00 às 24:00 (N=17); os diâmetros apresentados correspondem à variação observada desde a instalação dos sensores).

Estes resultados corroboram a hipótese que relaciona a variação do diâmetro do tronco (ramos e espessura da folha) com a hidratação dos tecidos. A relação entre a variação de armazenamento e o diâmetro é linear o que está de acordo com o observado noutros estudos (Genard *et al.*, 2001; Steppe *et al.*, 2006).

Os gráficos a. e b. da Figura 6.27 evidenciam o efeito do crescimento do tronco sobre a variação diária. O facto de a variação diária apresentar uma relação linear com a variação do armazenamento hídrico dos tecidos (gráficos c. e d.) e haver uma deslocação interdiária das curvas (paralelas) está de acordo com a hipótese admitida por Lockhart (1965) de que o crescimento irreversível dos tecidos ocorre apenas acima de determinada pressão de turgescência (potencial hídrico de pressão positivo a nível celular). Em consequência, a expansão celular ocorre geralmente ao final das noites com a recarga dos locais de armazenamento. Contudo, neste estudo não foi

considerado explicitamente este processo, que apresenta alguma complexidade e incertezas. Contudo, o modelo SPAC desenvolvido não se revelou sensível a este processo (crescimento) para a determinação do estado hídrico da planta.

Mais uma vez utilizaram-se as medições do potencial hídrico do ramo para aferir a capacidade do modelo simular o estado hídrico da planta, como apresentado na Figura 6.28 e Figura 6.29.

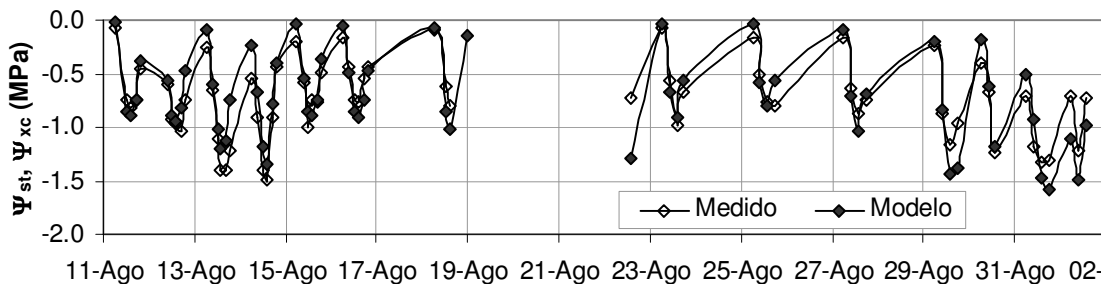


Figura 6.28 - Potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ) resultante da transpiração calculada e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido ao longo do ensaio no lisímetro; com transpiração modelada.

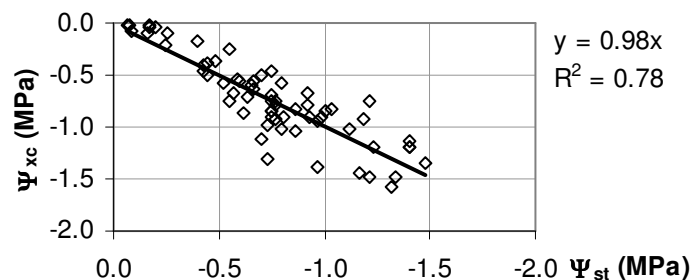


Figura 6.29 - Relação entre o potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo SPAC com a transpiração calculada e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido durante o ensaio no lisímetro; com transpiração modelada.

Como apresentado em 6.3.1.3, a modelação da transpiração considera apenas o potencial hídrico como variável preditora do funcionamento estomático, apresentando-se na Figura 6.30 a redução da transpiração (transpiração relativa -  $Tr$ ) originada pelo estado hídrico da planta.

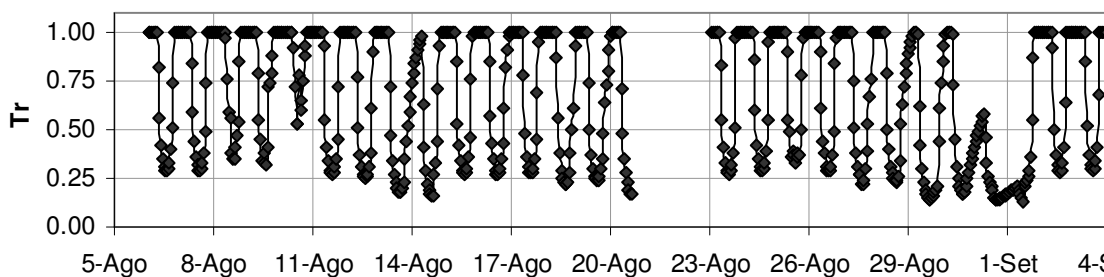


Figura 6.30 – Transpiração relativa ( $Tr$ ) em relação à transpiração máxima; caso de estudo do lisímetro, transpiração modelada.

A transpiração obtida pelo modelo foi confrontada com o fluxo medido (transpiração, fluxo de seiva), apresentando-se na Figura 6.31 e Figura 6.32 a análise desses resultados. A qualidade da simulação efectuada é razoável. Apresenta contudo alguma dispersão, aspecto que poderá ser

justificado em parte pela instalação do lisímetro na proximidade de um edifício (que provocava algum ensombramento no final da tarde) que poderá limitar o uso de ETo como referência para este local. Os desfasamentos encontrados podem também ser justificados por aspectos não incluídos no modelo construído, como adaptações da planta a condições de stress hídrico. Em stress hídrico prolongado, algumas espécies desencadeiam ajustamentos osmóticos com um aumento activo dos solutos intercelulares em resposta à redução do potencial hídrico, como observado p.ex. por Rodrigues *et al.* (1993) em videiras.

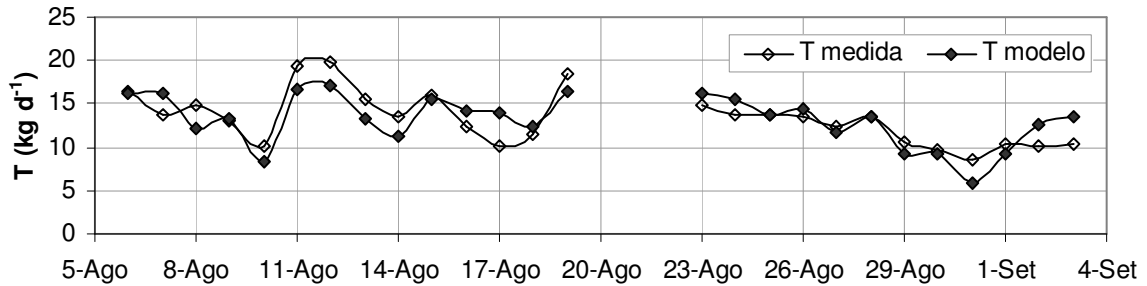


Figura 6.31 – Transpiração medida e obtida pelo modelo SPAC; caso de estudo do lisímetro.

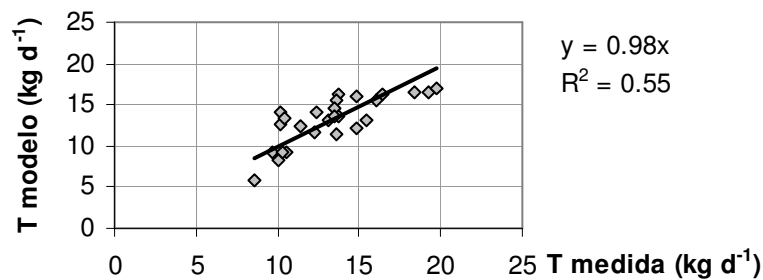


Figura 6.32 – Relação entre a transpiração medida e obtida pelo modelo SPAC; caso de estudo do lisímetro.

▪ **Caso estudo – Pomar, TIII**

Tal como realizado em 6.3.4.1, fez-se a avaliação do modelo SPAC desenvolvido com os dados do pomar recolhidos nos talhões T-III e T-IV (ponto seguinte). Começou-se por avaliar a correspondência entre a variação do diâmetro dos órgãos medidos (tronco e ramo) e a variação do armazenamento hídrico (simulado). Na Figura 6.33 apresentam-se os gráficos das séries de dados relativas à variação do armazenamento hídrico no tronco (a.) e no copado (b.) simulados pelo modelo e a variação do diâmetro do tronco (a.) e do ramo (b.) medidos. Na Figura 6.34, apresenta-se a análise estatística das relações entre estas variáveis, destacando-se dois aspectos: a boa relação entre o armazenamento hídrico simulado pelo modelo e o diâmetro medido (a., b., c. e d.); e a melhor relação directa entre o potencial hídrico do xilema simulado com o diâmetro do ramo do que com o diâmetro do tronco (e. e f.). Este aspecto reforça a hipótese de uma melhor ligação entre o sistema vascular e o armazenamento hídrico do copado, relativamente ao armazenamento hídrico do tronco.

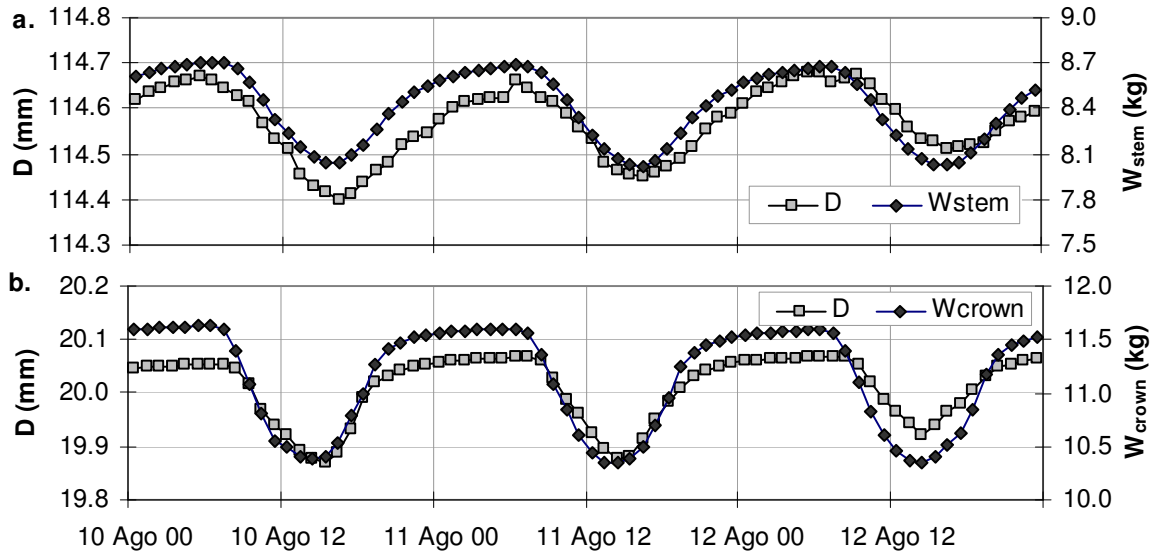


Figura 6.33 - Variação do diâmetro do tronco (D) registada pelos sensores De\_C16t (a.) e De\_C14r (b.) e variação do armazenamento hídrico de variação lenta (W<sub>stem</sub>, a.) e variação rápida (W<sub>crown</sub>, b.) simulado pelo modelo SPAC considerando o fluxo imposto pela transpiração calculada para o caso estudo Pomar, T-III.

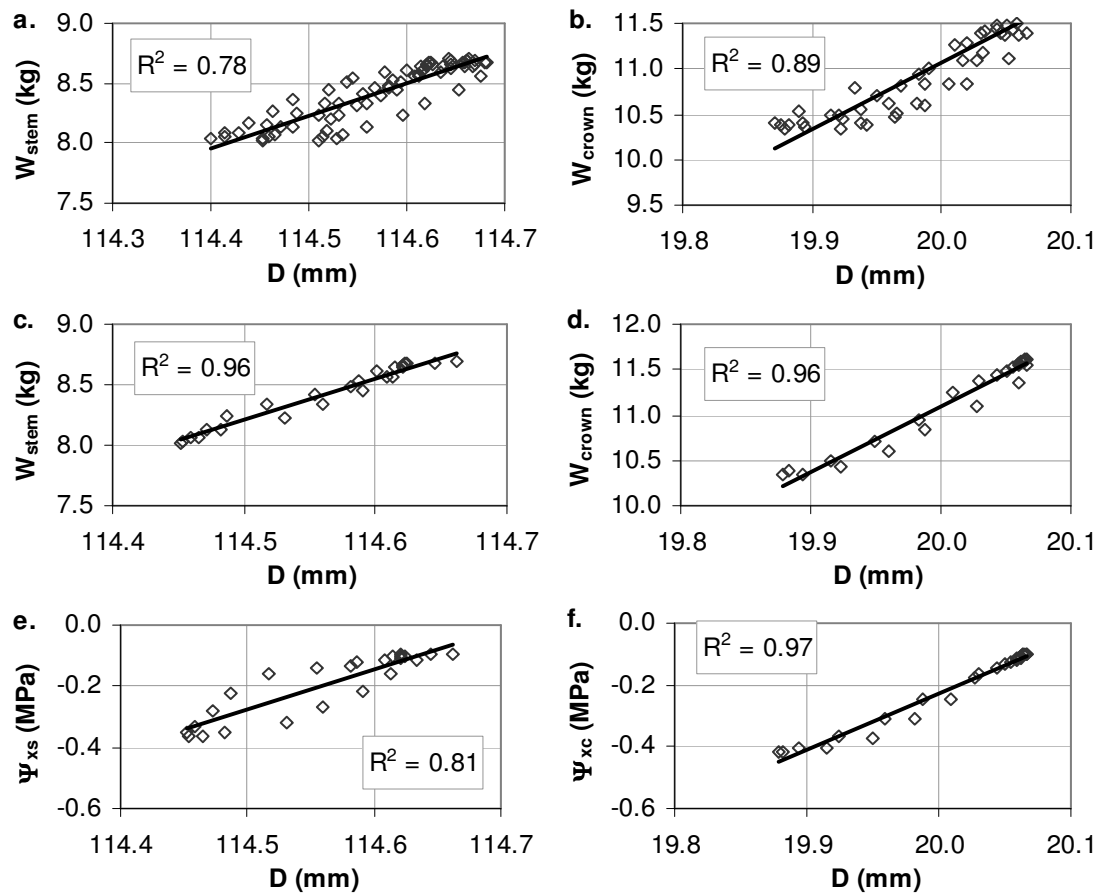


Figura 6.34 – Relação entre o armazenamento hídrico de variação lenta (W<sub>stem</sub>), potencial hídrico do xilema do tronco (Ψ<sub>xs</sub>) com o diâmetro do tronco registado pelo sensor De\_C16t, no período de 10 a 12 de Agosto de 2006 (a., N=72) e no dia 11 de Agosto (c. e e., N=24); relação entre o armazenamento hídrico de variação rápida (W<sub>crown</sub>), potencial hídrico do xilema do copado (Ψ<sub>xc</sub>) com o diâmetro do ramo registado pelo sensor De\_C14r, no período de 10 a 12 de Agosto de 2006 (b., N=72) e no dia 11 de Agosto (d. e f., N=24).

Mais uma vez fez-se a confrontação do potencial hídrico da planta simulado ( $\Psi_{xc}$ ) com o potencial hídrico do ramo medido, considerando-se que  $\Psi_{xc}$  tem correspondência directa com o potencial hídrico medido (Figura 6.35 e Figura 6.36).

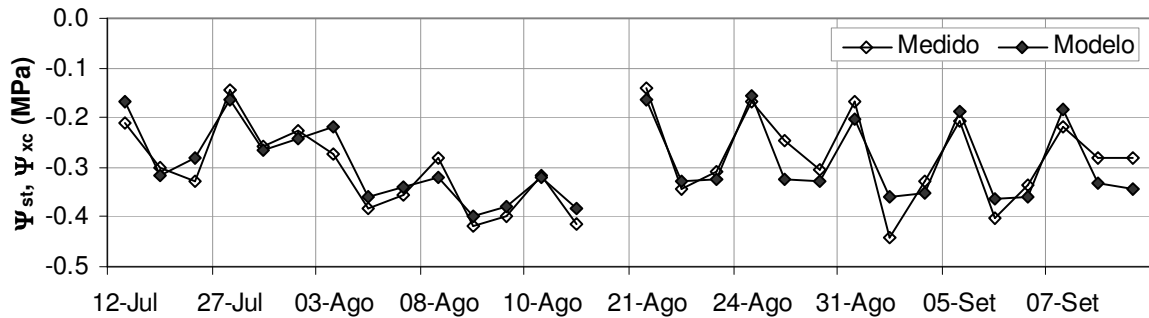


Figura 6.35 - Potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido ao longo do ensaio e potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pela aplicação do modelo SPAC ao caso estudo Pomar, T-III (o eixo das abcissas não tem escala, apresentando-se para cada dia de medições as correspondentes a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  do dia solar, à excepção do dia 10 de Agosto em que só foram medidos os dois primeiros).

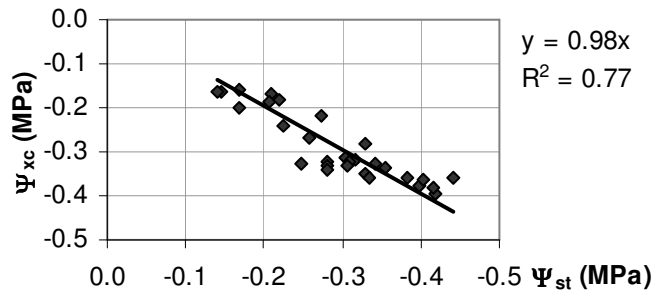


Figura 6.36 - Relação entre o potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo SPAC com a transpiração calculada e o potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido durante o ensaio no Pomar, T-III.

Como apresentado em 5.4.4, o índice MDS.(1-OGR) permitiu também fazer uma boa estimativa do potencial hídrico do ramo. Na Figura 6.37 apresentam-se estas séries, observando-se uma boa correspondência com o estado hídrico da planta simulado.

