

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II**

*DOTTORATO DI RICERCA IN*  
**VALORIZZAZIONE E GESTIONE DELLE RISORSE AGRO-FORESTALI**  
**XXIV CICLO**

*INDIRIZZO*  
**ANALISI E MODELLISTICA DEI SISTEMI AGRARI E FORESTALI**

**Anna Staiano**

**Individuazione di condizioni di stress da carenza idrica**  
**in *Vitis vinifera* L.**  
**con l'impiego di modellistica agro-idrologica**

Tesi per il conseguimento del titolo di  
Dottore di Ricerca

**Coordinatore e Tutor:**  
**Ch.mo Prof. Ing. Guido D'Urso**

**Portici, Novembre 2011**

*Capolino fa il sole  
con le sue ombre  
allungate sul declino  
di una collina  
dove la luce  
accende i colori  
di un vigneto dai tralci  
protesi al cielo,  
brezza, solleva  
pampini dalle viti  
mostrando il frutto  
al sole nascente  
pittore silente  
di un quadro  
"poesia della natura".*

*Rumori,  
spezzano l'emozione!  
Vocio di uomini.*

*IL VIGNETO  
di  
F.S. GANCIO*

---

**Abstract**

---

Negli ultimi anni si è assistito ad un notevole progresso nella conoscenza dei processi evapotraspirativi delle colture. Questi richiedono ulteriori approfondimenti per quanto riguarda le colture arboree a causa della complessità degli apparati radicali e della copertura del suolo non uniforme. Lo scopo del lavoro è quello di valutare il fabbisogno idrico della vite in ambiente mediterraneo per meglio comprendere le risposte della pianta in condizioni di stress. Lo studio, condotto nell'ambito del Progetto MIUR 2008 "Valutazione degli scambi di massa e di energia per la gestione irrigua di colture arboree in ambiente mediterraneo" (Coordinatore: G.D'Urso), si è avvalso di tecniche diverse per valutare l'evapotraspirazione e lo stress: misure di flusso xilematico (SAP-FLOW), misure micrometeorologiche (Sonic-Eddy-Covariance), modelli di bilancio idrico (SWAP), tecniche di telerilevamento per la stima dei parametri vegetazionali (LAI, albedo, copertura), modelli di surface energy balance (TSEB) e misure dirette della temperatura radiometrica per la valutazione dello stress. Il caso studio ha consentito di dimostrare che i modelli di simulazione del bilancio idrologico, nati per colture erbacee, possono essere utilizzati anche per le colture arboree. La funzione di attingimento radicale è in grado di descrivere con sufficiente precisione il comportamento fisiologico della pianta, consentendo di valutare l'insorgenza di condizioni di stress idrico. Ai fini di questa valutazione sono stati considerati il rapporto tra il valore reale e quello potenziale della traspirazione ( $T/T_p$ ) e dell'evapotraspirazione ( $ET/ET_p$ ). I modelli energetici di tipo two-source risultano più appropriati in presenza di basse coperture del suolo, separando il termine evaporativo da quello traspirativo. L'uso delle diverse tecniche confermano l'insorgenza di uno stress moderato in prossimità della raccolta. Tuttavia in questo studio lo stress idrico a cui risulta essere sottoposta la vite non è tale da giustificare l'irrigazione, nonostante ne tragga benefici in condizioni di aridità. Per un'applicazione pratica dei modelli di simulazione del bilancio idrologico ed energetico come supporto decisionale è necessario continuare lo studio per la loro validazione e taratura.

Parole chiave: stress idrico, *Vitis vinifera* L., SWAP, TSEB.

---



---

**SOMMARIO**


---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Indice delle figure</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>Indice dei grafici</b> .....   | <b>5</b>  |
| <b>Indice delle tabelle</b> .....   | <b>7</b>  |
| <b>Lista dei simboli</b> .....  | <b>8</b>  |
| <b>SEZIONE I INTRODUZIONE</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>1 Introduzione</b> .....   | <b>13</b> |
| 1.1 Il cambiamento climatico .....  | 13        |
| 1.2 Il settore vitivinicolo in Italia e in Sicilia .....                                      | 13        |
| 1.3 Scelta dell'area studio e problematiche relative alla stima dell'evapotraspirazione ..... | 14        |
| 1.4 Scopo della tesi .....  | 15        |
| 1.5 Outline da inserire alla fine descrizione capitolo per capitolo .....                     | 16        |
| <b>SEZIONE II STATO DELL'ARTE</b> .....   | <b>17</b> |
| <b>2 Lo stress da deficit idrico nella <i>Vitis vinifera</i> L.</b> .....                     | <b>18</b> |
| 2.1 L'apparato radicale .....   | 18        |
| 2.2 Il clima .....  | 19        |
| 2.3 L'uso dell'acqua nella pianta e il deficit idrico .....                                   | 19        |
| 2.4 L'irrigazione.....  | 20        |
| <b>3 Gli indici di stress</b> .....   | <b>22</b> |
| <b>4 Il bilancio idrico</b> .....   | <b>24</b> |
| 4.1 Il continuum suolo-pianta-atmosfera .....   | 24        |
| 4.2 Approcci modellistici per il bilancio idrico.....   | 25        |
| 4.3 Il termine evapotraspirativo del bilancio idrico.....                                     | 26        |
| 4.3.1 Metodi per il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento .....                      | 27        |
| 4.4 Struttura del modello SWAP.....   | 29        |
| <b>5 Il bilancio energetico</b> .....   | <b>32</b> |
| 5.1 La radiazione netta .....   | 33        |
| 5.2 Il flusso di calore nel suolo .....   | 34        |
| 5.3 I flussi di calore sensibile e calore latente .....                                       | 34        |