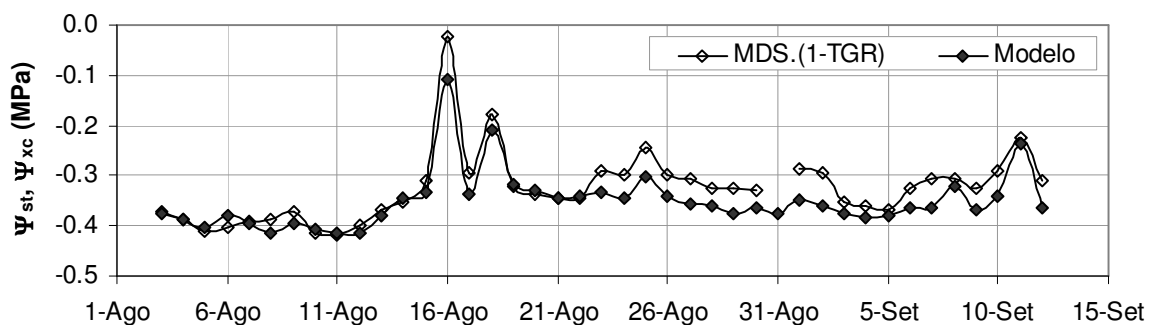


Figura 6.37 – Potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) estimado com o índice microdendrométrico MDS.(1-OGR) e potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo, pomar, T-III.

Na Figura 6.38 e Figura 6.39 apresenta-se a análise gráfica e estatística da relação entre a transpiração simulada pelo modelo SPAC e a transpiração medida (vd. 5.4.3.2). Com a parametrização efectuada verifica-se uma relação de 1:1 entre a transpiração medida e simulada

(período de 7 de Julho a 13 de Setembro de 2006) e com pouca dispersão dos valores diários ( $r^2=0.84$ ).

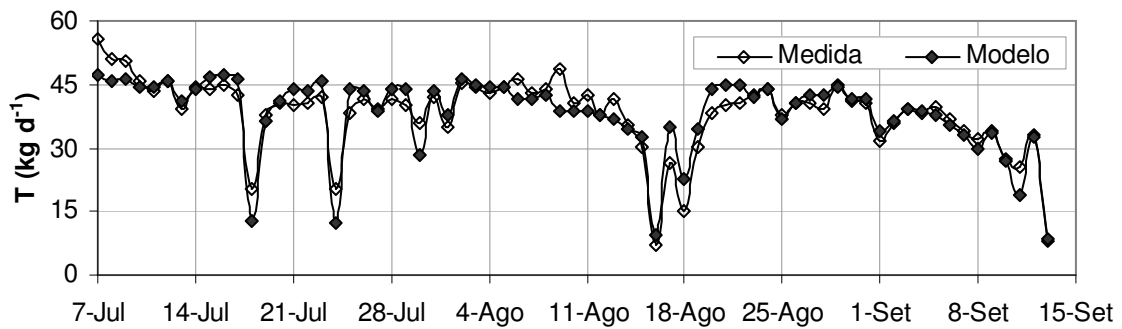


Figura 6.38 – Transpiração diária medida e simulada com o modelo SPAC, pomar, T-III.

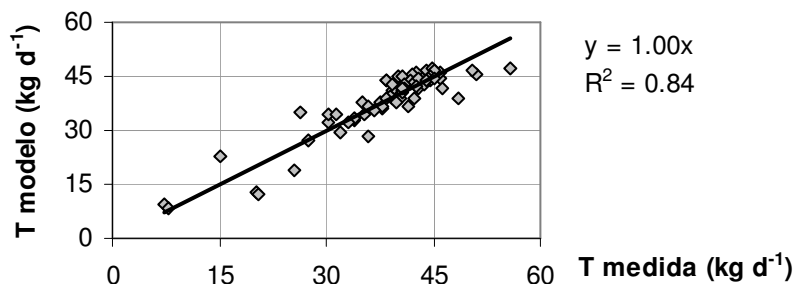


Figura 6.39 – Relação entre a transpiração medida (vd. 5.4.3.2) e simulada com o modelo SPAC, dados do período de 7 de Julho a 13 de Setembro de 2006, pomar, T-III.

▪ **Caso estudo – Pomar T-IV**

A avaliação do modelo efectuada para o talhão T-III do pomar foi repetida para T-IV. Na Figura 6.40 e Figura 6.41 apresenta-se a análise da relação entre o diâmetro de órgãos (medido) e o armazenamento hídrico (simulado).

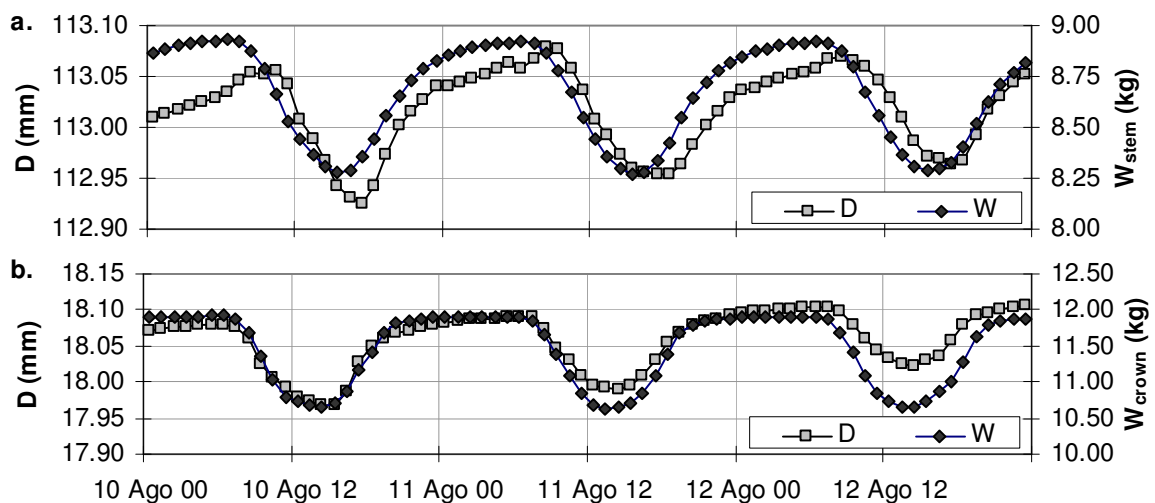


Figura 6.40 - Variação do diâmetro do tronco (D) registada pelos sensores De\_F10t (a.) e De\_F12r (b.), variação do armazenamento hídrico de variação lenta ( $W_{stem}$ , a.) e variação rápida ( $W_{crown}$ , b.) simulado pelo modelo SPAC considerando o fluxo imposto pela transpiração calculada para o caso estudo Pomar, T-IV.

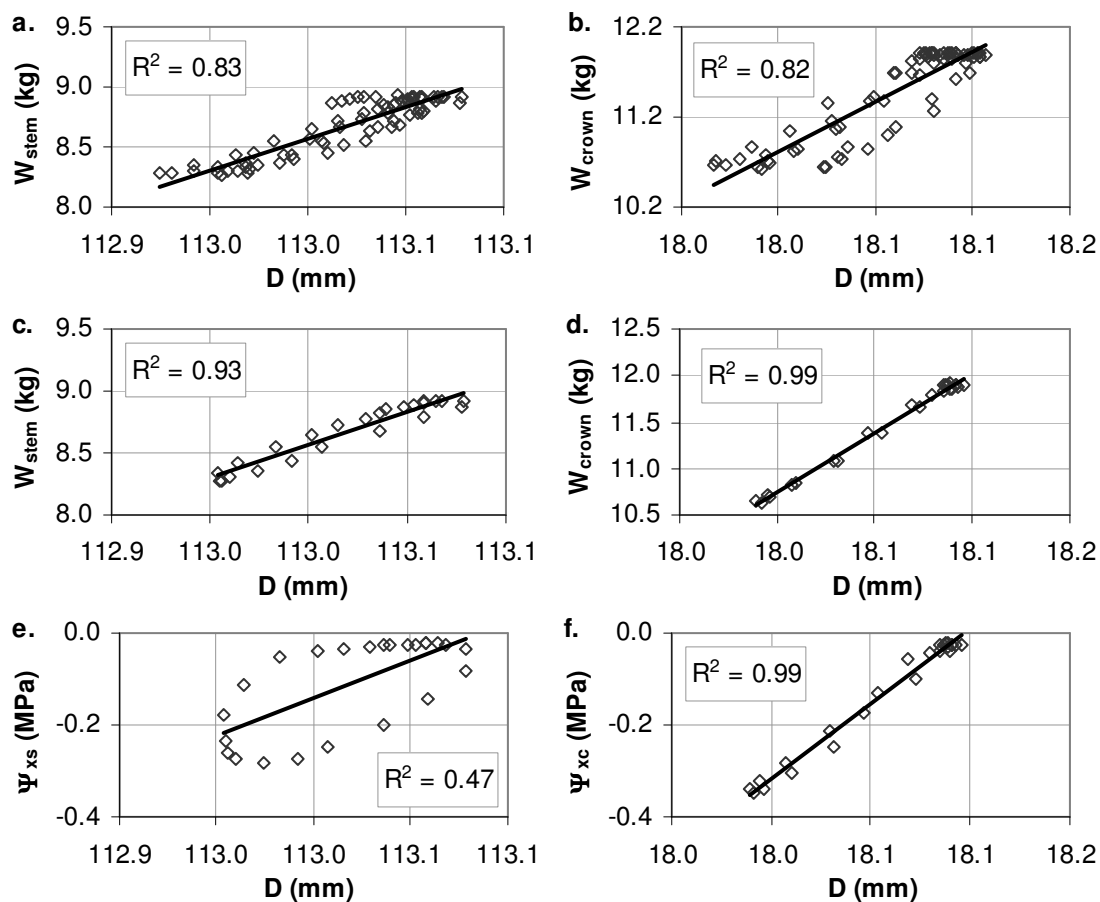


Figura 6.41 – Relação entre o armazenamento hídrico de variação lenta ( $W_{stem}$ ), potencial hídrico do xilema do tronco ( $\Psi_{xs}$ ) com o diâmetro do tronco registado pelo sensor De\_F10t no período de 10 a 12 de Agosto de 2006 (a., N=72) e no dia 11 de Agosto (c. e e., N=24); relação entre o armazenamento hídrico de variação rápida ( $W_{crown}$ ), potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ) com o diâmetro do ramo registado pelo sensor De\_F12r no período de 10 a 12 de Agosto de 2006 (b., N=72) e no dia 11 de Agosto (d. e f., N=24).

Na Figura 6.42 e Figura 6.43 apresentam-se respectivamente, as séries de dados, potencial hídrico do ramo medido e potencial hídrico do xilema no copado simulado e a análise estatística da relação linear entre as duas séries de dados.

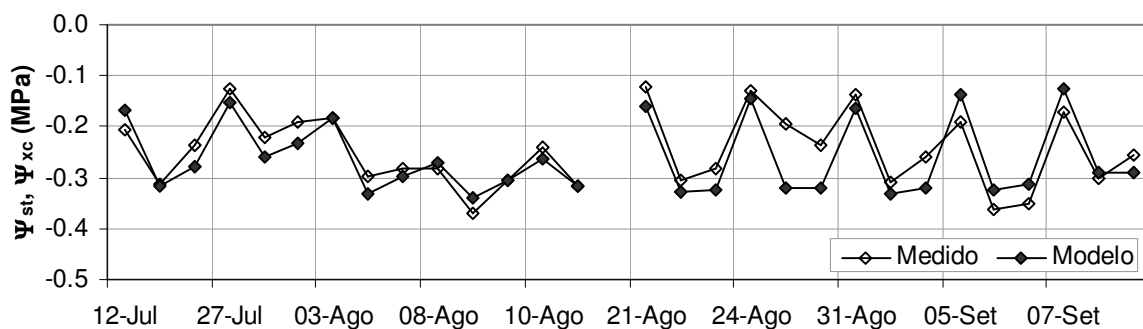


Figura 6.42 - Potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido ao longo do ensaio e potencial hídrico do xilema do copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pela aplicação do modelo SPAC ao caso estudo Pomar – Talhão IV (o eixo das abcissas não tem escala, apresentando-se para cada dia de medições as correspondentes a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  do dia solar, à excepção do dia 10 de Agosto em que só foram medidos os dois primeiros)

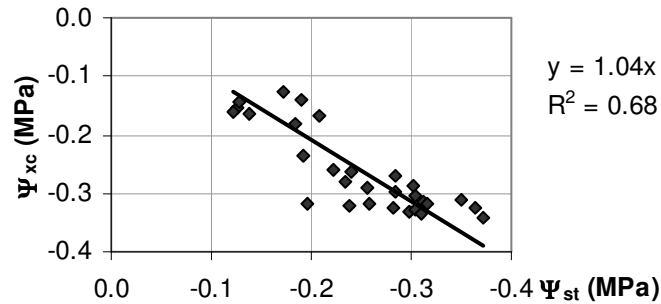


Figura 6.43 - Relação entre o potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo SPAC com a transpiração calculada e potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido durante o ensaio no Pomar, T-IV.

Na Figura 6.44, tal como observado no caso anterior, verifica-se uma boa aderência entre o estado hídrico da planta acedido pelo índice microdendrométrico MDS.(1-OGR) e o potencial hídrico simulado pelo modelo SPAC.

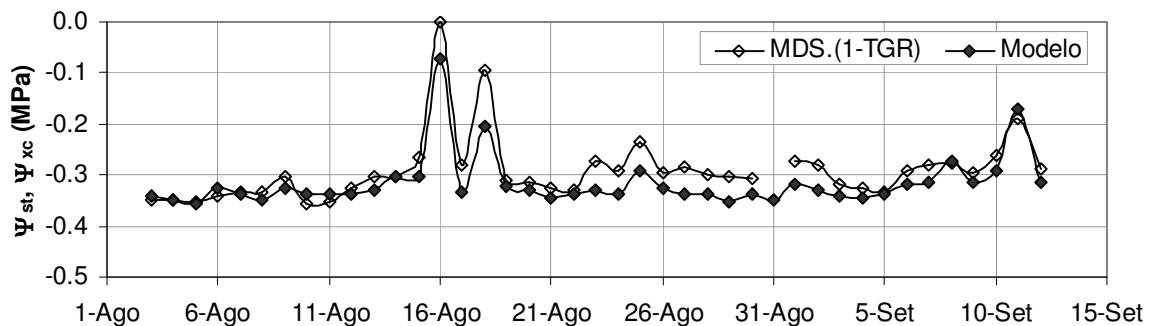


Figura 6.44 - Potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) estimado com o índice microdendrométrico MDS.(1-OGR) e potencial hídrico do xilema no copado ( $\Psi_{xc}$ ) simulado pelo modelo, pomar, T-IV.

Na Figura 6.45 e Figura 6.46 faz-se a análise da simulação da transpiração da cultura em relação à transpiração medida. Verifica-se um desempenho aceitável do modelo, apesar de se ter considerado a mesma parametrização que para T-III, apenas diferindo a curva de Kcb. Este aspecto é inteiramente justificável pelo maior desenvolvimento vegetativo neste talhão (observado visualmente durante o ensaio) em relação a T-III. Neste último talhão, devido à carência hídrica imposta (ainda que ligeira), houve uma redução do desenvolvimento vegetativo e produtivo (vd. 5.4.5).

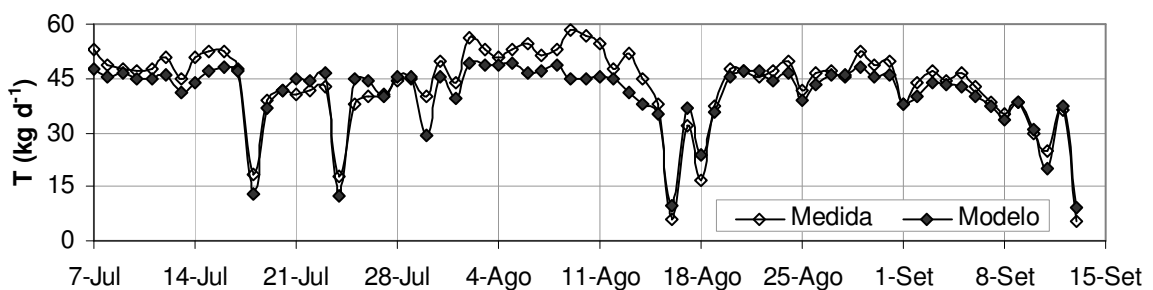


Figura 6.45 - Transpiração diária medida e simulada com o modelo SPAC, pomar, T-IV.

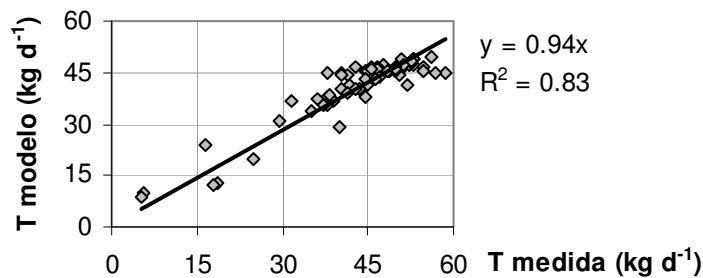


Figura 6.46 - Relação entre a transpiração medida (vd. 5.4.3.2) e simulada com o modelo SPAC, dados do período de 7 de Julho a 13 de Setembro de 2006, pomar, T-IV

O bom desempenho do modelo utilizado para descrever a transpiração, quer em condições de stress severo (lisímetro), quer em condições de stress ligeiro (pomar), permite inferir que o potencial hídrico da folha deverá ser o principal factor responsável pelo controlo estomático da transpiração. Esta observação está em concordância com alguns estudos realizados que evidenciam o papel do potencial hídrico neste processo (Yao *et al.*, 2001; Leuning *et al.*, 2003; Fröh e Kurth, 1999).

De referir que todas as simulações apresentadas neste ponto (6.3.4.2) foram realizadas considerando as condições estabelecidas no início da simulação, com uma única excepção para o pomar: a evolução de Kcb. Deste modo, os resultados destas simulações incluem os erros cumulativos gerados pelas incertezas associadas à modelação dos diferentes processos considerados e aos processos omissos (cavitação, ajustamento osmótico, crescimento, etc.).

## 6.4 Aplicação e avaliação do sistema ISIS nos casos de estudo

No programa de trabalhos não foi possível efectuar a avaliação do sistema num caso concreto com a sua aplicação prática na gestão da rega. No entanto, foi possível fazer a sua avaliação *ex post*. Os dados recolhidos nos diversos ensaios conduzidos para o desenvolvimento do sistema ISIS (componente de monitorização vegetal e modelo SPAC) permitem caracterizar o estado inicial do sistema vegetal e complementarmente os dados das observações realizadas do estado hídrico das plantas (potencial hídrico do ramo) permitem fazer a avaliação do desempenho do sistema. Como definido em 3.4.1, as principais informações que se pretendem obter do sistema são as necessidades hídricas e o estado hídrico da cultura. Nesta fase inicial de desenvolvimento apenas se modelou a transpiração, pelo que a evapotranspiração do estrato inferior (ETei), necessária à actualização do balanço hídrico do solo, foi importada directamente de 5.3.4.2 (modelada considerando a ETo calculada com os dados meteorológicos observados)<sup>27</sup>.

Como condições iniciais para cada simulação (geradas para cada dia às 0:00) foram considerados os resultados da simulação do modelo SPAC obtidos em 6.3.4.2. Para a efectiva

<sup>27</sup> Para incluir o cálculo de ETei no sistema ISIS seria possível utilizar o modelo utilizado em 5.3.4.2, considerando ETo e precipitação fornecidas por dados das PNT.

aplicação do sistema ISIS, seria necessário desenvolver um algoritmo de optimização dos parâmetros relacionados com as condições iniciais, tais como o teor de água nos diferentes volumes de solo.

Atendendo a que não foi realizada a avaliação e calibração da previsão da precipitação produzida pelo modelo da PNT usado para o local, nas previsões efectuadas neste ponto com o sistema ISIS para actualização do balanço hídrico do solo foram considerados os valores de precipitação observados.

### 6.4.1 Lisímetro

#### ▪ Com rega

A monitorização vegetal efectuada (fluxo de seiva e microdendrometria) permitiu caracterizar convenientemente o estado actual da planta instalada no lisímetro. Com base neste conhecimento, no modelo SPAC parametrizado para o sistema (vd. 6.3.3) e na previsão de ETo fornecida pelos dados das PNT, foi possível gerar a previsão do funcionamento da cultura a curto/médio prazo. Na Figura 6.47 apresenta-se a previsão produzida com o conhecimento existente no dia 8 de Agosto às 0:00 horas e na Figura 6.49 apresenta-se a análise estatística do desempenho do sistema ISIS para o prognóstico do estado hídrico da planta com diferentes tempos de avanço. Na Figura 6.48 faz-se a comparação entre os valores do estado hídrico da planta previstos pelo sistema com 5 dias de avanço e os valores observados nas medições efectuadas. Da análise destes resultados verifica-se que o sistema previu com muito satisfatória precisão a evolução da transpiração e do estado hídrico da planta.

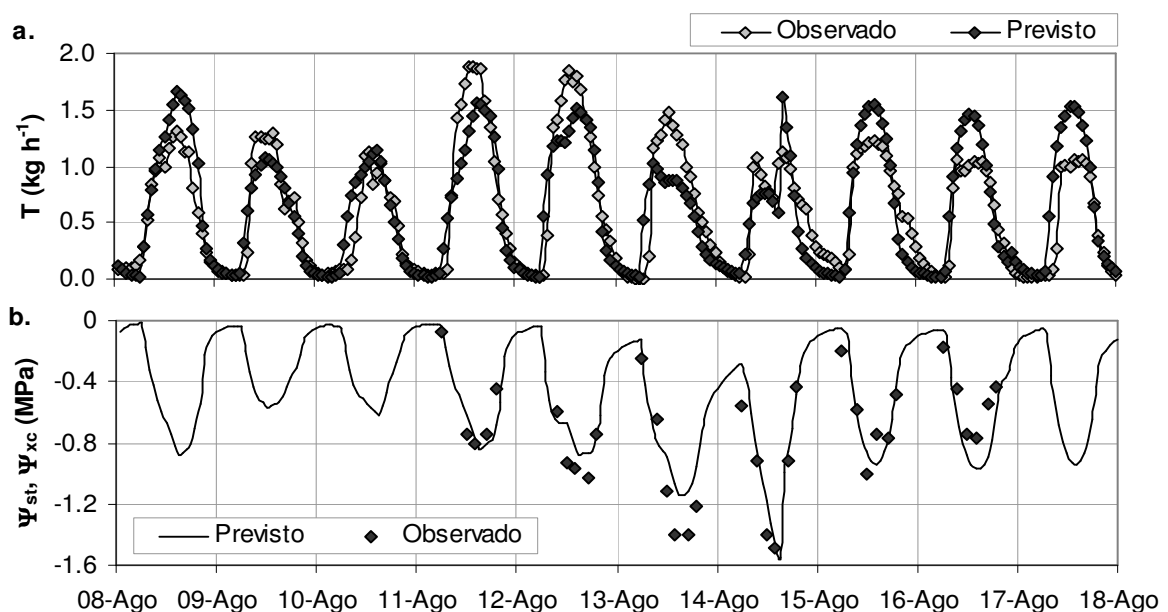


Figura 6.47 – Previsão da transpiração (a.,  $T$ ) e do estado hídrico da planta (b.,  $\Psi_{xc}$ ) gerada pelo sistema ISIS no dia 8 de Agosto (0:00) com 10 dias de alcance; b.  $\Psi_{st}$ , potencial hídrico do ramo medido e  $\Psi_{xc}$ , potencial hídrico do xilema do copado previsto; caso de estudo do lisímetro.

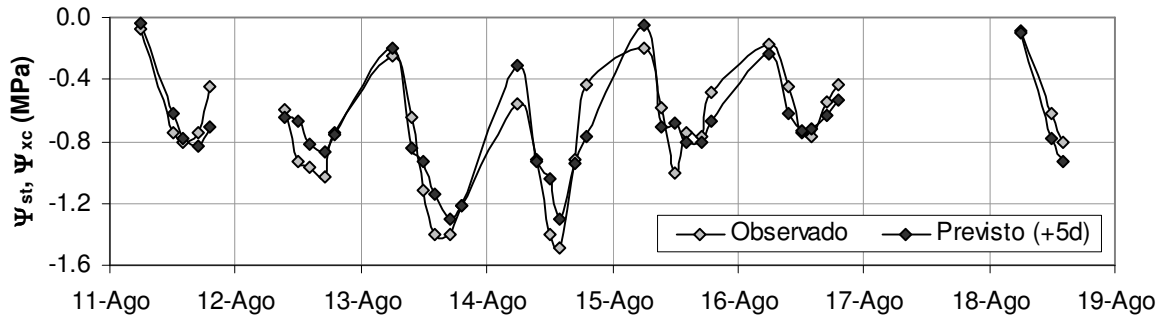


Figura 6.48 – Previsão do estado hídrico da planta ( $\Psi_{xc}$ ) gerado com 5 dias de avanço e potencial hídrico do ramo medido ( $\Psi_{st}$ ); caso de estudo do lisímetro.

Para a avaliação estatística do desempenho do sistema ISIS, apresentada na Figura 6.49, incluiu-se na avaliação a execução do modelo SPAC com a ETo calculada a partir dos dados meteorológicos (em substituição da ETo calculada com os dados das PNT). Deste modo, pretendia-se avaliar o erro gerado pelo modelo SPAC na modelação do comportamento da planta originado pela previsão de ETo fornecida pelas PNT. O erro neste caso foi inferior (RMSE=0.15 MPa) ao obtido pela previsão do estado hídrico da planta com a ETo prevista com diferentes tempos de avanço (RMSE aprox. 0.20 MPa). No entanto, as previsões de ETo introduziram um erro no prognóstico do estado hídrica da planta aceitável na gestão da rega e largamente compensado pelo conhecimento antecipado das condições futuras.

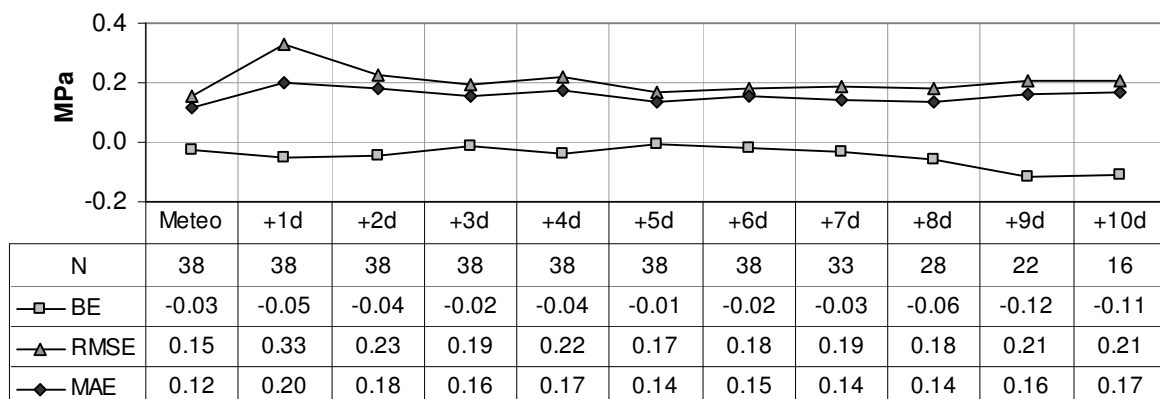


Figura 6.49 – Avaliação estatística do desempenho do sistema ISIS para a previsão do estado hídrico da planta ( $\Psi_{xc}$ ) por confrontação com o potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido; caso de estudo do lisímetro.

#### ▪ Simulação sem rega

Para testar o comportamento do sistema ISIS em condições limite de stress hídrico fez-se o exercício de previsão do comportamento da planta do lisímetro na ausência de regas. Para tal considerou-se igualmente o dia 8 de Agosto às 0:00 horas, como apresentado na Figura 6.50 de forma a ser comparável com a produzida para igual período mas considerando as regas praticadas (Figura 6.47). Na Figura 6.50a apresenta-se a comparação da ETo prevista com as PNT em relação à ETo calculada com os dados meteorológicos observados, verificando-se uma boa estimativa deste índice climático. Na mesma figura apresentam-se as previsões da transpiração (b.) e do estado

hídrico da planta (c.), com e sem rega. Na situação sem rega foi prevista uma degradação acentuada do estado hídrico da planta, com a concomitante redução da transpiração, em especial a partir do dia 14 de Agosto, dia no qual durante a realização do ensaio se observou uma situação extrema de stress hídrico da planta utilizada ( $\Psi_{st} = -1.5$  MPa, perda de turgescência das folhas - observação visual). Os valores previstos para os dias seguintes não seriam suportáveis pela planta, o que deveria desencadear a desfoliação acentuada da planta para manter o potencial hídrico mais elevado. Em termos de utilização prática do sistema neste tipo de simulações seria incluído um modelo de gestão da rega que, em função do plano de gestão hídrica da cultura estabelecido, deveria indicar a aplicação de uma determinada dotação de rega e prosseguir a simulação (como aliás foi realizado no ponto anterior com rega).

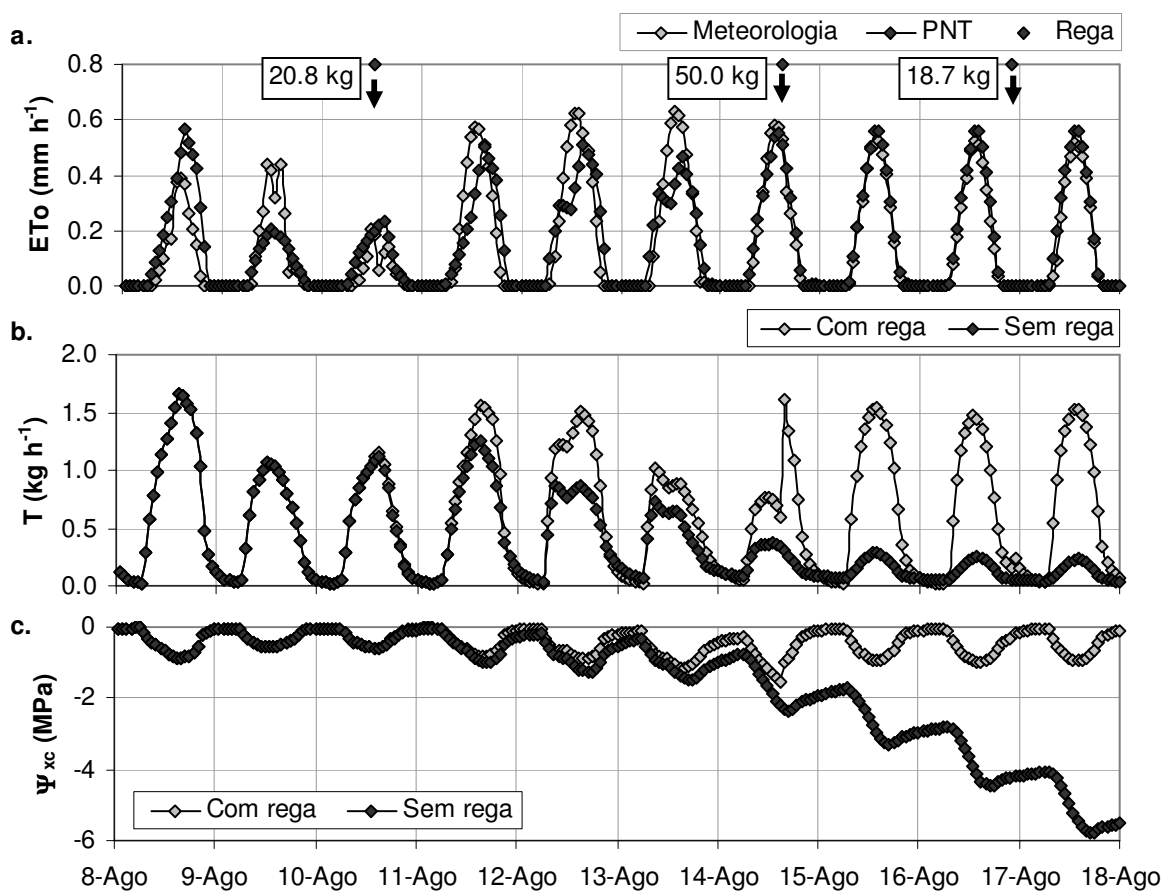


Figura 6.50 – Previsão gerada pelo sistema ISIS no dia no dia 8 de Agosto (0:00) com 10 dias de alcance, considerando ou não as regas praticadas: a.  $ET_0$  calculada com dados meteorológicos e PNT; b. transpiração (T); c. estado hídrico da planta simulado ( $\Psi_{xc}$ ), com e sem rega; caso de estudo do lisímetro.

#### 6.4.2 Pomar

Como referido anteriormente a avaliação do sistema ISIS no caso de estudo do pomar foi efectuada considerando a  $ET_{ei}$  determinada em 5.3.4.2, utilizando dados de  $ET_0$  calculados com dados meteorológicos observados e a precipitação observada.

Na Figura 6.51, apresenta-se a transpiração observada e as previsões da transpiração para o talhão T-III com diferentes tempos de avanço. As previsões apresentadas com 1 e 5 dias de avanço têm melhor correspondência com a transpiração observada em relação à previsão com 10 dias de avanço. Este aspecto está relacionado com a fonte de dados para o cálculo de ETo (PNT ou normal climática), tal como apresentado em 6.1.

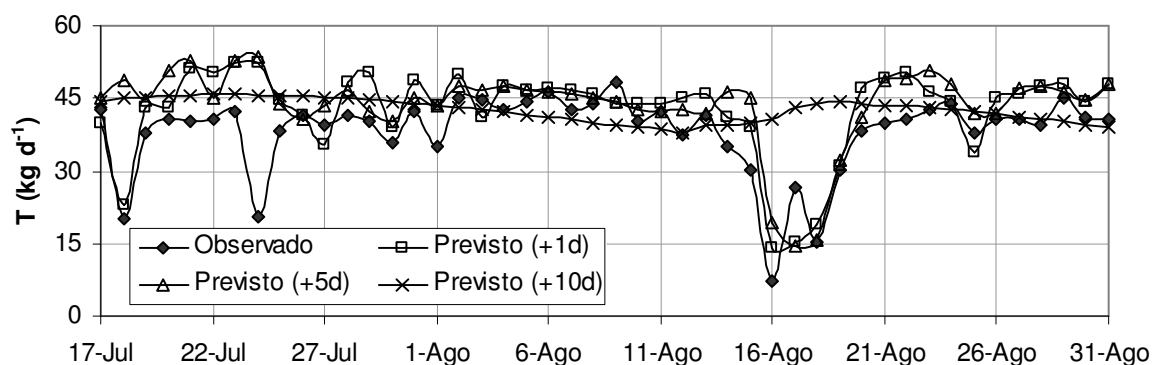


Figura 6.51 - Previsão da transpiração gerada pelo sistema ISIS com diferentes tempos de avanço; caso de estudo do pomar, T-III.

Na Figura 6.52, apresentam-se as previsões da transpiração com 5 dias de avanço, enquadradas pelos valores observados, para os talhões T-III e T-IV. Analisando os dados de ETo utilizados, verificou-se que o erro inicial foi originado por uma sobrestimativa deste índice.

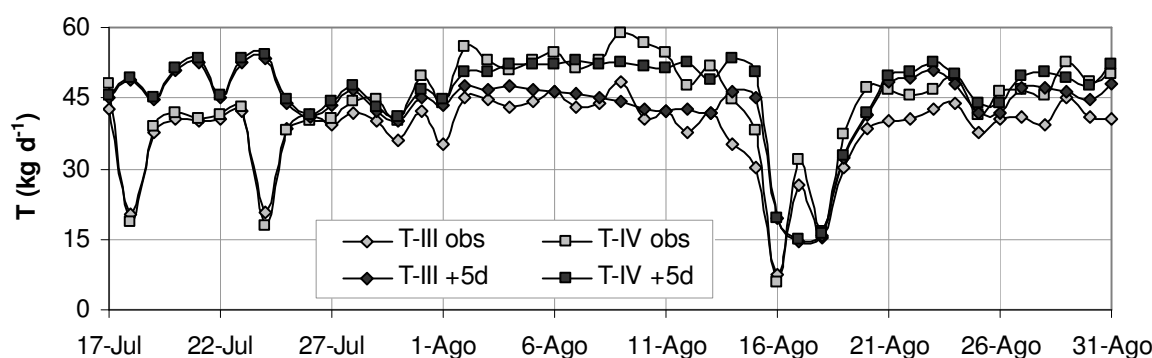


Figura 6.52 - Previsão da transpiração com 5 dias de avanço, enquadrada pelos valores observados, para os talhões T-III e T-IV; caso de estudo do pomar, T-III e T-IV.