---

|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 5.3.1   | Approccio big-leaf per la stima di $\lambda E$ .....                 | 35        |
| 5.3.2   | Approccio two-source per la stima di $\lambda E$ .....               | 36        |
| <b>SEZIONE III MATERIALI E METODI.....</b>                |  | <b>38</b> |
| <b>6</b>  | <b>L'area studio.....</b>  | <b>39</b> |
| 6.1   | Il vitigno: scheda descrittiva .....                                 | 40        |
| 6.2   | Caratterizzazione climatica dell'area .....                          | 41        |
| 6.3   | Determinazione delle proprietà idrauliche del suolo.....             | 42        |
| <b>7</b>  | <b>L'esperimento .....</b>   | <b>44</b> |
| <b>8</b>  | <b>Approccio fisico delle tecniche di misurazione .....</b>          | <b>48</b> |
| 8.1   | Teoria delle misure micro-meteorologiche .....                       | 48        |
| 8.2   | Teoria delle misure di LAI.....                                      | 51        |
| 8.3   | Teoria delle misure di TDR.....                                      | 51        |
| 8.4   | Teoria delle misure di SAP-FLOW.....                                 | 52        |
| 8.5   | Teoria delle misure spettroradiometriche e termometriche.....        | 53        |
| <b>9</b>  | <b>Dati acquisiti .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>SEZIONE IV APPLICAZIONI E RISULTATI.....</b>           |  | <b>62</b> |
| <b>10</b>   | <b>Implementazione dei modelli, risultati e discussione.....</b>     | <b>63</b> |
| 10.1  | Implementazione del modello di bilancio idrico e risultati .....     | 63        |
| 10.2  | Implementazione del modello di bilancio energetico e risultati ..... | 70        |
| <b>11</b>   | <b>Calcolo degli indici di stress.....</b>                           | <b>74</b> |
| <b>12</b>   | <b>Conclusioni.....</b>  | <b>78</b> |
| <b>Appendice A – Ricostruzione dei dati mancanti.....</b> |  | <b>80</b> |
| <b>Bibliografia .....</b>                                 |  | <b>82</b> |