Na Figura 6.53, apresenta-se a previsão gerada com os dados disponíveis no dia 16 de Agosto de 2006 às 0:00 horas para o talhão T-III. Nos gráficos apresentados, os valores da transpiração prevista (a.) e do estado hídrico das plantas (b.) são enquadrados com os valores observados verificando-se um bom prognóstico destas variáveis pelo sistema. Como realizado para o caso estudo anterior, na Figura 6.54 pode-se observar a previsão do estado hídrico das plantas do talhão T-III, produzida com 5 dias de avanço. O sistema prevê convenientemente a tendência de evolução do estado hídrico das plantas, devendo parte do erro verificado ser justificado por algum desfaseamento temporal do valor previsto em relação à observação de avaliação considerada. A

variação diária do estado é relativamente rápida, pelo que pequenos desfasamentos temporais originam valores significativamente diferentes.

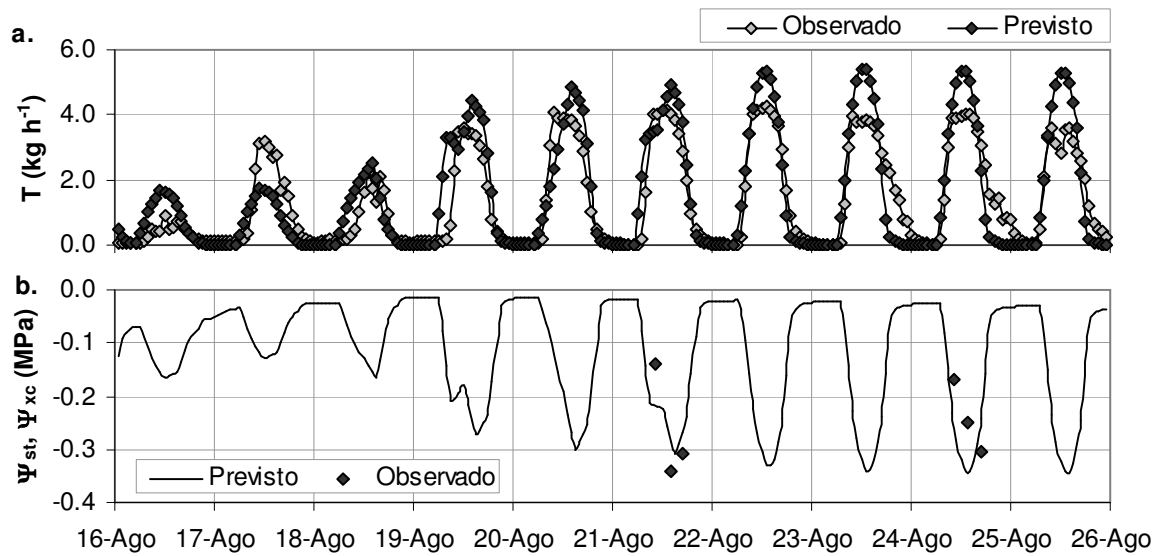


Figura 6.53 - Previsão da transpiração (a.,  $T$ ) e do estado hídrico da planta (b.,  $\Psi_{xc}$ ) gerada pelo sistema ISIS no dia 16 de Agosto (0:00) com 10 dias de alcance; b.  $\Psi_{st}$ , potencial hídrico do ramo medido; caso de estudo do pomar, T-III.

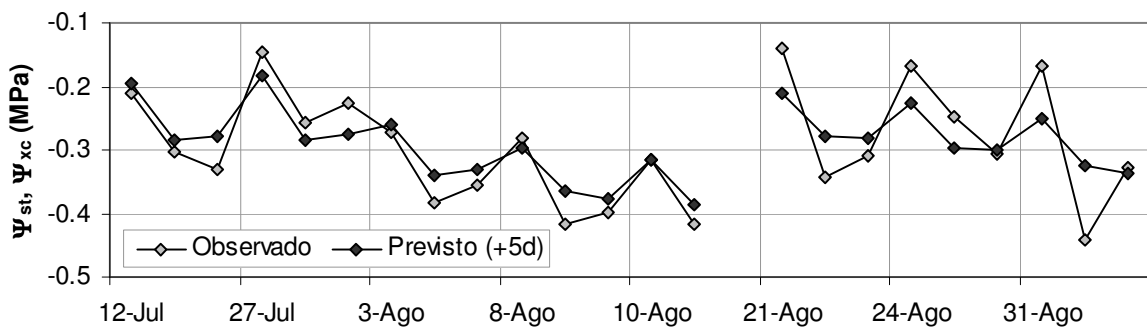


Figura 6.54 - Previsão do estado hídrico da planta ( $\Psi_{xc}$ ) gerado com 5 dias de avanço e potencial hídrico do ramo medido ( $\Psi_{st}$ ); caso de estudo do pomar, T-III.

Na Figura 6.55 e Figura 6.56 faz-se a avaliação estatística da previsão da transpiração total diária e do estado hídrico em relação às medições realizadas, respectivamente. O sistema apresenta o mesmo desempenho no prognóstico das duas variáveis analisadas, verificando-se uma degradação progressiva da precisão de estimativa no caso da transpiração e uma degradação acentuada a partir de 7 dias de avanço no caso da previsão do estado hídrico. Este tempo de avanço tem correspondência com as fontes de previsão de  $ETo$ , como apresentado em 6.1.

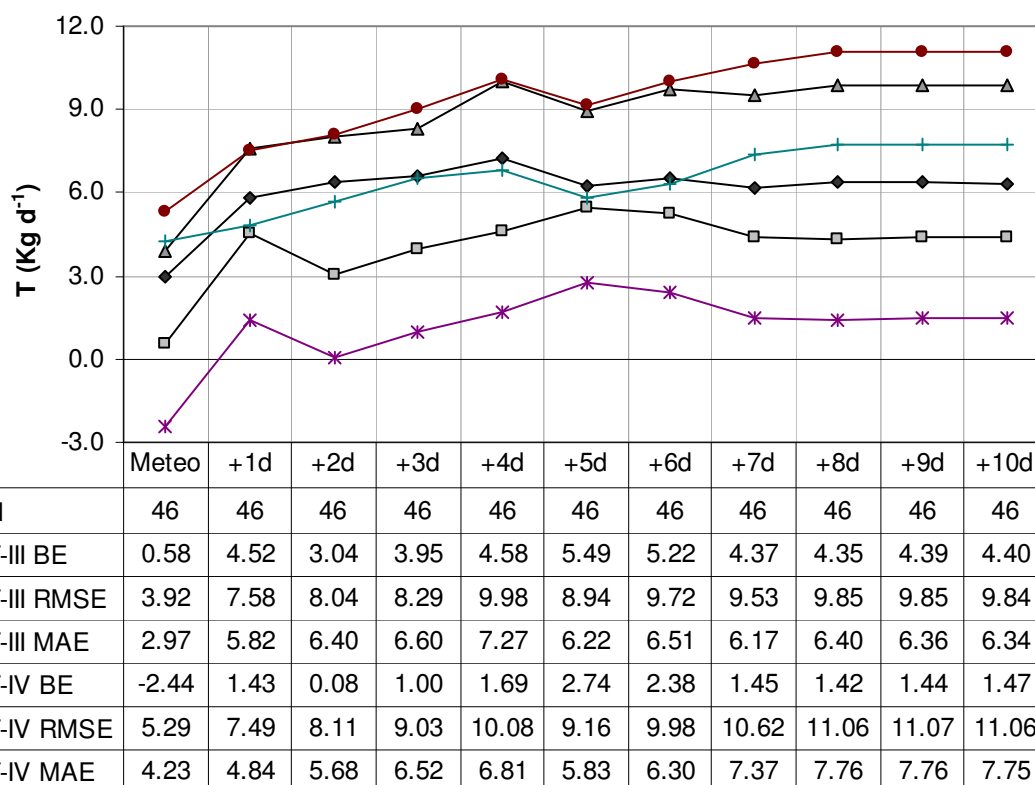


Figura 6.55 - Avaliação estatística do desempenho do sistema ISIS para a previsão da transpiração por confrontação com a transpiração medida; caso de estudo do pomar, T-III e T-IV.

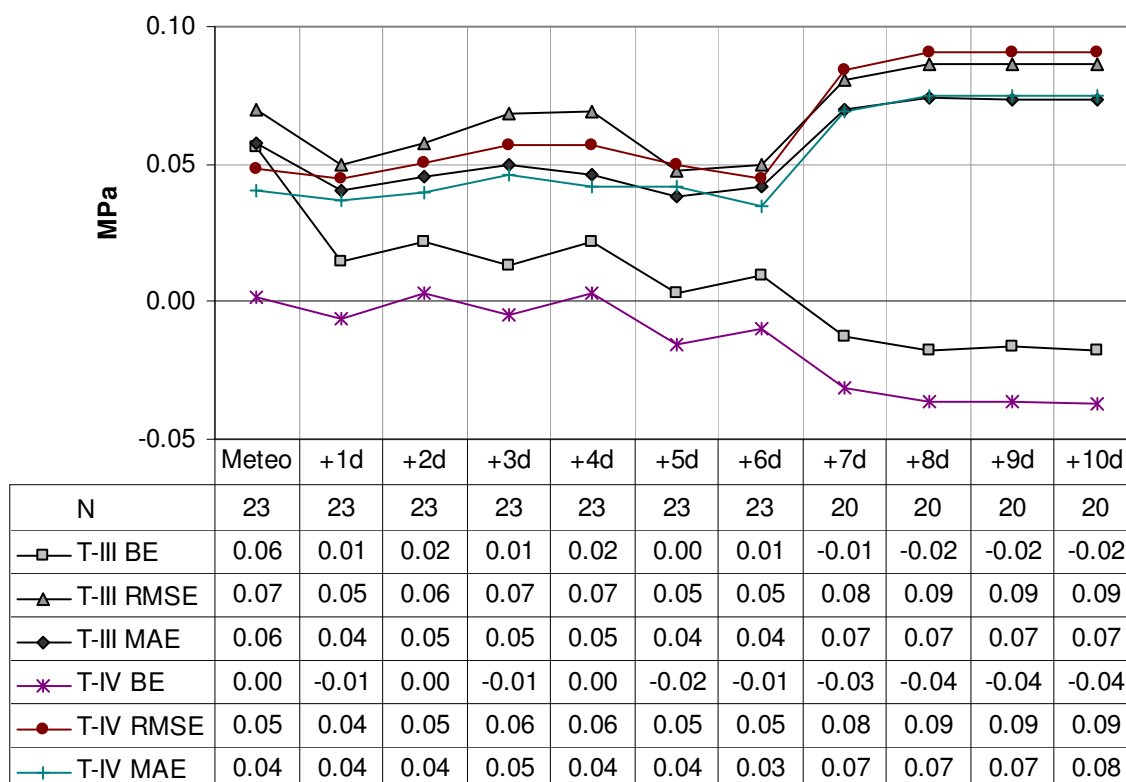


Figura 6.56 - Avaliação estatística do desempenho do sistema ISIS para a previsão do estado hídrico da planta ( $\Psi_{xc}$ ) por confrontação com o potencial hídrico do ramo ( $\Psi_{st}$ ) medido; caso de estudo do pomar, T-III e T-IV.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS



#### SUMÁRIO

Os trabalhos realizados no âmbito desta tese permitiram a obtenção do sistema ISIS que aplicado aos caso estudo, possibilitou a caracterização do estado actual da cultura e a sua evolução a curto/médio prazo. Desta forma, os trabalhos e resultados obtidos neste estudo podem ser um contributo para a melhoria das práticas de gestão hídrica em agricultura.

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

#### 1.1. CONCLUSÕES

#### 1.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

## 7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 Conclusões

Esta tese tem como objectivo geral encetar uma nova abordagem para a determinação das necessidades hídricas das culturas lenhosas anisotrópicas. O princípio subjacente era o de contribuir para a melhoria das práticas de gestão da rega, através do desenvolvimento de novas ferramentas de apoio à decisão. Da análise das exigências da gestão da rega (3.1), no actual contexto de escassez de água e competitividade do sector, constata-se que são necessárias ferramentas que facilitem a utilização do vasto conhecimento científico sobre as relações hídricas das plantas. É pertinente a introdução de planos de gestão hídrica com rega deficitária, em algumas culturas e regiões, sendo para tal necessário dispor instrumentos de gestão que permitam controlar melhor o estado hídrico das culturas.

Para a gestão da rega é necessário dispor de uma boa caracterização do estado actual da cultura e uma previsão sobre o seu estado futuro a curto/médio prazo. Os conhecimentos anteriores e a revisão bibliográfica realizada, bem como o trabalho experimental desenvolvido, levaram à consideração de uma abordagem integrada do problema que contempla: (1) a utilização de um sistema de monitorização vegetal (fitomonitorização) para a quantificação da transpiração e do estado hídrico (estado actual da cultura), (2) a previsão da evolução a curto/médio prazo do estado da cultura, suportada pela previsão do estado do tempo e pela utilização de um modelo SPAC.

#### ▪ Sistema de monitorização vegetal

Este sistema foi objecto de teste e desenvolvimento ao longo de todo o período de ensaios experimentais (2003 a 2006) com o objectivo de obter fitomonitoradores da transpiração e do estado hídrico da cultura adequados à finalidade, o que pressupôs ajustamentos quer nas medições, quer nas técnicas de processamento e interpretação de dados.

Para a quantificação da transpiração, possibilitando uma utilização corrente do sistema (considerando os pré-requisitos impostos em 3.2), utilizou-se o método de medição do fluxo de seiva de Granier. A calibração original deste método subestima fortemente a densidade de fluxo de seiva nesta cultura, como detectado em estudos anteriores, quer nesta cultura quer noutras espécies lenhosas, pelo que a primeira etapa foi a verificação e calibração do método. A partir dos estudos realizados, em lisímetro e em pomar, obteve-se uma correcção que possibilita uma estimativa correcta da transpiração do coberto pela integração das medições pontuais.

Para a determinação do estado hídrico da cultura, foram utilizadas medições microdendrométricas da variação do diâmetro do tronco e ramos, por esta ser uma medição automatizável. Estas medições permitem a determinação dos valores extremos diários da variação do diâmetro e alguns índices convencionais para caracterizar o estado hídrico da cultura. No entanto, estes índices convencionais revelaram-se pouco precisos na quantificação do estado hídrico, mesmo em lisímetro com variações significativas diárias e sazonais de potencial hídrico do ramo. Como a determinação do estado hídrico é a variável central para a condução da rega, em especial da rega deficitária, procurou-se obter um índice com melhor resposta. Dos estudos realizados, resultou um índice combinado a partir da amplitude de variação e da taxa de crescimento diária (MDS (1-TGR)), que permitiu estimar convenientemente o estado hídrico do coberto. A estimativa obtida com a média de apenas duas medições microdendrométricas (amostra do coberto) apresenta uma boa correlação com os valores de potencial hídrico do ramo, quer medidos em lisímetro ( $r^2=0.90$ ), quer com os valores medidos em pomar ( $r^2=0.81$ ).

- **Previsão da evapotranspiração de referência**

Esta informação é a base para a inferência da evolução do estado da cultura a curto/médio prazo, numa abordagem a partir do balanço hídrico. A utilização da previsão numérica do tempo (PNT) para o cálculo de ETo é ainda pouco utilizada. No entanto, a análise efectuada neste estudo, para a região dos ensaios, demonstrou que é oportuna a sua consideração. Apesar de se ter utilizado dados de PNT de um modelo global e com metade da resolução disponibilizada pelo modelo em tempo real, estes dados permitiram a previsão de ETo com um erro médio absoluto (MAE) de 1.01 mm d<sup>-1</sup> quando se consideram 144 h de avanço das previsões, sendo inferior para previsões de menor alcance. Este erro é inferior ao obtido pela utilização da normal climática da região para a estimativa de ETo, pelo que será preferível a utilização das PNT. Pode-se utilizar o procedimento apresentado em 6.1 para, usando a normal climática, estender a série de ETo prevista pela PNT, sempre que a gestão da rega exija uma maior antecipação da tomada de decisão.

- **Modelo SPAC para a previsão do estado futuro da cultura**

O modelo SPAC apresentado para prever a evolução do estado da cultura considera os processos de extracção de água do solo pela cultura e a regulação estomática da transpiração. Estes processos são modelados apenas ao nível hidráulico o que permitiu manter o sistema simples e com poucos parâmetros, facilitando a sua utilização futura. A abordagem utilizada mostrou ser suficiente para descrever convenientemente os fluxos de água no solo, originados pela extracção radicular e determinar o potencial hídrico experimentado pelo sistema radicular na interface solo -

raiz. O controlo estomático da transpiração requereu a introdução do efeito da capacitância hídrica da planta para simular o processo. A introdução da capacitância hídrica dos tecidos permitiu simular adequadamente a taxa de transpiração e o potencial hídrico, quer ao meio do dia, quer no final do período diurno.

Em conclusão, com o ajustamento de parâmetros suportado pelos resultados experimentais, foi possível, pela aplicação do modelo SPAC, simular com base na previsão de ETo, a evolução do estado hídrico da planta e a transpiração.

- **Sistema ISIS**

Em termos de síntese da informação gerada pelo sistema ISIS, para utilização prática na gestão da rega, é possível utilizar o valor mínimo de potencial hídrico previsto para cada dia ou construir índices do estado hídrico diário, como por exemplo o valor médio diário ou a duração do período durante o qual o potencial hídrico esteve abaixo de determinado valor.