---

**INDICE DELLE FIGURE**


---

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Descrizione del continuum suolo-pianta-atmosfera attraverso l'analogia con un circuito elettrico tratto da <i>Mugnai</i> (2004). Dove $\psi_s$ = potenziale idrico del suolo, $\psi_r$ = potenziale idrico radicale, $\psi_x$ = potenziale idrico xilematico, $\psi_l$ = potenziale idrico fogliare, $\psi_{aria}$ = potenziale idrico dell'atmosfera, $R_s$ = resistenza suolo, $R_r$ = resistenza radicale, $R_{st}$ = resistenza del fusto, $R_l$ = resistenza fogliare, E = ambiente esterno. ....   | 24 |
| Figura 2 - Schematizzazione dei processi idrologici incorporati in SWAP (tratto da <i>Feddes et al.</i> , 2004).....  | 29 |
| Figura 3 - Rappresentazione grafica della funzione di attingimento radicale in condizioni di stress idrico proposta da <i>Feddes</i> (2004); in questa figura il potenziale è indicato con la lettera h: $h_1$ è il potenziale a cui le radici cominciano ad estrarre l'acqua dal suolo, $h_2$ è il potenziale a cui le radici estraggono l'acqua al tasso possibile massimo, $h_{3h}$ è il valore di potenziale a cui le radici non possono più estrarre l'acqua al tasso massimo, $h_{3l}$ è uguale a $h_{3h}$ , ma per un tasso potenziale della traspirazione minore e $h_4$ è il valore di potenziale a cui non avviene più l'attingimento. .... | 31 |
| Figura 4 - Schematizzazione del bilancio energetico diurno (a sinistra) e notturno (a destra) (da <i>Burba e Anderson</i> , 2005). ....   | 32 |
| Figura 5 - Schematizzazioni suolo-canopy nella modellazione dei flussi energetici: a) schema "single source", b) schema "two source" in parallelo; c) schema "two source" in serie (da <i>Agnese et al.</i> , 2008).....  | 35 |
| Figura 6 - Localizzazione geografica dell'azienda (a sinistra) e del campo sperimentale (a destra). ....  | 39 |
| Figura 7 - Dettagli del campo sperimentale. ....  | 39 |
| Figura 8 - Modello della distribuzione radicale utilizzato (a sinistra), distribuzione delle radici in Hydrus (al centro) e distribuzione del contenuto idrico iniziale (a destra).....   | 43 |
| Figura 9 - Stazione micro-meteorologica SEC (a sinistra) e termometro a infrarosso (a destra). ....   | 45 |
| Figura 10 - Schema di installazione della strumentazione per la misura del flusso di calore nel suolo. ....   | 45 |
| Figura 11 - Schema di installazione delle sonde TDR (a sinistra) e SAP-FLOW (a destra). ....  | 46 |
| Figura 12 - Schema utilizzato per effettuare una singola misura di LAI (Indice di Area Fogliare). Le linee in verde sono i filari, i cerchi grandi sono le misure di riferimento sopra chioma, mentre i cerchi piccoli sono le misure sottochioma; la posizione del sole è sempre alle spalle.....  | 46 |
| Figura 13 - Installazione della termocamera, dello spettroradiometro e di un ulteriore termometro. ....   | 47 |
| Figura 14 - Il flusso dell'aria nel sistema (da <i>Burba e Anderson</i> , 2005).....  | 48 |
| Figura 15 - Schematizzazione del SEC in un unico punto. "Eddy 1" si sposta in basso grazie al movimento del flusso di aria (freccia bianca) con una velocità $w_1$ , mentre "eddy 2" si muove verso l'alto grazie al flusso di aria (freccia gialla) con una velocità $w_2$ . ....  | 49 |
| Figura 16 - Strumentazione LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. ....   | 51 |
| Figura 17 - Schema di funzionamento del SAP-FLOW.....   | 53 |

Figura 18 - Elaborazione eseguita sull'immagine del 10/08/2010 ora 12.40 ..... 59

---

**INDICE DEI GRAFICI**


---

|   |    |
|---|----|
| Grafico 1 - Superfici investite a uva da vino (a sinistra) e produzione di uva da vino (a destra) in Italia (ISTAT, 2009). .....  | 14 |
| Grafico 2 - Andamento della temperatura dal 05/05/2010 al 11/08/2010 nel campo sperimentale.....  | 41 |
| Grafico 3 - Andamento dell'umidità relativa dal 05/05/2010 al 11/08/2010 nel campo sperimentale. ....   | 41 |
| Grafico 4 - Andamento della velocità del vento dal 05/05/2010 al 20/06/2010 nel campo sperimentale (queste misure non sono presenti per tutto il periodo a causa di un guasto della strumentazione).....                              | 42 |
| Grafico 5 - Andamento delle piogge dal 05/05/2010 al 11/08/2010 nel campo sperimentale.....   | 42 |
| Grafico 6 - Andamento giornaliero dei flussi di radiazione netta, calore sensibile, calore latente e calore nel suolo (a sinistra) e chiusura del bilancio energetico (a destra).....   | 54 |
| Grafico 7 - Andamento della temperatura del suolo misurata attraverso i sensori utilizzati per la determinazione del flusso di calore. ....   | 55 |
| Grafico 8 - Andamento del LAI durante il periodo dell'acquisizione delle misurazioni. ....  | 55 |
| Grafico 9 - Andamento del flusso xilematico giornaliero, aggregato a partire dai dati orari. ....   | 56 |
| Grafico 10 - Contenuti idrici dei primi 10 cm dei profili esaminati. ....   | 56 |
| Grafico 11 - Contenuti idrici dei 4 profili di suolo.....   | 57 |
| Grafico 12 - Andamento delle temperature radiometriche della superficie del suolo e delle foglie.....   | 58 |
| Grafico 13 - Relazione $T_p$ -LAI in funzione di $k_{gr}$ pari a 0.39, 0.50, 0.80 e 1.25. La linea verticale tratteggiata rappresenta il valore di LAI pari a 0.70.....   | 64 |
| Grafico 14 - Andamento a scala oraria di ET, E e T simulate con SWP, considerando $k_{gr}=0.39, 0.50, 0.80$ e 1.25 e confronto con $ET_{sec}$ ; nel grafico è mostrato il dettaglio del periodo dal 28 maggio al 6 giugno 2010.....   | 66 |
| Grafico 15 - Andamento a scala oraria di ET, E e T simulate con SWP, considerando $k_{gr}=0.39, 0.50, 0.80$ e 1.25 e confronto con $ET_{sec}$ ; nel grafico è mostrato il dettaglio del periodo dal 31 luglio all'11 agosto 2010..... | 67 |
| Grafico 16 – Andamento degli scarti tra la curva di evapotraspirazione misurata con la stazione miro-meteorologica ( $ET_{sec}$ ) e quella simulata ( $ET_{swap}$ ) con i diversi valori di $k_{gr}$ . ....                           | 68 |
| Grafico 17 – Andamento degli scarti tra la curva di traspirazione misurata con la tecnica del SAP-FLOW ( $T_{sap}$ ) e quella simulata ( $T_{swap}$ ) con i diversi valori di $k_{gr}$ . ....   | 69 |
| Grafico 18 - Correlazione tra la traspirazione simulata con TSEB che implementa la $T_{rad}$ della termocamera ( $T_{tseb}$ ) e la traspirazione simulata con TSEB che implementa la $T_{rad}$ dei termometri ( $T_{tseb-IR}$ ). .... | 71 |
| Grafico 19 - Risultati dell'implementazione del TSEB per il 10 e 11 agosto 2010.....  | 71 |
| Grafico 20 - Risultati dell'implementazione del TSEB con temperatura IR dai termometri per il periodo dal 29 maggio al 4 giugno 2010.....   | 72 |



---

|  |    |
|--|----|
| Grafico 21 - Risultati dell'implementazione del TSEB con temperatura IR dai termometri per il periodo dal 5 all'11 agosto 2010. ....   | 72 |
| Grafico 22 - Correlazioni tra i flussi misurati dalla stazione SEC e quelli simulati con TSEB.....   | 73 |
| Grafico 23 – Andamento dell'indice di stress $ET_e/ET_p$ a partire dalla simulazione di SWAP con diversi valori di $k_{gr}$ per il periodo dal 31 luglio all'11 agosto 2010..... | 75 |
| Grafico 24 – Andamento dell'indice di stress $T_e/T_p$ a partire dalla simulazione di SWAP con diversi valori di $k_{gr}$ per il periodo dal 31 luglio all'11 agosto 2010.....   | 76 |
| Grafico 25 – Andamento dell'indice CSWI per il periodo dal 31 luglio all'11 agosto 2010. ....  | 77 |
| Grafico 26 – Andamenti della temperatura della canopy, dell'aria e della differenze tra queste due per il periodo dal 31 luglio all'11 agosto 2010.....                          | 77 |
| Grafico 27 - Studio di correlazione tra la stazione meteo SIAS e la stazione micro-meteorologica SIAS (a 10 e a 2 m di altezza), diviso per fasce orarie. ....                   | 80 |
| Grafico 28 – Correlazione tra le velocità del vento scalate da 10 a 2 m e le velocità misurate dalla stazione micro-meteorologica. ....  | 81 |

---

**INDICE DELLE TABELLE**


---

|  |    |
|--|----|
| Tabella 1- Dati richiesti dai modelli SWAP e TSEB. ....  | 44 |
| Tabella 2 - Gli errori riscontrabili nelle misure di SEC (da <i>Burba e Anderson, 2005</i> ). ....   | 50 |
| Tabella 3 - Misure di LAI eseguite in campo. ....  | 55 |
| Tabella 4 - Parametri del suolo ottenuti tramite Inverse solution. ....  | 57 |
| Tabella 5 - Specifiche delle bande costituenti le immagini acquisite in data 10-11/08/2010. ....   | 59 |
| Tabella 6 – Dettaglio dei risultati dalla procedura di overlay tra l’immagine classificata e la banda termica. ....  | 60 |
| Tabella 7 - Temperature medie delle singole componenti delle immagini. ....  | 61 |
| Tabella 8 - Potenziali critici per la Vitis vinifera. ....   | 64 |
| Tabella 9 - Valori di RMSE e delle medie calcolati sugli scarti tra i valori di evapotraspirazione misurati dalla stazione micro-meteorologica ( $ET_{sec}$ ) e di evapotraspirazione simulata ( $ET_{swap}$ ) con i diversi $k_{gr}$ . ....   | 68 |
| Tabella 10 - Valori di RMSE e delle medie calcolati sugli scarti tra i valori di traspirazione misurati dalla stazione micro-meteorologica ( $T_{sap}$ ) e di traspirazione simulata ( $T_{swap}$ ) con i diversi $k_{gr}$ . ....  | 69 |
| Tabella 11 - Dati in input nel modello TSEB. ....  | 70 |
| Tabella 12 - Valori di RMSE e delle medie calcolati sugli scarti tra i valori di traspirazione misurati con SAP-FLOW ( $T_{sap}$ ) e quelli simulati con il modello TSEB ( $T_{tseb-IR}$ ), che utilizza le temperature radiometriche dei termometri IR; quindi sono stati calcolati anche per gli scarti tra i valori di traspirazione ottenuti dal modello TSEB e quelli ottenuti dalle simulazioni precedenti effettuate con SWAP. .... | 72 |