## **7.2 Sugestões para trabalhos futuros**

Dado o carácter do estudo, os trabalhos apresentados nesta tese deixam em aberto muitas linhas de trabalho e aspectos a explorar e desenvolver.

Relativamente aos fitomotores do estado hídrico da cultura seria interessante aprofundar os testes de aplicação do índice MDS.(1-TGR) nesta e noutras culturas, atendendo a que a caracterização do estado hídrico da cultura é essencial para a gestão da rega deficitária.

Em relação às previsões de ETo, com base na PNT, será oportuno (1) realizar um estudo abrangente a nível nacional para avaliar a validade da utilização determinística desta fonte de informação em agricultura; (2) analisar a qualidade das previsões da precipitação, quer da quantidade, quer do momento da ocorrência (*hit rate*); (3) estudar a utilização das previsões numéricas por conjuntos para aumentar o alcance temporal e atribuir-lhes um grau de certeza.

Finalmente, importa melhorar o modelo SPAC apresentado nos aspectos de simulação dos processos e na estimativa/optimização de alguns parâmetros.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- Agele S, Cohen SS, Assouline S, 2006. Hydraulic characteristics and water relations of net house-bell pepper as affected by irrigation in a Mediterranean climate. *Environmental and Experimental Botany*, 57: 226-235.
- Alarcón JJ, Domingo R, Green SR, Sánchez-Blanco MJ, Rodríguez P, Torrecillas A, 2000. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees. *Plant and Soil*, 227: 77-85.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy.
- Alves I, Pereira LS, 2000. Non-water-stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: A new approach. *Irrigation Science*, 19: 101-106.
- Ameglio T, Archer P, Cruiziat P, Daudet F, Cohen M, 1997. A limit in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *In: Proc. 2nd Int. Sym. on Irrigation of Hort. Crops* (Ed. KS Chartzoulakis), *Acta Hort.*, 449 Vol. I, ISHS.
- Ameglio, T, 1992. Discussion sur le potentiel de base. *Fonctionnement Hydrique des Plants. Relations Avec la Physiologie*, INRA, France.
- Anadranistakis M, Liakatas A, Alexandris S, Aggelides S, 1997. Soil heat flux in the Penman-Monteith evapotranspiration equation. *In: Proc. 2nd Int. Sym. on Irrigation of Hort. Crops*, (Ed. KS Chartzoulakis), *Acta Hort.* 449 Vol. I, ISHS.
- Andrade JL, Meinzer FC, Goldstein G, Holbrook NM, Cavelier J, Jackson P, Silvera K, 1998. Regulation of water flux through trunks, branches, and leaves in trees of a lowland tropical forest. *Oecologia*, 115: 463-471.
- Annandale JG, Jovanovic NZ, Campbell GS, Sautoy N, Benadé N, 2003. A two-dimensional water balance model for micro-irrigated hedgerow tree crops. *Irrigation Science*, 22: 157-170.
- Assmann SM, 1999. The cellular basis of guard cell sensing of rising CO<sub>2</sub>. *Plant, Cell & Environment*, 22: 629-637.
- Azcón-Bieito J, Talón M, 2000. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Mc.Graw-Hill, Barcelona, Espanha.
- Ball JT, Woodrow IE, Berry JA, 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. *In: Progress in photosynthesis research* (Ed. J. Biggins). Dordrecht: Martinus Nyhoff, 221-224.
- Bauerle WL, Whitlow TH, Pollock CR, Frongillo EA, 2002. A laser-diode system for measuring sap flow by the heat-pulse method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 110: 275-284.
- Boast CW, Robertson TM, 1982. A "Micro-Lysimeter" Method for Determining Evaporation from Bare Soil: Description and Laboratory Evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46: 689-696.
- Bomfim GV, Azevedo BM, Viana TVA, Borges RLM, Oliveira JJ, 2004. Calibração de um lisímetro de pesagem após dois anos de utilização. *Revista Ciência Agronômica*, 35: 284-290.
- Braun P, Schmid J, 1999. Sap flow measurements in grapevines – scope and limits of heat balance and Granier-type sensors. *In: Proc. 1st ISHS Workshop on Water Relations of Grapevines* (Eds. EH Rühl, J Schmid), *Acta Hort.*, 493, ISHS.

- Brodribb TJ, Holbrook NM, 2006. Declining hydraulic efficiency as transpiring leaves desiccate: two types of response. *Plant, Cell & Environment* 29: 2205-2215.
- Brough DW, Jones HG, Grace J, 1986. Diurnal changes in water content of the stems of apple trees, as influenced by irrigation. *Plant, Cell & Environment*, 9: 1 – 7.
- Buckley TN, 2005. The control of stomata by water balance. *New Phytologist*, 168: 275-292.
- Burba G, Anderson D, 2007. Introduction to the eddy covariance method. LI-COR Biosciences.
- Burch G, 1979. Soil and plant resistances to water absorption by plant root systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 30: 279-292.
- Campbell GS, 1975. Steady-state diffusion porometers. *In: Measurement of stomatal aperture and diffusive resistance. Coll. Agr. Res. Center Bull.*, 809: 20. Washington State Univ., Pullman, Wash, USA.
- Campbell GS, Unsworth MH, 1979. An inexpensive sonic anemometer for eddy correlation. *J. Appl. Meteorol.*, 18: 1072-1077.
- Carlson TN, Lynn B, 1991. The effects of plant water storage on transpiration and radiometric surface temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 57: 171-186.
- Chalmers DJ, Burge G, Jerie PH, Mitchell PD, 1986. The mechanism of regulation of 'Bartlett' pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and regulated deficit irrigation. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, 111: 904-907.
- Chalmers DJ, Mitchell PD, van Heek L, 1981. Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. *Journal of the American Society of Horticultural Science*, 106: 307-12.
- Chartzoulakis K, Theritos I, Noitsakis B, 1997. The effect of soil water deficit on internal water relations of kiwifruit. *Acta Horticulturae*, 444: 328-334.
- Choné X, Tregoat O, Van Leeuwen C, Dubourdieu D, 2000. Déficit hydrique modéré de la vigne: parmi les 3 applications de la chambre à pression, le potentiel tige est l'indicateur le plus précis. *J. Int. Sci. Vin*, 34, n° 4: 169-176.
- Choné X, van Leeuwen C, Dubourdieu D, Gaudillere JP, 2001. Stem water potential is a sensitive indicator of grapevine water status. *Annals of Botany*, 87: 477-483.
- Chow V, Maidment DR, Mays LW, 1988. *Applied Hidrology*. McGraw-Hill, USA.
- Cifre J, Bota J, Escalona JM, Medrano H, Flexas J, 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.): An open gate to improve water-use efficiency? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 106: 159-170.
- Clearwater M, Meinzer FC, Andrade JL, Goldstein G, Holbrook NM, 1999. Potential errors in measurement of nonuniform sap flow using heat dissipation probes. *Tree Physiology*, 19: 681-687.
- Clearwater MJ, Lowe RG, Hofstee BJ, Barclay C, Mandemaker AJ, Blattmann P, 2004. Hydraulic conductance and rootstock effects in grafted vines of kiwifruit. *Journal of Experimental Botany*, 55: 1371-1382.
- Clearwater MJ, Lowe RG, Hofstee BJ, Barclay C, Mandemaker AJ, Blattmann P, 2004. Hydraulic conductance and rootstock effects in grafted vines of kiwifruit. *J. Exp. Bot.*, 55: 1371-1382.

- Cohen Y, Cohen S, Cantuarias-Aviles, Schiller G, 2008. Variations in the gradient of sap velocity in trunks of forest and fruit trees. *Plant Soil*, 305: 49-59.
- Cohen Y, Fuchs M, Green GC, 1981. Improvement of the heat pulse method for determining sap flow in trees. *Plant Cell Environ.*, 4: 391-397.
- Comstock J, Mencuccini M, 1998. Control of stomatal conductance by leaf water potential in *Hymenoclea salsola* (T. G.), a desert subshrub. *Plant, Cell & Environment*, 21: 1029-1038.
- Comstock JP, 2002. Hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and transpiration. *J. Exp. Bot.*, 53: 195-200.
- Condon JM, 1991. Aspects of kiwifruit stem structure in relation to transport. *In: 2th International Symp. On Kiwifruit* (Eds. IJ Warrington, DH Greer, AM Snowball, DJ Woolley), *Acta Hort.*, 297 Vol. II, ISHS.
- Crombie DS, Tippet JT, Hill TC, 1988. Dawn water potential and root depth of trees and understorey species in South-western Australia. *Australian Journal of Botany*, 36: 621-631.
- Daamen CC, Simmonds LP, Wallace JS, Laryea KB, Sivakumar MVK, 1993. Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 65: 159-173.
- Daley M, Phillips N, 2006. Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest. *Tree Physiology*, 26: 411-419.
- Damesin C, Rambal, S, 1995. Field study of leaf photosynthetic performance by a Mediterranean deciduous oak tree (*Quercus pubescens*) during a severe summer drought. *New Phytologist*, 131: 159-167.
- David TMS, 1995. Transpiração num povoamento adulto de *Eucalyptus globulus* Labill. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa.
- David TMS, 2000. Intercepção da precipitação e transpiração em árvores isoladas de *Quercus rotundifolia* Lam.. Dissertação de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa.
- Davies WJ, Tardieu F, Trejo CL, 1994. How do chemical signals work in plants that grow in drying soil? *Plant Physiol.*, 104: 309-314.
- Dayau S, Valancogne C, Morand D, Nizinski J, 1992. Estimation du flux de sève du kiwi par bilan de chaleur en conditions semi-contrôlées. *In: Cah. Orstom, sér Pédol. Vol. XXVII, n°2: 373-379.*
- Denmead OT, Shaw RH, 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Ag. J.*, 54: 385-390.
- Dewar RC, 2002. The Ball-Berry-Leuning and Tardieu-Davies stomatal models: synthesis and extension within a spatially aggregated picture of guard cell function. *Plant, Cell & Environment*, 25: 1383-1398.
- Diawara A, Loustau D, Berbigier P, 1991. Comparison of two methods for estimating the evaporation of a *Pinus pinaster* stand: sap flow and energy balance with sensible heat flux measurements by an eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 54: 49-66.
- Dichio B, Baldassarre R, Nuzzo V, Biasi R, Xiloyannis C, 1999. Hydraulic conductivity and xylem structure in young kiwifruit vines. *Acta Horticulturae*, 498: 159-164.
- Donovan L, Linton M, Richards J, 2001. Predawn plant water potential does not necessarily equilibrate with soil water potential under well-watered conditions. *Oecologia*, 129: 328-335.

- Donovan LA, Richards JH, Linton MJ, 2003. Magnitude and mechanisms of disequilibrium between predawn plant and soil water potentials. *Ecology*, 84: 463-470.
- Doorenbos, Pruitt, 1975. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, Italy , 179p.
- DRAEDM, 1995. Carta de solos e carta de aptidão da terra de Entre-Douro e Minho. Agroconsultores e Geometral, Lisboa.
- Dry PR, Loveys BR, McCarthy MG, Stoll M, 2001. Strategic irrigation management in Australian vineyards. *J. Int. Sci. Vigne Vin.*, 35: 129-139.
- Escalona L, Flexas J, Medrano H, 2000. Comparison of heat balance and gas exchange methods to measure transpiration in irrigated and water stressed grapevines. *In: Proc. Of the V Int. Symp. On Grapevine Physiology*, (Ed. BA Bravdo), Acta Hort., 526, ISHS.
- Evet SR, 1999. Energy and Water Balances at Soil-Plant-Atmosphere Interfaces. *In: Handbook of soil science*, (Ed. ME Sumner), CRC Press, pp. 2148.
- FAO, 2000. Deficit Irrigation Practices. Water Reports 22. FAO, Rome, Italy.
- Farquhar GD, Caemmerer S, Berry JA, 1980. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C<sub>3</sub> species. *Planta*, 149: 78-90.
- Feddes RA, Hoff H, 2001. Modeling root water uptake in hydrological and climate models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82: 2797-2809.
- Feddes RA, Hoff H, Bruen M, Dawson T, Rosnay P, Dirmeyer P, Jackson RB, Kabat P, Kleidon A, Lilly A, Pitman AJ, 2001. Modelling root water uptake in hydrological and climate models. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82: 2797-2809.
- Feddes RA, Kowalik P, Zarandy H, 1978. Simulation of field water use and crop yield. Pudoc. Wageningen, The Netherlands.
- Fernández J, Green S, Caspari H, Diaz-Espejo A, Cuevas M, 2008. The use of sap flow measurements for scheduling irrigation in olive, apple and Asian pear trees and in grapevines. *Plant and Soil*, 305: 91-104.
- Fernández JE, Palomo MJ, Díaz-Espejo A, Clothier BE, Green SR, Girón IF, Moreno F, 2001. Heat-pulse measurements of sap flow in olives for automating irrigation: tests, root flow and diagnostics of water stress. *Agricultural Water Management*, 51: 99-123.
- Fernando RM, 1992. Hidrologia (Notas Provisórias sobre água no solo). Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa.
- Ferreira MI, 1996. 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 MI, Katerji N, 1992. Is stomatal conductance in a tomato crop controlled by soil or atmosphere? *Oecologia*, 92: 104-107.
- Ferreira MI, Paço TA, Silvestre J, Silva RM, 2008. Evapotranspiration estimates and water stress indicators for irrigation scheduling in woody plants. *In: Agricultural Water Management Research Trends*, (Ed. ML Sorensen), Nova Science Publishers: 129-170. New York, USA.

- Ferreira MI, Valancogne C, Daudet F, Ameglio T, Pacheco CA, Michaelsen J, 1996. Evapotranspiration and crop-water relations in a peach orchard. *In: Proc .International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, (Eds CR Camp, EJ Sadler, RE Yoder), San Antonio, Texas: 61-68.
- Ferreira MI, Zitscher H, 1996. Measurements with Granier method in short trunks near the soil. *In: 3rd. Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants*, Barcelona, Espanha.
- Filho CLO, 2007. Prognóstico das variáveis meteorológicas e da evapotranspiração de referência com o modelo de previsão do tempo GFS/NCEP. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, Brasil.
- Franks PJ, Buckley TN, Shope JC, Mott KA, 2001. Guard Cell Volume and Pressure Measured Concurrently by Confocal Microscopy and the Cell Pressure Probe. *Plant Physiol.*, 125: 1577-1584.
- Friend AD, 1995. PGEN: An integrated model of leaf photosynthesis, transpiration, and conductance. *Ecological Modelling*, 77(2-3): 233-256.
- Früh, Kurth W, 1999. The hydraulic system of trees: Theoretical framework and numerical simulation. *Journal of Theoretical Biology*, 201: 251–270.
- Fuchs M, 1990. Infrared measurements of canopy temperature and detection of plant water stress. *Theoretical and Applied Climatology*, 42: 253-261.
- Fulton A, Buchner RP, Olson WH, Schwankl L, Gilles C, Bertagna N, Walton J, Shackel KA, 2001. Rapid Equilibration of Leaf and Stem Water Potential Under Field Conditions in Almonds, Walnuts and Prunes. *Hort. Technology*, 11: 607-613.
- Gardner WR, 1983. *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. ASA-CSSA-SSSA, USA.
- Garnier E, Berger A 1987. The influence of drought on stomatal conductance and water potential of peach trees growing in the field. *Sci. Hortic.*, 32: 249–263.
- 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.
- Genard M, Fishman S, Vercambre G, Huguet JG, Bussi C, Besset J, Habib R, 2001. A Biophysical Analysis of Stem and Root Diameter Variations in Woody Plants. *Plant Physiol.*, 126: 188-202.
- Goldhamer D, Fereres E, 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. *Irrigation Science*, 20: 115-125.
- Goldhamer DA, 2003. Irrigation scheduling with plant indicators: measurement. *Encyclopaedia of water science* (Eds SW Trimble, BA Stewart, TA Howell), USA.
- Goldhamer DA, 2008. Irrigation Scheduling: Plant Indicators (Measurement). *In: Encyclopedia of Water Science*, Second Edition, (Ed. SW Trimble, BA Stewart, TA Howell): 602-605.
- Goldhamer DA, Fereres E, 2004. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors. *Irrigation Science*, 23: 11-19.
- Goldhamer DA, Fereres E, Cohen M, Girona J, Mata M, 2000. Comparison of continuous and discrete plant-based monitoring for detecting tree water deficits and barriers to grower adoption for irrigation management. *Acta Hort.*, 537: 431-445.

- Goldhamer DA, 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. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 124: 437-444.
- Goldhamer DA, Salinas M, 2000. Evaluation of regulated deficit irrigation on mature orange trees grown under high evaporative demand. *Proc. Int. Soc. Citricult.*, IX Congr. 227-231.
- Goldhamer DA, Sibbett GS, Phene RC, Katayama DG, 1994. Early irrigation cutoff has little effect on French prune production. *Calif. Agr.*, 48: 13-17.
- Granier A, 1985. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 42 (2): 193-200.
- Granier A, 1987. Measure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Annales des Sciences Forestières*, 44 (1): 1-14.
- Gratacos E, Gurovich L, 2003. Uso de la técnica del fitomonitor como indicador del estado hídrico del kiwi y su uso en riego programado. *Ciência e Investigación Agrária*, 30: 113-138.
- Green SR, Clothier BE, 1988. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat-pulse technique. *Journal of experimental Botany*, 39: 115-123.
- Green SR, Clothier BE, 1995. Root water uptake by kiwifruit vines following partial wetting of the root zone. *Plant and Soil*, 173: 317-328.
- Green SR, Kirkham MB, Clothier BE, 2006. Root uptake and transpiration: from measurements and models to sustainable irrigation. *Agricultural Water Management*, 86: 165-176.
- Guci R, Massai R, Xiloyannis C, 1997. Mechanisms of drought avoidance in kiwifruit vines. *Acta Hort.*, 444: 311-315.
- Gurevitch J, Scheiner SM, Fox GA, 2006. *The Ecology of Plants*, Second Edition. Sinauer Associates: EUA.
- Gurovich L, Ton Y, Vergara LM, 2006. Irrigation scheduling of avocado using phytomonitoring techniques. *Ciência e Investigación Agrária*, 33: 117-124.
- Haijie Y, Guochen L, Chenglin M, Rui W, 2003. Discussion on judging water stress of plant based on variation of stem sap flow. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Intelligent Information Technology in Agriculture (ISIITA2003)*, (Ed. Zhao Chunjiang). Beijing, China.
- Hall AJ, McPherson HG, Crawford RA, Seager NG, 1996. Using early-season measurements to estimate fruit volume at harvest in kiwifruit. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 24: 379-391.
- Hargreaves GH, Samani ZA, 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Tech. Note, J. Irrig. And Drain. Eng.*, ASCE, 108: 225-230.
- Hargreaves GH, Samani ZA, 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. in Agric.*, 1: 96-99.
- Hillel D, 1998. *Environmental Soil Physics*, Academic Press, 770 pp.
- Hölttä T, Vesala T, Perämäki M, Nikinmaa E, 2002. Relationships between embolism, stem water tension, and diameter changes. *Journal of Theoretical Biology*, 215: 23-38.
- Homae M, Feddes RA, Dirksen C, 2002. A Macroscopic Water Extraction Model for Nonuniform Transient Salinity and Water Stress. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1764-1772.