---

**LISTA DEI SIMBOLI**


---

| Simbolo     | Unità                                     | Descrizione  |
|-------------|---|--|
| $c$         | $[m\ s^{-1}]$                             | Velocità della luce nel vuoto  |
| $c_p$       | $[kJkg^{-1}°C^{-1}]$                      | Calore specifico dell'aria a pressione costante  |
| $C(\psi)$   | $[Pa^{-1}]$                               | Capacità idrica differenziale del mezzo poroso   |
| $C_s$       | $[Jkg^{-1}°K^{-1}]$                       | Calore specifico del suolo   |
| $d_0$       | $[m]$                                     | Piano zero del vento   |
| $e_a$       | $[Pa]$                                    | Pressione di vapore attuale dell'aria  |
| $e_s$       | $[Pa]$                                    | Pressione di vapore saturo dell'aria   |
| $EA$        | $[mm\ d^{-1},\ mm\ h^{-1}]$               | Evaporazione da evaporimetro di classe A   |
| $E_e$       | $[mm]$                                    | Evaporazione effettiva dal suolo   |
| $E_p$       | $[mm\ d^{-1},\ mm\ h^{-1}]$               | Evaporazione potenziale  |
| $E_p'$      | $[[mm\ d^{-1},\ mm\ h^{-1}]$              | Aliquota dell'evapotraspirazione di riferimento che contribuisce al processo evaporativo dal suolo |
| $ET_0$      | $[mm\ d^{-1},\ mm\ h^{-1}]$               | Evapotraspirazione di riferimento  |
| $ET_e$      | $[mm\ d^{-1},\ mm\ h^{-1}]$               | Evapotraspirazione attuale   |
| $ET_p$      | $[mm\ d^{-1},\ mm\ h^{-1}]$               | Evapotraspirazione potenziale  |
| $f_c$       | %   | Frazione di suolo coperta dalla vegetazione  |
| $G$ o $G_0$ | $[MJ\ m^{-2}giorno^{-1}]$ o $[W\ m^{-2}]$ | Flusso di calore nel suolo   |
| $h$         | $[cm]$                                    | Potenziale idrico del suolo (utilizzato in alternativa a $\psi$ )                                  |
| $H$         | $[MJ\ m^{-2}giorno^{-1}]$ o $[W\ m^{-2}]$ | Flusso di calore sensibile   |
| $H_c$       | $[MJ\ m^{-2}giorno^{-1}]$ o $[W\ m^{-2}]$ | Flusso di calore sensibile per la canopy   |
| $H_s$       | $[MJ\ m^{-2}giorno^{-1}]$ o $[W\ m^{-2}]$ | Flusso di calore sensibile per il suolo  |
| $I_e$       | $[mm]$                                    | Irrigazione efficace   |
| $k_{gr}$    | $[-]$                                     | Coefficiente di estinzione della radiazione  |
| $k_v$       | $[-]$                                     | Costante di von Karman   |
| $K$         | $[cm\ d^{-1}]$                            | Conducibilità idrica insatura  |
| $K_c$       | $[-]$                                     | Coefficiente colturale   |
| $K_p$       | $[-]$                                     | Coefficiente di correzione per l' evaporimetro di classe A   |

---

| Simbolo         | Unità   | Descrizione  |
|-----------------|---|--|
| $K_{sat}$       | [cm d <sup>-1</sup> ]   | Conducibilità idrica saturata  |
|                 |   | Aliquota del flusso evapotraspirativo della coltura di riferimento       |
| $K_{soil}$      | [-]   | che contribuisce al processo evaporativo dal suolo                       |
| $l_{root}(z_i)$ | [cm cm <sup>-3</sup> ]  | Lunghezza per unità di volume delle radici alla profondità z             |
| L               | [m]   | Lunghezza della linea di trasmissione del TDR.                           |
| LAI             | [-]   | Indice di area fogliare (Leaf Area Index)                                |
| m               | [-]   | Parametro di forma della curva di ritenzione idrica                      |
| M               | [Wm <sup>-2</sup> ]   | Emittanza totale   |
| n               | [-]   | Parametro di forma della curva di ritenzione idrica                      |
| $P_e$           | [mm]  | Pioggia efficace   |
| $q_w$           | [cm d <sup>-1</sup> ],  | Densità di flusso idrico   |
|                 |   | Resistenza aerodinamica fra la superficie e l'altezza di riferimento.    |
| $r_a$           | [s m <sup>-1</sup> ]  |  |
| $r_c$           | [s m <sup>-1</sup> ]  | Resistenza della canopy  |
| $r_{cp}$        | [s m <sup>-1</sup> ]  | Resistenza canopy in condizione di traspirazione potenziale              |
| $r_s$           | [s m <sup>-1</sup> ]  | Resistenza stomatica   |
|                 |   | Resistenza al flusso di calore dello strato limite al di sopra del suolo |
| $r_s^*$         | [s m <sup>-1</sup> ]  |  |
| $r_{ss}$        | [s m <sup>-1</sup> ]  | Resistenza del suolo al flusso di vapore                                 |
| $r_x$           | [s m <sup>-1</sup> ]  | Resistenza dello strato limite della canopy                              |
| RH              | %   | Umidità relativa   |
| $R_{sw}$        | [MJ m <sup>-2</sup> giorno <sup>-1</sup> ] o [W m <sup>-2</sup> ] | Radiazione solare a onde corte   |
| $R_{lw}$        | [MJ m <sup>-2</sup> giorno <sup>-1</sup> ] o [W m <sup>-2</sup> ] | Radiazione solare a onde lunghe  |
| $R_n$           | [MJ m <sup>-2</sup> giorno <sup>-1</sup> ] o [W m <sup>-2</sup> ] | Radiazione netta   |
| $R_{n,c}$       | [MJ m <sup>-2</sup> giorno <sup>-1</sup> ] o [W m <sup>-2</sup> ] | Radiazione netta al suolo  |
| $R_{n,s}$       | [MJ m <sup>-2</sup> giorno <sup>-1</sup> ] o [W m <sup>-2</sup> ] | Radiazione netta nella canopy  |
| $S_a$           | [d <sup>-1</sup> ]  | Attingimento radicale effettivo  |
|                 |   | Velocità di estrazione dell'acqua da parte delle radici delle piante     |
| $S_a(\psi)$     | [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ]               |  |
| $S_e$           | [-]   | Grado di saturazione   |
| $S_p$           | [d <sup>-1</sup> ]  | Attingimento radicale potenziale   |

| Simbolo                         | Unità                                      | Descrizione  |
|---------------------------------|--|--|
| t                               | [s]  | Tempo  |
| T <sub>0</sub>                  | [K; °C]                                    | Temperatura in corrispondenza del valore e <sub>s</sub>                        |
| T <sub>a</sub>                  | [K; °C]                                    | Temperatura dell'aria  |
| T <sub>c</sub>                  | [K; °C]                                    | Temperatura della canopy   |
| T <sub>d</sub>                  | [K; °C]                                    | Temperatura della suolo alla profondità Δz                                     |
| T <sub>e</sub>                  | [mm d <sup>-1</sup> , mm h <sup>-1</sup> ] | Traspirazione attuale  |
| T <sub>p</sub>                  | [mm d <sup>-1</sup> , mm h <sup>-1</sup> ] | Traspirazione potenziale   |
| T <sub>RAD</sub>                | [K; °C]                                    | Temperatura radiometrica   |
| T <sub>s</sub>                  | [K; °C]                                    | Temperatura della suolo in superficie  |
| T <sub>v</sub>                  | [K; °C]                                    | Temperatura fogliare   |
| u                               | [m s <sup>-1</sup> ]                       | Componente del vento lungo l'asse x  |
| u*                              | [m s <sup>-1</sup> ]                       | Velocità del vento all'altezza z <sub>T</sub>                                  |
| U <sub>2</sub>                  | [m s <sup>-1</sup> ]                       | Velocità del vento rilevata a 2 m dal suolo                                    |
| v                               | [m s <sup>-1</sup> ]                       | Componente del vento lungo l'asse y  |
| w                               | [m s <sup>-1</sup> ]                       | Componente del vento lungo l'asse z  |
| z                               | [m]  | Coordinata verticale   |
| z <sub>0h</sub>                 | [m]  | Lunghezza di rugosità della superficie   |
| z <sub>i</sub> e z <sub>r</sub> | [m]  | Spessore dello strato di suolo occupato dalle radici                           |
| z <sub>T</sub>                  | [m]  | Altezza a cui viene misurata la temperatura dell'aria e l'umidità              |
| Δ                               | [kPa °C <sup>-1</sup> ]                    | Pendenza della curva di pressione di vapore saturo - temperatura               |
| α                               | [-]  | Albedo   |
| α*                              | [-]  | Coefficiente legato al quantitativo di calore applicato al sensore di SAP-FLOW |
| α <sub>r</sub>                  | [cm <sup>-1</sup> ]                        | Parametro di forma della curva di ritenzione idrica                            |
| α <sub>rs</sub>                 | [-]  | Coefficienti di riduzione dovuto allo stress salino                            |
| α <sub>rw</sub>                 | [-]  | Coefficienti di riduzione dovuto allo stress idrico                            |
| β*                              | [-]  | Coefficiente legato al quantitativo di calore applicato al sensore di SAP-FLOW |
| γ                               | [kPa °C <sup>-1</sup> ]                    | Costante psicrometrica   |
| ΔW                              | [mm]                                       | Variatione del contenuto d'acqua nel volume di suolo occupato dalle radici     |