- Hopmans, JW, Bristow KL, 2002. Current capabilities and future needs of root water and nutrient uptake modeling. *Adv. Agron.*, 77: 103–183.
- Howell TA, McCormick RL, Phene CJ, 1985. Design and installation of large weighing lysimeters. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, 28: 106-112.
- Hughes KA, Willigen P, Gandar PW, Clothier BE, 1991. Kiwifruit root systems: structure & function. *Acta Horticulturae* 297, 383-389.
- Idso SB, Jackson RD, Pinter PJ, Reginato RJ, Hatfield JL, 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 45-55.
- Jackson RB, Sperry JS, Dawson TE, 2000. Root water uptake and transport: using physiological processes in global predictions. *Trends in Plant Science*, 5: 482-488.
- Jackson RD, 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation Research*, 1: 43-85.
- Jackson RD, Idso SB, Reginato RJ, Pinter PJ, 1981. Canopy temperature as a drought stress indicator. *Water Resources Research*, 17: 1133-1138.
- Jarvis PG, 1976. The interpretation of the variation in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B – Biological Sciences*, 273: 593-610.
- Jarvis PG, 1985. Coupling of transpiration to the atmosphere in horticulture crops: the omega factor. *In: Water Relations in Fruit Crops, Acta Horticulturae*, 171: 187-205.
- Jarvis PG, McNaughton KG, 1986. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. *Advanced Ecology Research*, 15: 1-49.
- Jones HG, 1992. *Plant and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology.* University Press, Cambridge, UK.
- Jones HG, 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance in irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95: 135-149.
- Jones HG, 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55: 2427-2436.
- Jones HG, Stoll M, Santos T, Sousa C, Chaves MM, Grant OM, 2002. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, 53: 2249-2260.
- Jones HG, Tardieu F, 1998. Modelling water relations of horticultural crops: a review. *Scientia Horticulturae*, 74: 21-46.
- Judd MJ, McAneney KJ, Wilson KS, 1989. Influence of water stress on kiwifruit growth. *Irrigation Science*, 10 : 303-311.
- Katerji N, Hallaire M, 1984. Les grandeurs de référence utilisables dans l'étude de l'alimentation en eau des cultures. *Agronomie*, 4: 999-1008.
- Köckenberger W, Pope JM, Xia Y, Jeffrey KR, Komor E, Callaghan PT, 1997. A non-invasive measurement of phloem and xylem water flow in castor bean seedlings by nuclear magnetic resonance microimaging. *Planta*, 201 : 53-63.

- Kozlowski TT, Kramer PJ, Pallardy SG, 1991. The physiological ecology of woody plants. Academic Press, London.
- Kozlowski TT, Pallardy SG, 1997. Physiology of Woody Plants. 2nd Ed. Academic Press, San Diego.
- Kramer PJ, 1983. Water Relations of Plants. Academic Press, London.
- Kramer PJ, Boyer JS, 1995. Water relations of plants and soils. San Diego, Academic Press.
- Kriedemann PE, Goodwin I, 2003. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. Irrigation insights number 4, (Ed. A Currey), Land & Water Australia, Australia.
- Kucera J, Cermak J, Penka M, 1977. Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. *Biologia Plantarum*, 19: 413-420.
- Landsberg JL, Kaufmann MR, Binkley D, Isebrands J, Jarvis PG, 1991. Evaluating progress toward closed forest models based of carbon, water and nutrients. *Tree Physiol.*, 9: 1-15.
- Lankreijer HJM, 1998. The water balance of forests under elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. Ph.D. Thesis, University of Groningen, Groningen, 137 p.
- Larcher W, 1995. Physiological Plant Ecology. Springer, Berlin.
- Leuning R, 1995. A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C<sub>3</sub> plants. *Plant, Cell and Environment*, 18: 339-355.
- Leuning R, Tuzet A, Perrier A, 2003. Stomata as part of the Soil-Plant-Atmosphere continuum. *In: Forests at the Land-Atmosphere Interface* (Eds M Mencuccini, J Grace, J Moncrieff, K McNaughton), CAB International, Edinburgh, Scotland.
- Lhomme JP, Rocheteau A, Ourcival JM, Rambal S, 2001. Non-steady-state modelling of water transfer in a Mediterranean evergreen canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108: 67-83.
- Loustau D, Berbigier P, Roumagnac P, Arruda-Pacheco C, David JS, Ferreira MI, Pereira JS, Tavares R, 1996. Transpiration of a 64-year-old maritime pine stand in Portugal. *Oecologia*, 107: 33-42.
- Lu P, 1997. A Direct Method for Estimating the Average Sap Flux Density Using a Modified Granier Measuring System. *Functional Plant Biology*, 24: 701-705.
- Lu P, Müller WJ, Chacko EK, 2000. Spatial variations in xylem sap flux density in the trunk of orchard-grown, mature mango trees under changing soil water conditions. *Tree Physiology*, 20, 683-692.
- Lundblad M, Lagergren F, Lindroth A, 2001. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sapflow measurements in pine and spruce. *Ann. For. Sci.*, 58: 625-638.
- Martin P, 1989. The significance of radiative coupling between vegetation and the atmosphere. *Agricultural and Forest Meteorology*, 49: 45-53.
- Mass EV, Hoffman GJ, 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. Drainage Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 103: 115-134.
- Matthews MA, Anderson MM, Schultz HR, 1987. Phenologic and growth responses to early and late season water deficits in Cabernet franc. *Vitis*, 26: 147-160.
- Mauder M, Foken T, 2004. Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK2. Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, Arbeitsergebnisse 26: 44.

- McAneney KJ, Judd MJ, 1983. Observations on kiwifruit (*Actinidia chinensis* Planch.) root exploration, root pressure, hydraulic conductivity, and water uptake. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 26: 507-510.
- Medrano H, Escalona JM, Cifre J, Bota J, Flexas J, 2003. A ten-year study on the physiology of two Spanish grapevine cultivars under field conditions: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality. *Functional Plant Biology*, 30: 607–619.
- Meinzer FC, Andrade JL, Goldstein G, Holbrook NM, Cavelier J e Jackson P, 1997. Control of transpiration from the upper canopy of a tropical forest: the role of stomatal, boundary layer and hydraulic architecture components. *Plant Cell Environ.*, 20: 1242-1252.
- Meinzer FC, Clearwater MJ, Goldstein G, 2001. Water transport in trees: current perspectives, new insights and some controversies. *Environmental and Experimental Botany*, 45: 239-262.
- Meinzer FC, James SA, Goldstein G, Woodruff D, 2003. Whole-tree water transport scales with sapwood capacitance in tropical forest canopy trees. *Plant Cell Environment*, 26: 1147-1155.
- Monteith JL, 1965. Evaporation and environment. *In: The state and movement of water in living organisms*, (Ed. GE Fogg), XIXth Symp. Soc. Expt. Biol., 1964: 205-236.
- Monteith JL, Unsworth MH, 1990. *Principles of environmental physics*. Edward Arnold, London.
- Moreira I, 1997. *Histologia Vegetal*. Didáctica Editora, Lisboa.
- Moreno F, Conejero W, Martín-Polomo MJ, Girón IF, Torrecillas A, 2006. Maximum daily trunk shrinkage reference values for irrigation scheduling in olive trees. *Agricultural Water Management*, 84: 290-294.
- Moriana A, Orgaz F, Pastor M, Fereres E, 2003. Yield responses of a mature olive orchard to water deficits. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 128: 425-431.
- Nadezhkina N, 1999. Sap flow index as an indicator of plant water status. *Tree Physiology*, 19, 885-891.
- Nadezhkina N, 2000 Specificity of sap flow index for mist irrigation control. *Acta Horticulturae*, 537: 479-485.
- Nadezhkina N, Ferreira MI, Silva RM, Pacheco CA, 2007. Seasonal variation of water uptake of a *Quercus suber* tree in Central Portugal. *Plant and Soil*, 305: 105-119.
- Naor A, 2000. Midday stem water potential as a plant water stress indicator for irrigation scheduling in fruit trees. *Acta Hortic.*, 537: 447–454.
- Naor A, 2006. Irrigation Scheduling and Evaluation of Tree Water Status in Deciduous Orchards. *Horticultural Reviews*, (Ed. J Janick), 32: 112-165.
- Naor A, Cohen S, 2003. Sensitivity and variability of maximum trunk shrinkage, midday stem water potential, and transpiration rate in response to withholding irrigation from field-grown apple trees. *HortScience*, 38: 547-551.
- Naor A, Hupert H, Greenblat Y, Peres M, Kaufman A, Klein I, 2001. The response of nectarine fruit size and midday stem water potential to irrigation level in stage III and crop load. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 126: 140-143.

- Naor A, Peres M, 2001. Pressure increase rate affects the accuracy of stem water potential measurements in deciduous trees using the pressure chamber technique. *J. Hort. Sci. Biotech.*, 76: 661-663.
- Netto AA, 2007. Estimativa da retenção de água no solo a partir do uso de equipamentos não convencionais, redes neurais artificiais e funções de pedotransferência. Dissertação de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Nobel PS, 1983. *Biophysical Plant Physiology and Ecology*. W.H. Freeman, San Francisco, 413p.
- Nobel PS, 1991. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. Academic Press, San Diego, California, USA: 473-540.
- Nuzzo V, Dichio B, Xiloyannis C, Piccotino D, Massai R, 1997. Contribution to transpiration of different tissues of kiwifruit vines from their water reserves. *Acta Horticulturae*, 444: 328-334.
- Oke, 1990. *Boundary Layer Climates*, (2<sup>a</sup> ed), Univ. Press, Cambridge, 435p.
- Ortuño MF, Alarcón JJ, Nicolás E, Torrecillas A, 2004. Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. *Plant Science*, 167: 275-280.
- Ortuño MF, Alarcón JJ, Nicolás E, Torrecillas A, 2005a. Sap flow and trunk diameter fluctuations of young lemon trees under water stress and rewatering. *Environmental and Experimental Botany*, 54: 155-162.
- Ortuño MF, García-Orellana Y, Conejero W, Ruiz-Sánchez MC, Alarcón JJ, Torrecillas A, 2005b. Stem and leaf water potentials, gas exchange, sap flow, and trunk diameter fluctuations for detecting water stress in lemon trees. *Trees*, 20: 1-8.
- Paço TA, 2003. Modelação da evapotranspiração em cobertos descontínuos - Programação da rega em pomar de pessegueiro. Tese de Doutorado, Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa, 225p.
- Paço TA, Ferreira MI, Conceição N, 2006. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: Comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach. *Agricultural Water Management*, 85: 305-313.
- Panterne P, Burger J, Cruiziat P, 1998. A model of the variation of water potential and diameter within a woody axis cross-section under transpiration conditions. *Trees - Structure and Function*, 12: 293-301.
- Pataki D, Oren R, Smith WK, 2000. Sap flux of co-occurring species in a western subalpine forest during seasonal soil drought. *Ecology*, 81(9): 2557-2566.
- Paz AM, 2004. Funções de pedo-transferência para a capacidade de água utilizável dos solos do perímetro de rega do Lucefecit. Relatório de Licenciatura, Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa.
- Peixoto JP, 1987. *O Sistema Climático e as Bases do Clima*. Edição da Secretaria de Estado do Ambiente e Recursos Naturais, Lisboa.
- Penuelas J, Filella I, 1998. Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends in Plant Science*, 3: 151-156.
- Persson A, Grazzini F, 2007. *User Guide to ECMWF forecast products*, ECMWF.

- Phillips NG, Ryan MG, Bond BJ, McDowell NG, Hinckley TM, Ęermák J, 2003. Reliance on stored water increases with tree size in three species in the Pacific Northwest. *Tree Physiology*, 23: 237–245.
- Poljakoff-Mayber AE, Gale J, 1972. Physiological basis and practical problems of reducing transpiration. *Water Deficits and plant Growth*. Academic Press, USA, 1972.
- Porten M, Manty F, 1999. Sap flow measurements on different scion varieties. *In: Proc. 1st ISHS Workshop on Water Relations of Grapevines* (Eds. EH Rühl, J Schmid), *Acta Hort.*, 493: ISHS.
- Proebsting EL, Drake SR, Evans RG, 1984. Irrigation management, fruit quality and storage life of apples. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 109: 229-232.
- Raposo RJ, 1994. *História da Rega em Portugal*, Instituto da Água, Minist. Amb. e Rec. Naturais, 272p.
- Reid DEB, Silins U, Mendoza C, Lieffers VJ, 2005. A unified nomenclature for quantification and description of water conducting properties of sapwood xylem based on Darcy's law. *Tree Physiology*, 25: 993-1000.
- Reis FO, Campostrini E, Sousa EF, Silva MG, 2006. Sap flow in papaya plants: Laboratory calibrations and relationships with gas exchanges under field conditions. *Scientia Horticulturae*, 110: 254-259.
- Rodrigues AM, Pita GPA, 1997. Balanço energético em Montado de Sobro. *Silva Lusitana*, 5(1): 95–112.
- Rodrigues AM, Pita GPA, 1999. Measurements of momentum, sensible and latent heat fluxes above a cork oak stand by aerodynamic and eddy correlation methods. *Revista das Ciências Agrárias*, 22(1): 119-130.
- Rodrigues ML, Chaves MM, Wendler R, David MM, Quick WP, Leegood RC, Stitt M, Pereira JS, 1993. Osmotic adjustment in water stressed grapevine leaves in relation to carbon assimilation. *Australian Journal Plant Physiology*, 20: 309-321.
- Ronda RJ, Bruin HAR, Holtslag AAM, 2001. Representation of the canopy conductance in modelling the surface energy budget for low vegetation. *American Meteorological Society*, 40: 1431-1444.
- Sakuratani T, 1981. Heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *J. Agr. Met.*, 37: 9-17.
- Santos F, Forbes K, Moita R, 2002. *Climate Change in Portugal. Scenarios, Impacts and Adaptation Measures - SIAM Project*. Gradiva, 456p.
- Savé R, Serrano L, 1986. Some physiological and growth responses of kiwi fruit (*Actinidia chinensis*) to flooding. *Physiologia Plantarum*, 66: 75-78.
- Schmid J, Bettner W, 1999. Experience with Granier-type sensors for sap flow measurements in grapevines. *In: Proc. 1st ISHS Workshop on Water Relations of Grapevines* (Eds. EH Rühl, J Schmid), *Acta Hort.*, 493: 177-186.
- Schmid J, Braun P, 1997. Transpiration of grapevines in the field. *In: Proc. 2nd Int. Sym. on Irrigation of Hort. Crops* (Ed. KS, Chartzoulakis), *Acta Hort.* 449(I): 475-480.
- Scholander PF, Hammel HJ, Bradstreet A, Hemminggsen EA, 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science*, 148: 339-346.

- Schuepp PH, Leclerc MY Macpherson JI, Desjardins RL, 1990. Footprint predictions of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorology*, 50: 355-373.
- Schultz HR, 2003. Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant, Cell & Environment*, 26: 1393-1405.
- Sears FW, Zemansky MW, Young HD, 1973. Física. Livros Técnicos e Científicos., 2ª edição (1984), Rio de Janeiro, Vol. 2.
- Sepulcre-Cantó G, Zarco-Tejada PJ, Jiménez-Muñoz JC, Sobrino JA, Miguel E, Villalobos FJ, 2006. Detection of water stress in an olive orchard with thermal remote sensing imagery. *Agricultural and Forest Meteorology*, 136: 31-44.
- Sharma ML, 1985. Estimating evapotranspiration. *In: Advances in Irrigation* (Ed. D. Hillel), Academic Press, New York: 213-281.
- Silva RM, 2002. Medição da Transpiração em Culturas Lenhosas, Análise de Casos – Estudo e Verificação Experimental em *Vitis vinifera*. Relatório de Fim de Curso, Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa, 118p.
- Silva ALP, 2004. Medição da Transpiração em Cobertos Lenhosos: Contribuição para a Calibração e Análise de Parâmetros em Métodos de medição de Fluxo de Seiva. Relatório de Fim de Curso, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 100p.
- Silva RM, Ferreira MI, Paço TA, Veloso A, Oliveira M, 2004. Determinação das necessidades de rega em kiwi na região do Entre Douro e Minho. *Rega e Drenagem*, Dezembro de 2004: 34-40.
- Silva RM, Paço TA e Ferreira MI, 2007. Transpiration of kiwifruit orchard using Granier sap flow method calibrated in field conditions. *Acta Horticulturae*, 792: 593-600.
- Silvestre J, 2003. Evapotranspiração e Funcionamento Hídrico em *Vitis vinifera* L. Tese de Doutoramento, Instituto Superior de Agronomia – UTL, Lisboa, 219p.
- Silvestre J, Ferreira MI, 1998. Sap flow with the Granier method on a vineyard, in central Portugal, during a drying period *In: 4th International Workshop on Measuring Sap Flow in Intact Plants* (ed. J Cermak), IUFRO Publications, Czech Republic, 1998.
- Silvestre J, Ferreira MI, Valancogne C, 1999. Evapotranspiration and water relations from a vineyard in central Portugal during spring-summer periods. *In: Proc. 1st ISHS Workshop on Water Relations of Grapevines* (Eds. EH Rühl, J Schmid), *Acta Hort.* 493: 213-218.
- Simonneau T, Habib R, Goutouly JP, Huguet JG, 1993. Diurnal Changes in Stem Diameter Depend Upon Variations in Water Content: Direct Evidence in Peach Trees. *Journal of Experimental Botany*, 44: 615-621.
- Skaggs TH, van Genuchten M, Shouse PJ, Poss JA, 2006. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress. *Agricultural Water Management*, 86: 140-149.
- Sperry JS, Adler FR, Campbell GS, Comstock JP, 1998. Limitation of plant water use by rhizosphere and xylem conductance: results from a model. *Plant, Cell and Environment*, 21: 347-359.
- Steppe K, De Pauw DJW, Lemeur R, Vanrolleghem PA, 2006a. A mathematical model linking tree sap flow dynamics to daily stem diameter fluctuations and radial stem growth. *Tree Physiology*, 26: 257-273.