| Simbolo         | Unità   | Descrizione  |
|-----------------|---|--|
| $\Delta z$      | [m]   | Profondità del suolo   |
| $\varepsilon$   | [-]   | Emissività   |
| $\varepsilon_0$ | [-]   | Emissività della superficie  |
| $\varepsilon_a$ | [-]   | Permittività dielettrica apparente del mezzo   |
| $\varepsilon'$  | [-]   | Emissività apparente dell'atmosfera  |
| $\theta$        | [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]                               | Contenuto idrico   |
| $\theta_r$      | [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]                               | Contenuto idrico residuo   |
| $\theta_s$      | [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]                               | Contenuto idrico a saturazione   |
| $\lambda$       | [MJkg <sup>-1</sup> a 20°C]                                       | Calore latente di vaporizzazione   |
| $\lambda E$     | [MJ m <sup>-2</sup> giorno <sup>-1</sup> ] o [W m <sup>-2</sup> ] | Flusso di calore latente   |
| $\lambda E_c$   | [MJ m <sup>-2</sup> giorno <sup>-1</sup> ] o [W m <sup>-2</sup> ] | Flusso di calore latente per la canopy   |
| $\lambda E_s$   | [MJ m <sup>-2</sup> giorno <sup>-1</sup> ] o [W m <sup>-2</sup> ] | Flusso di calore latente per il suolo  |
| $\lambda_g$     | [W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]                              | Conduttività termica del suolo   |
| $\lambda_M$     | [-]   | Parametro di forma della curva di conducibilità idrica insatura  |
| $\mu_r$         | [-]   | permeabilità magnetica relativa  |
| $v$             | [mm]  | Flusso idrico (percolazione profonda) che attraversa il limite inferiore del volume di suolo considerato |
| $\rho_a$        | [kg m <sup>-3</sup> ],  | Densità atmosferica  |
| $\rho_s$        | [kg m <sup>-3</sup> ],  | Densità del suolo  |
| $\sigma$        | [W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> ]                              | Costante di Stefan-Boltzman  |
| $\Phi$          | [W m <sup>-2</sup> ]  | Radiazione trasmessa al suolo attraverso gli strati di foglie  |
| $\Phi_0$        | [W m <sup>-2</sup> ]  | Radiazione incidente   |
| $\psi$          | [cm]  | Potenziale idrico del suolo  |
| $\Psi_h$        | [-]   | Funzione di stabilità nel calcolo di $r_a$   |
| $\psi_o$        | [MPa]   | Potenziale osmotico cellulare  |
| $\psi_p$        | [MPa]   | Potenziale di turgore cellulare  |
| $\psi_s$        | [cm]  | Potenziale matriciale del suolo  |
| $\psi_w$        | [MPa]   | Potenziale idrico  |

---

**SEZIONE I**  
**INTRODUZIONE**

---

---

## 1 Introduzione

---

### 1.1 Il cambiamento climatico

L'aumento della popolazione mondiale e, di conseguenza, delle attività umane hanno portato negli ultimi decenni all'eccessivo sfruttamento delle risorse idriche. Tra i diversi usi civili, industriali e agricoli questi ultimi risultano essere la componente predominante nel prelievo di acqua dolce (circa il 70% del fabbisogno mondiale è destinato all'irrigazione, *Schultz e Stoll, 2010*). Gli studi sul cambiamento climatico prospettano un aumento delle temperature e una maggiore irregolarità delle precipitazioni che aggraveranno i processi di degrado, desertificazione (*IPCC 2008*) e salinizzazione dei suoli (*Rosenzweig e Hillel, 1998*) con conseguente aumento della domanda di acqua per usi irrigui. La scarsità di questa risorsa obbliga gli operatori del settore primario e la comunità scientifica a studiare soluzioni finalizzate all'aumento dell'efficienza dell'uso dell'acqua (*Al-Kaisi e Yin, 2003*) e alla riduzione degli sprechi, ormai politica prioritaria delle Nazioni Unite (*Annan, 2000*).

In questo contesto mondiale si inserisce la coltivazione della *Vitis vinifera* L., una coltura presente in sei dei sette continenti, in ambienti caratterizzati dai climi più diversi (oceanico, temperato, continentale, mediterraneo, subtropicale, tropicale, arido) (*Péguy, 1970, Tonietto e Carbonneau, 2004*) e per questo motivo risulta essere molto esposta al cambiamento climatico. All'interno delle zone di produzione esistenti la mancanza di acqua è probabilmente il vincolo ambientale più importante (*Williams e Matthews, 1990*), anche in climi temperati, dove è frequente il verificarsi di condizioni di stress da deficit idrico durante la stagione vegetativa (*Morlat et al., 1992, van Leeuwen e Seguin, 1994, Gaudillère et al., 2002, Gruber e Schultz, 2009*).

Su queste problematiche sarà incentrata la viticoltura del futuro che dovrà affrontare non solo le conseguenze dirette del cambiamento climatico (temperatura, precipitazione, concentrazione di CO<sub>2</sub>) ma anche quelle indirette (gestione risorse, efficienza energetica, sostenibilità della produzione).