- Steppe K, Lemeur R, 2004. An experimental system for analysis of the dynamic sap-flow characteristics in young trees: results of a beech tree. *Functional Plant Biology*, 31: 83-92.
- Steppe K, Saveyn A, Vermeulen K, Lemeur R, 2006b. A comprehensive model for simulating stem diameter fluctuations and radial growth. *Acta Horticulturae*, 718: 35-42.
- Stedle E, 2000. Water uptake by plant roots: an integration of views. *Plant and Soil*, 226: 45-56.
- Stedle E, Peterson C, 1998. How does water get through roots? *J. Exp. Bot.*, 49: 775-788.
- Stewart JB, 1988. Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. For Meteorol.*, 43: 19-35.
- Stratton L, Goldstein G, Meinzer FC, 2000. Stem water storage capacity and efficiency of water transport: their functional significance in a Hawaiian dry forest. *Plant, Cell & Environment*, 23: 99-106.
- Strik BC, 2001. Irrigation of Established Kiwifruit Vines, Oregon State University Extension Publication EC 1464.
- Swanson RH, 1994. Significant historical developments in thermal methods for measuring sap flow in trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72: 113-132
- Taiz L, Zeiger E, 1998. *Plant Physiology*. 2nd Ed. Sunderland: Sinauer Associates xxx.
- Tanner BD, 1984. Measurements with a portable eddy correlation system. *In: International Symposium in Memory of Dr. Franz Sauberer, Vienna, Austria.*
- Tanner BD, Swiatek E, Greene JP, 1993. Density fluctuations and use of the krypton hygrometer in surface flux measurements. *In: Management of irrigation and drainage systems: integrated perspectives* (Ed. RG Allen), American Society of Civil Engineers, New York, NY: 945-952.
- Tardieu F, Davies WJ, 1993. Integration of hydraulic and chemical signalling in the control of stomatal conductance and water status of droughted plants. *Plant, Cell and Environment*, 16: 341-349.
- Tardieu F, Katerji N, Bethenod O, 1990. Relation entre l'etat hydrique du sol, le potentiel de base et quelques indicateurs de l'etat hydrique du mats. *Agronomie*, 10: 617-626.
- Tatarinov FA, Kucera J, Cienciala E, 2005. The analysis of physical background of tree sap flow measurement based on thermal methods. *Measurement Science and Technology*, 5: 1157-1169.
- Thomsen A, Ferreira MI, 2003. Simulation of heat field around sap flow sensor. *Workshop on Field Techniques for Environmental Physiology, BES, Tenerife, 16-22 March 2003.*
- Tomé RFD, 2004. Previsão do tempo com modelos de mesoscala: Casos de estudo com o modelo MM5 nos Açores. *Dissertação de Licenciatura, FC-UL, Lisboa.*
- Ton Y, 1997. Phytomonitoring system. *Proc. International congress on new agricultural technologies. Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico 16-19 April: 89-95.*
- Ton Y, Kopyt M, 2003. Phytomonitoring: a bridge from sensors to information technology for greenhouse control. *Acta Horticulturae*, 614: 639-644.
- Ton Y, Kopyt M, 2004. Phytomonitoring in realization of irrigation strategies for wine grapes. *Acta Horticulturae*, 652: 167-173.
- Ton Y, Kopyt M, Nilov N, 2004. Phytomonitoring technique for tuning irrigation of vineyards. *Acta Horticulturae*, 646: 133-139.

- Tromp J, Webster AD, Wertheim SJ, 2005. *Fundamentals of Temperate Zone Tree Fruit Production*. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Tsuda M, Tyree MT, 2000. Plant hydraulic conductance measured by the high pressure flow meter in crop plants. *J. Exp. Bot.*, 51: 823-828.
- Tuzet A, Perrier A, Leuning R, 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant, Cell & Environment*, 26: 1097-1116.
- Tyree MT, Dixon MA, 1986. Water stress induced cavitation and embolism in some woody plants. *Physiologia Plantarum*, 66: 397-405.
- Tyree MT, Fiscus EL, Wullschlegel SD, Dixon MA, 1986. Detection of Xylem Cavitation in Corn under Field Conditions. *Plant Physiology*, 82: 597-599.
- Tyree MT, Yang S, 1990. Water-storage capacity of Thuja, Tsuga and Acer stems measured by dehydration isotherms. *Planta*, 182: 420-426.
- Ueda M, Shibata E, 2001. Diurnal changes in branch diameter as indicator of water status of Hinoki cypress *Chamaecyparis obtuse*. *Trees - Structure and Function*, 15: 315-318.
- Valancogne C, Granier A, 1991. Intérêt des methods thermiques de mesure du flux de sève pour l'étude du bilan hydrique des savanes. *In: Soil Water Balance in the sudano-Sahelian Zone (Proc. of the Niamey Workshop)*, IAHS.
- Valancogne C, Granier A, 1997. Mesures de flux de sève brute, *In: Soil Water Balance. In the sudano-Sahelian Zone (Eds. MVK Sivakumar, JS Wallace, C Renard, C Giroux)*, IAHS-AISH.
- Valancogne C. 1990. Measure du debit de sève. Application a la determination des besoins en eau des arbres. *In: Le bilan de carbone dans la plante. Séminaire des 17 et 18 avril, 1989*, INRA.
- Van Leeuwen C, Chone X, Tregouat O, Gaudillere JP, 2001. The use of physiological indicators to assess vine water uptake and to manage vineyard irrigation. *The Australian Grapegrower and Winemaker*, 449: 18-24.
- Van Leperen W, Madery H, 1994. A new method to measure plant water uptake and transpiration simultaneously. *J. Exp. Bot.*, 45: 51-60.
- Verbeeck H, Steppe K, Nadezhdina N, Op De Beeck M, Deckmyn G, Meiresonne L, Lemeur R, Cermák J, Ceulemans R, e Janssens IA, 2007. Model analysis of the effects of atmospheric drivers on storage water use in Scots pine. *Biogeosciences*, 4: 657-671.
- Vesala T, Hölttä T, Perämäki M, Nikinmaa E, 2003. Refilling of a hydraulically isolated embolized xylem vessel: model calculations. *Annals of Botany*, 91: 419-428.
- Wang N, Zhang N, Wang M, 2006. Wireless sensors in agriculture and food industry – Recent development and future perspective. *Computers and electronics in agriculture*, 50: 1-14.
- Waring RH, Running SW, 1978. Sapwood water storage: its contribution to transpiration and effect upon water conductance through the stems of old-growth Douglas-fir. *Plant, Cell and Environment*, 1: 131-140.
- Webb EK, Perman GI, Luening R, 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106: 85-100.
- Weisberg S, 1985. *Applied linear regression*. John Wiley & Sons, Inc., USA: 1-78.

- Whitehead D, 1998. Regulation of stomatal conductance and transpiration in forest canopies. *Tree Physiology*, 18: 633-644.
- Whitley R, Zeppel M, Armstrong N, Macinnis-Ng C, Yunusa I, Eamus D, 2008. A modified Jarvis-Stewart model for predicting stand-scale transpiration of an Australian native forest. *Plant and Soil*, 305: 35-47.
- Williams M, Bond BJ, Ryan MG, 2001. Evaluating different soil and plant hydraulic constraints on tree function using a model and sap flow data from ponderosa pine. *Plant, Cell & Environment*, 24: 679-690.
- Wilson KB, Hanson PJ, Mulholland PJ, Baldocchi DD, Wullschleger SD, 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.
- Wolf B, 1996. *Diagnostic techniques for improving crop production*. Haworth Press, New York, USA, 401p.
- Xiloyannis C, Nuzzo V, Dichio B, Celano G, 1997. L'importanza delle caratteristiche dell'apparato radicale e dell'architettura della chioma nella scelta e nella gestione del metodo irriguo per l'actinidia. *Rivista di Frutticoltura*, 5: 31-37.
- Yao C, Moreshet S, Aloni B, 2001. Water relations and hydraulic control of stomatal behaviour in bell pepper plant in partial soil drying. *Plant, Cell & Environment*, 24: 227-235.
- Zweifel R, Häsler R, 2001. Dynamics of water storage in mature subalpine *Picea abies*: temporal and spatial patterns of change in stem radius. *Tree Physiology*, 21: 561-569.
- Zweifel R, Item H, Häsler R, 2000. Stem radius changes and their relation to stored water in stems of young Norway spruce trees. *Trees - Structure and Function*, 15: 50-57.
- Zweifel R, Item H, Häsler R, 2001. Link between diurnal stem radius changes and tree water relations. *Tree Physiology*, 21: 869-877.
- Zweifel R, Steppe K, Sterck FJ, 2007. Stomatal regulation by microclimate and tree water relations: interpreting ecophysiological field data with a hydraulic plant model. *J. Exp. Bot.*, 58: 2113-2131.
- Instituto de Meteorologia (IM). Disponível na www: <URL: <http://www.meteo.pt/pt/>>, acedido em 31-03-2007.
- Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH). Disponível na www: <URL: <http://snirh.pt/>>, acedido em 31-03-2007.
- Air Resources Laboratory. Disponível na www: <URL: <http://www.arl.noaa.gov/>>, acedido em 31-03-2007.

## 9 ANEXOS



ANEXO I – Potencial hídrico

ANEXO II – Algumas estatísticas usadas

ANEXO III – Dados de insolação da região do EDM para o período de 1958 a 1988

ANEXO IV – Secções coradas do tronco de actinidia para a determinação da área condutora

ANEXO V – Funções hidrodinâmicas do solo do pomar de Briteiros

ANEXO VI – Fotos do sistema radicular da planta de actinidia instalada no Lisímetro



## Anexo I – Potencial hídrico

O estado termodinâmico da água é convenientemente expresso em relação ao potencial químico da água pura e a diferença expressa em termos de energia potencial. O potencial químico tem unidades de energia ( $\text{J mol}^{-1}$ ). No entanto, em fisiologia vegetal, é comum exprimir o estado hídrico em termos de potencial hídrico ( $\Psi$ ) utilizando unidades de pressão, obtido dividindo o potencial químico pelo volume parcial molal da água. A água no estado de referência tem potencial nulo. Nos sistemas, o fluxo dá-se das zonas de maior potencial hídrico (menos negativo) para zonas com potencial inferior (mais negativo). Apesar do bar e a atmosfera serem geralmente usados como unidades de pressão, a unidade S.I. apropriada é o Pascal (Pa), pelo que o potencial hídrico deverá ser expresso em Pa ou nos seus múltiplos: kPa e MPa.

Na planta o potencial é geralmente especificado em relação ao volume de água, em termos de pressão. No entanto, pode ser também especificado em relação ao peso como uma altura de água sendo designada de carga hidráulica, conforme apresentado na Tabela A1.

Tabela A1 – Formas de expressar o potencial hídrico.

Forma de expressão	Potencial por unidade de:	Unidades	Símbolo
Pressão	Volume	Pa	$\Psi$
Altura	Peso	m	h

O potencial hídrico verificado nos sistemas é resultado da soma algébrica das diversas componentes que o constituem, como apresentado na Eq. [A1]:

$$\Psi = \Psi_p + \Psi_o + \Psi_g + \Psi_m \quad [A1]$$

onde,

$\Psi_p$  - potencial de pressão ou potencial hidrostático

$\Psi_o$  - potencial osmótico

$\Psi_g$  - potencial gravitacional

$\Psi_m$  - potencial mátrico

Nesta equação,  $\Psi_o$  é negativo porque relativamente à água no estado puro, o potencial hídrico de uma solução é reduzido. O mesmo acontece com  $\Psi_m$ , que se refere às forças de ligação (macromoléculas, paredes celulares, partículas de solo) e por isso também reduz o potencial hídrico. O termo  $\Psi_p$  representa a pressão hidrostática da solução ou potencial de pressão em relação à pressão hidrostática de referência (pressão atmosférica) e pode ser positivo ou negativo. A componente gravitacional ( $\Psi_g$ ) resulta da diferença de energia potencial em relação ao nível de referência arbitrado, sendo positivo acima do nível de referência e negativo abaixo deste. Esta componente é geralmente desprezada mas, como  $\Psi_g$  aumenta em  $0.01 \text{ MPa m}^{-1}$ , esta componente deve ser considerada na análise das relações hídricas dos cobertos vegetais altos.

Nem todos os componentes apresentados na Eq. [A1] actuam da mesma forma e os seus gradientes parciais nem sempre são efectivos para os movimentos de água no sistema. Por exemplo, os gradientes de potencial osmótico necessitam da presença de uma membrana semipermeável para induzir um fluxo (Hillel, 1998).

## Anexo II – Algumas estatísticas usadas

Na análise dos resultados dos diversos modelos usados neste trabalho utilizaram-se algumas estatísticas correntes e algumas específicas da análise de erros de séries de dados.

O erro viés (*BE*, *Bias Error*) mede a tendência do modelo para sobreavaliar ou subavaliar uma variável, sendo definido matematicamente para uma dada variável  $x$ , pela Eq. [A2].

$$BE(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i^p - x_i^o) \quad [A2]$$

onde,

$N$  é o número total de observações/previsões;

$x^p$  e  $x^o$  valor previsto e observação, respectivamente.

Um valor positivo do erro viés indica uma predisposição do modelo em sobreavaliar uma variável particular. Reciprocamente, um valor negativo do erro viés implica uma subavaliação do modelo na avaliação de uma a variável.

A raiz do erro quadrático médio (*RMSE*, *Root Mean Square Error*) é a raiz quadrada da média das diferenças individuais quadráticas entre as previsões e as observações e é definido pela Eq. [A3].

$$RMSE(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i^p - x_i^o)^2} \quad [A3]$$

onde,

$N$  é o número total de observações/previsões;

$x^p$  e  $x^o$  valor previsto e observação, respectivamente.

Esta medida retém as unidades físicas da variável prevista e mede o erro típico da previsão do modelo. Valores grandes do *RMSE* representam grandes erros nos campos previstos, e valores próximos de zero indicam uma boa previsão. Este índice tende a dar maior peso às grandes discrepâncias entre os campos observados e previstos.

O erro médio absoluto (*MAE*, *Mean Absolute Error*) é a média das diferenças dos valores absolutos entre a previsão e a observação de um campo particular e é definido pela Eq. [A4].

$$MAE(x) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_i^p - x_i^o| \quad [A4]$$

onde,

$N$  é o número total de observações/previsões;

$x^p$  e  $x^o$  valor previsto e observação, respectivamente.

Este parâmetro retém as unidades físicas do campo medido e valores elevados de *MAE* representam grandes erros de previsão, enquanto valores próximos de zero representam previsões quase perfeitas. Porém, esta medida estatística não “pesa” os grandes erros como o *RMSE*.



### Anexo III - Dados de insolação da região do EDM para o período de 1958 a 1988

A estação meteorológica de Braga/Posto Agrário não fornece dados de insolação para o período de 1958 a 1988. Desta forma, os dados foram estimados com base nas estações apresentadas na Tabela A2.

Atendendo aos dados disponíveis, consideraram-se os dados de insolação da estação meteorológica de Santo Tirso até 1981. Para o restante período, fez-se a estimativa com base nas estações de Monção/Valina e Viana do Castelo (média das duas estações). Para não introduzir um possível viés na série de insolação a utilizar na caracterização climática da região, fez-se o ajustamento dos dados destas últimas estações em relação à de Santo Tirso. Na figura A1 apresentam-se as regressões obtidas, com os valores totais mensais do período de 1975 a 1981, tendo-se feito a ponderação com base no declive das rectas de regressão linear entre as séries (gráficos a e b), obtendo-se a estimativa do gráfico c.

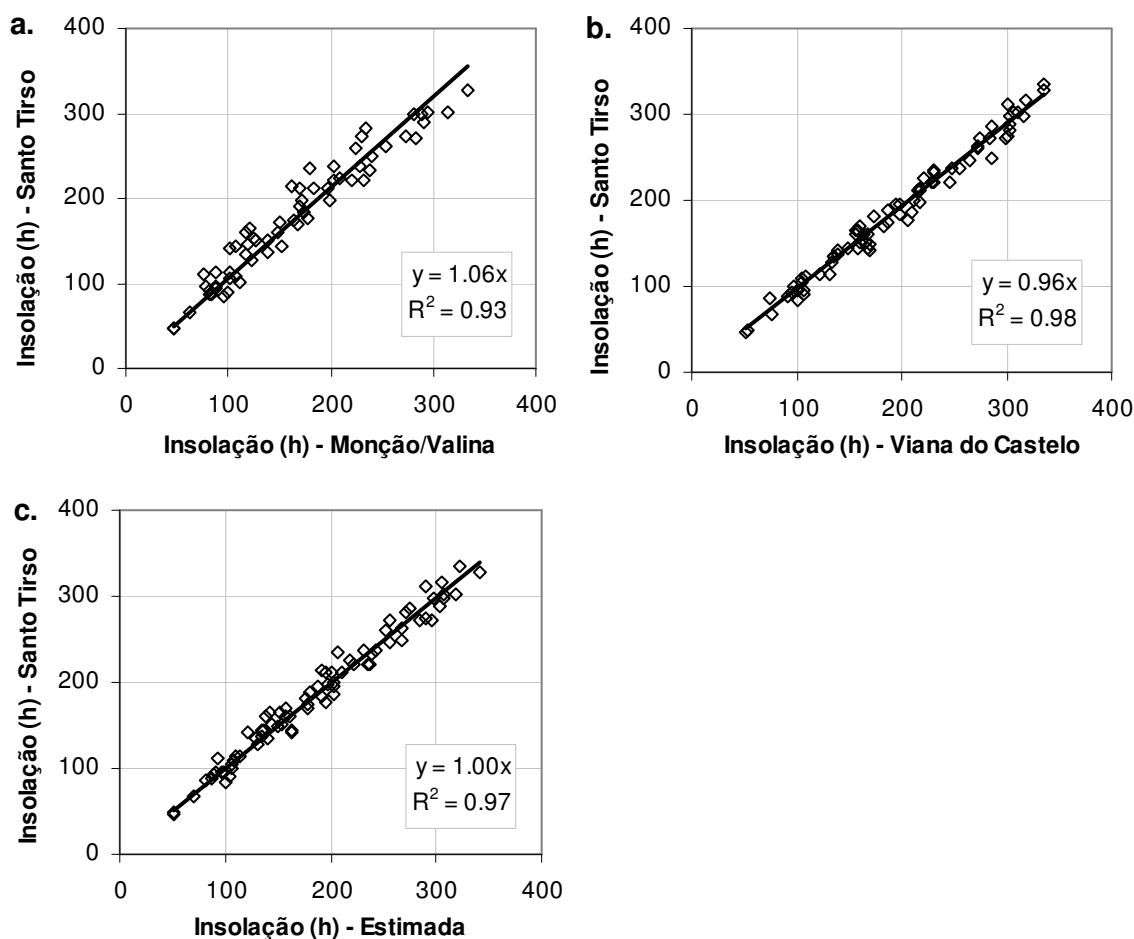


Figura A1 – a. e b. horas de insolação mensal registadas nas estações meteorológicas de Monção/Valina e Viana do Castelo, em relação à registada na estação de Santo Tirso; c. relação entre a insolação estimada com base nas estações de Monção/Valina e Viana do Castelo

(ponderada com os declives das rectas de regressão linear dos gráficos a. e b. e a insolação registada na estação de Santo Tirso; dados mensais do período de 1975 a 1981.

Tabela A2 – Estações meteorológicas da rede do Instituto de Meteorologia usadas na estimativa da insolação da região.

<b>Nome</b>	<b>Latitude (N)</b>	<b>Longitude (W)</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Período disponível</b>
Braga/Posto Agrário	41° 33' N	8° 24' W	190	-
Monção/Valina	42° 04' N	8° 23' W	80	1975 - 1994
Santo Tirso	41° 21' N	8° 28' W	60	1951 - 1981
Viana do Castelo	41° 42' N	8° 48' W	16	1975 - 1994

**Anexo IV – Secções coradas do tronco de actinidia para a determinação da área condutora**

Como a aplicação do método de Granier pressupõe o conhecimento da área condutora efectiva do órgão ao qual é aplicado, em 2002, no âmbito do projecto Agro, procedeu-se à sua determinação através do método destrutivo com aplicação de corantes. Para tal, seleccionaram-se 4 plantas de kiwi num pomar pertencente à estação de Fruticultura e Viticultura de Felgueiras da DRAEDM, com cerca de 20 anos, aproximadamente com a mesma classe de diâmetros. Estas plantas foram cortadas a cerca de 30 cm do solo e mergulhadas de imediato em água destilada. De seguida a cada uma das caixas com água destilada, adicionou-se um dos seguintes corantes: *fast green*, verde de malaquite, safranina e azul de toluidina; com a finalidade de observar a extensão das áreas coradas e ter uma informação qualitativa sobre a mobilidade relativa dos corantes, bem como o comportamento do sistema vascular. Na Figura A2 apresentam-se algumas das secções coradas obtidas. Verificou-se que, com excepção da parte central do borne (e da casca), toda a secção é condutora. No entanto, pela deslocação que os corantes sofreram ao longo do tronco, verifica-se que existe um anel junto à casca que é menos condutor e que a zona central do borne é igualmente pouco condutora.

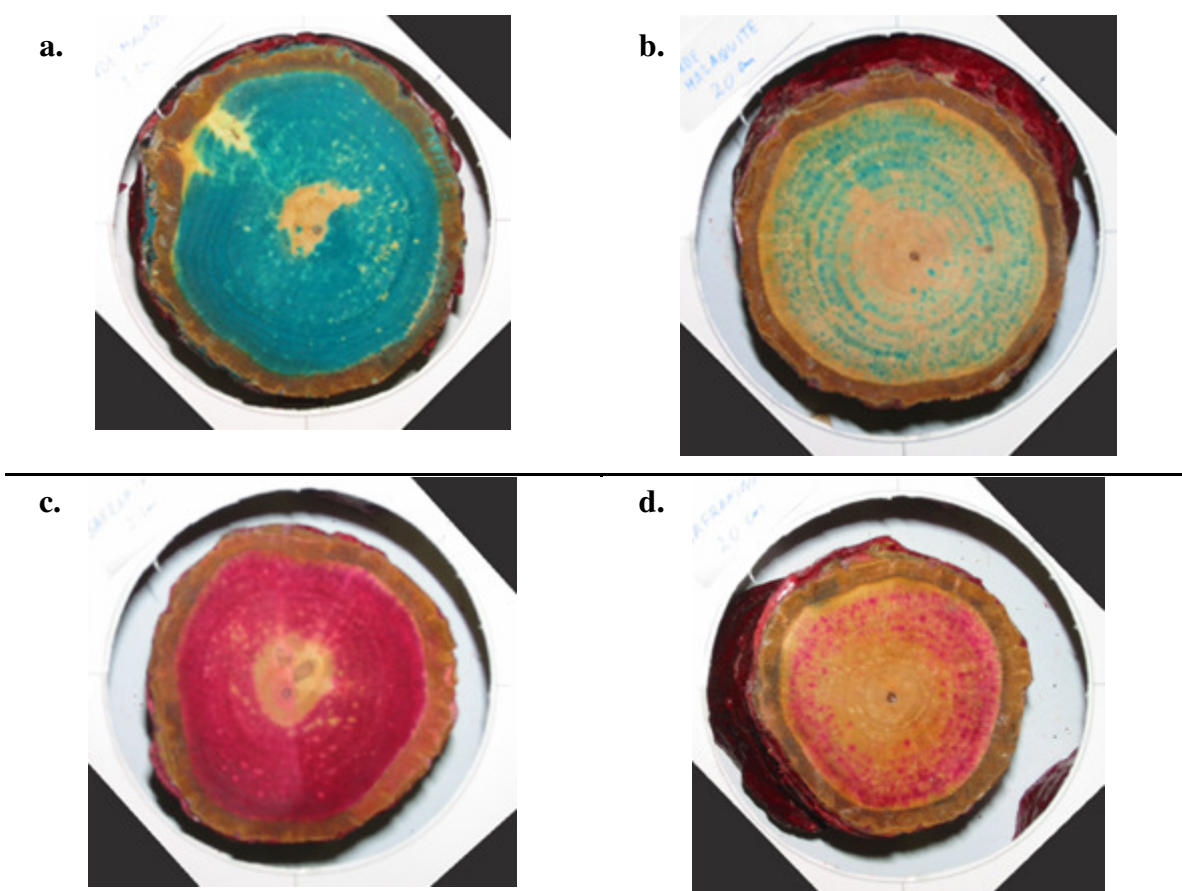


Figura A2 – Secções coradas do tronco de actinidia deliciosa: a. e b. cortes a 1 e 20 cm, respectivamente, do ponto de aplicação de verde malaquite, c. e d. cortes a 1 e 20 cm, respectivamente, do ponto de aplicação de safranina.



## Anexo V – Funções hidrodinâmicas do solo do pomar de Briteiros

Tabela A3 – Parâmetros das funções hidrodinâmicas de Brooks e Corey ajustados.

Parâmetro	Unidades	Valor
Porosidade	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0.386
Teor de água residual	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	0.020
Pressão de entrada de ar	cm	10.0
Parâmetro de distribuição dos poros	-	0.160
Condutividade hidráulica saturada	$\text{cm h}^{-1}$	0.215

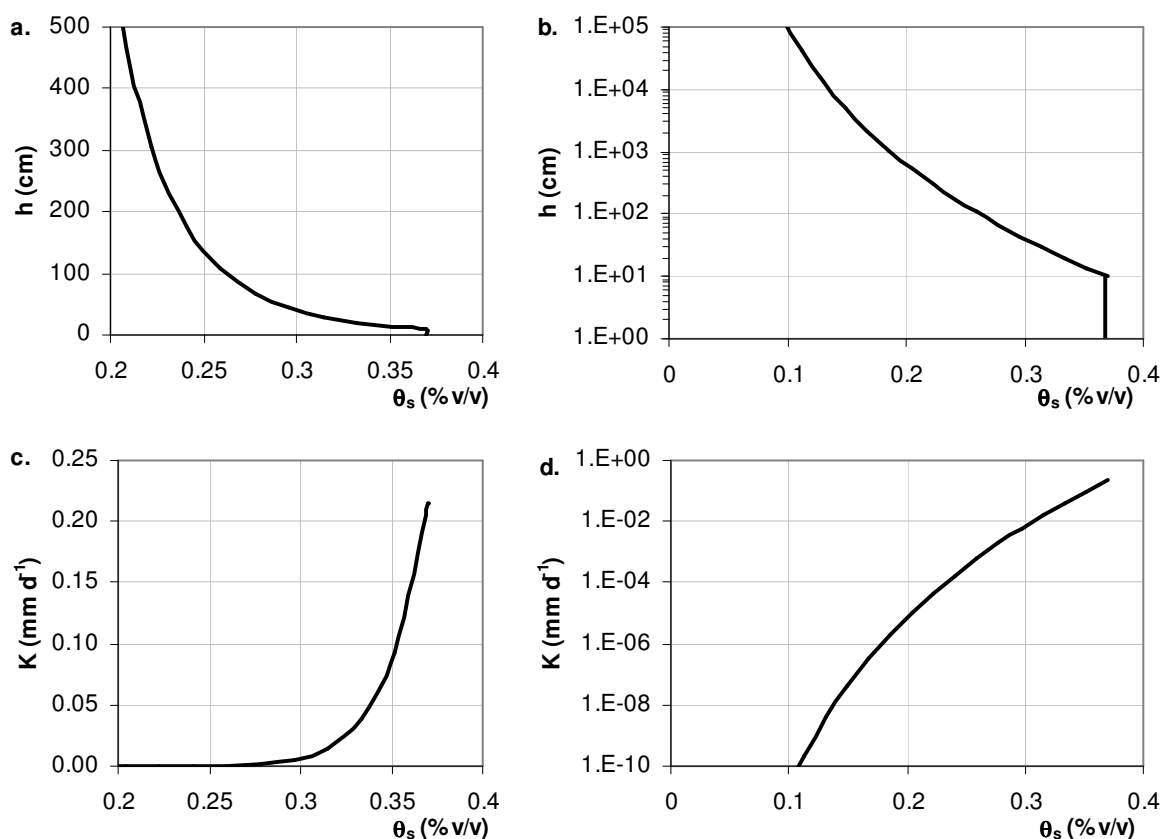


Figura A3 – Funções hidrodinâmicas de Brooks e Corey considerando os parâmetros da Tabela A3: a. curva característica do solo com escala normal até 500 cm de pressão efectiva; b. curva característica do solo com o eixo das ordenadas em escala logarítmica; c. curva da condutividade hidráulica; d. curva da condutividade do solo com o eixo das ordenadas em escala logarítmica.



**Anexo VI - Fotos do sistema radicular da planta de actinidia instalada no lisímetro**

Figura A4 – Imagens do sistema radicular da planta de actinidia instalada no lisímetro, observadas em Dezembro de 2007.

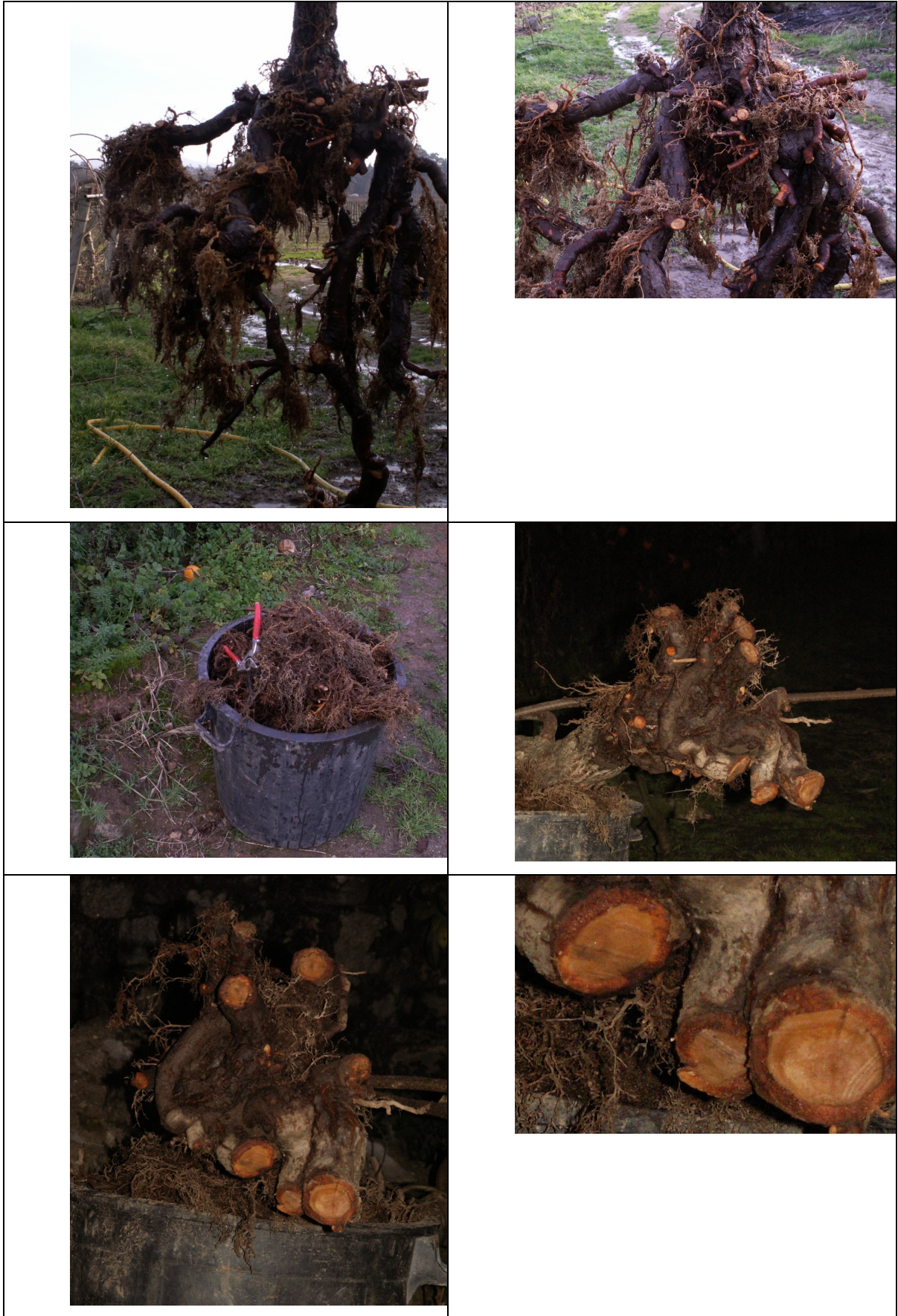


Figura A4 (continuação) – Imagens do sistema radicular da planta de actinidia instalada no lisímetro, observadas em Dezembro de 2007.

Tabela A4 – Caracterização do sistema radicular (raízes principais com ligação na base do tronco), efectuada em Dezembro de 2007.

	Diâmetro (cm)		Área (cm <sup>2</sup> )	
	Exterior	Interior	Exterior	Interior
Raiz 1	4.1	2.8	13.2	6.2
Raiz 2	5.1	3.7	20.4	10.8
Raiz 3	3.7	2.3	10.8	4.2
Raiz 4	3.6	2.3	10.2	4.2
Raiz 5	4.3	3.1	14.5	7.5
Raiz 6	2.7	1.8	5.7	2.5
Raiz 7	4.1	2.7	13.2	5.7
Raiz 8	2.0	1.2	3.1	1.1
Raiz 9	2.8	1.7	6.2	2.3
<b>Sistema radicular</b>			97.3	<b>44.4</b>
<b>Base tronco</b>	9.0	7.6	63.6	<b>45.4</b>

Nota: As raízes apresentadas (1 a 9) correspondem às raízes visíveis na imagem da Figura A4; exterior, medição sobre a casca; interior, medição sem casca.



## 10 AGRADECIMENTOS

Na conclusão deste trabalho gostaria de agradecer a todas as pessoas que, pessoal ou institucionalmente, contribuíram para que a sua realização fosse possível.

Começo por agradecer à minha orientadora, a Professora Maria Isabel Ferreira, que com amizade e compreensão me transmitiu as bases e o conhecimento para a prossecução dos objectivos desta tese. Agradeço à Doutora Teresa do Paço, ao Doutor José Silvestre, ao Eng. Nuno Conceição, ao Eng.º Adriano Leovigildo e ao Sr. António Amante, o apoio e disponibilidade.

Para a realização dos trabalhos experimentais contei com a preciosa disponibilidade e colaboração das seguintes entidades:

- Divisão de Vitivinicultura e Fruticultura da DRAEDM, em especial da Eng.ª Anabela Veloso, do Eng.º Manuel Oliveira, do Eng.º Bernardino Mota e dos funcionários de campo.
- Empresa KiwiGreenSun, na pessoa do Sr. Vítor Araújo, a quem agradeço a disponibilidade sempre demonstrada para o fornecimento das condições para a realização dos ensaios de campo nos seus pomares de actinidia.

Por último, quero expressar o meu agradecimento aos meus pais e irmãos que durante estes últimos anos me ajudaram e incentivaram para a conclusão deste trabalho.