### 1.2 Il settore vitivinicolo in Italia e in Sicilia

La domesticazione della *Vitis vinifera* L. subsp. *sylvestris* in Italia risale al 1000 a. C., quando gli Etruschi ne diffusero la coltivazione (*Buono e Vallariello, 2002*). Da quel momento la vite è diventata un elemento caratterizzante del paesaggio ma anche della cultura e dell'economia italiana.

Attualmente la produzione di vino italiano rappresenta il 30% di quella comunitaria e il 18% di quella mondiale. Secondo i dati dell' *Organisation International de la Vigne et du Vin (OIV, 2007)* dal 1985 al 2007 la produzione di uva e di vino ha subito una contrazione dell'11,5%. Nonostante ciò la viticoltura italiana non ha perso competitività sul mercato mondiale, mirando a prodotti di alta qualità con Denominazione di Origine (legge n.164 del 10 febbraio 1992. GU n. 164 del 23 giugno 1998). Il peso del settore vitivinicolo sul totale della PLV (Produzione Lorda Vendibile) agricola nazionale ha raggiunto il 12.7%: nel nord Italia è aumentato (13,4%), mentre per il centro e sud Italia è stato registrato un lieve calo (11,6%) (dati *ISTAT, 2009*). La sola regione Sicilia apporta un contributo del



15% alla PLV (dati *ISTAT*, 2009) con un investimento di superficie agricola in vigneti di 140'000 ettari, e risulta al quarto posto per la produzione di uva destinata alla vinificazione (Grafico 1).

Tra i vigneti più diffusi in Sicilia si ricordano il: Carricante, Catarratto bianco comune, Catarratto bianco lucido, Corinto nero, Damaschino, Grecanico dorato, Grillo, Insolia, Malvasia di Lipari, Moscato bianco, Nerello cappuccio, Nerello mascalese, Nero D'Avola, Nocera nera e Zibibbo (*Bica*, 2007).

### 1.3 Scelta dell'area studio e problematiche relative alla stima dell'evapotraspirazione

In Italia la viticoltura è stata da sempre condotta in regime non irriguo; tuttavia negli ultimi anni anche questa coltura ha tratto notevoli vantaggi dall'irrigazione, a causa del cambiamento climatico in atto (*Ragab e Prudhomme*, 2002) che sta interessando soprattutto le regioni del sud. È proprio per questo motivo che si è scelta la Sicilia come area studio, in quanto caratterizzata da un clima semi-arido, con temperature estive molto alte e piogge concentrate dall'autunno alla primavera.

In Sicilia, l'irrigazione interessa una superficie complessiva di circa 55'000 ha, a cui corrisponde un fabbisogno irriguo stimato dell'ordine di 250'106 m<sup>3</sup>/anno (dati *ISTAT*, 2007); a fronte di tale fabbisogno, si dispone di un volume medio di acqua da fonti collettive di circa 170'106 m<sup>3</sup>/anno. Il deficit idrico è destinato a crescere a causa della progressiva riduzione delle risorse idriche disponibili e della modesta efficienza delle reti di adduzione e distribuzione (*Barbagallo et al.*, 2002).

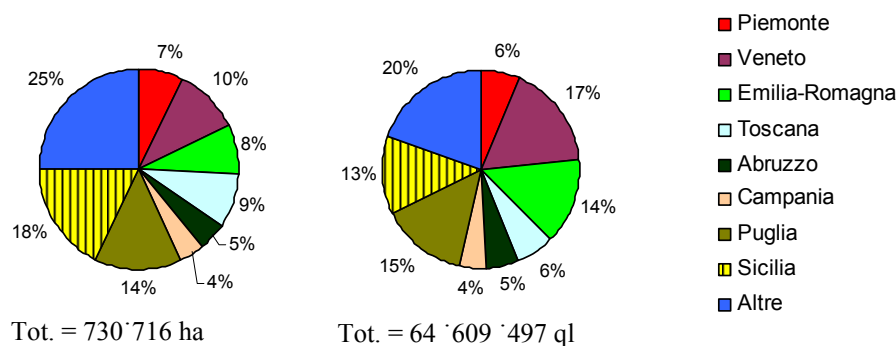


Grafico 1 - Superfici investite a uva da vino (a sinistra) e produzione di uva da vino (a destra) in Italia (*ISTAT*, 2009).

Il primo passo verso una gestione razionale delle risorse idriche è senz'altro la valutazione accurata della variabilità spaziale e temporale degli scambi idrici tra colture e atmosfera attraverso il processo dell'evapotraspirazione (ET). A riguardo sono stati messi a punto modelli e tecniche di misura in grado di descrivere con notevole accuratezza i meccanismi di scambio di massa ed energia nel sistema continuo suolo-pianta-atmosfera. Tuttavia, nell'ambito delle colture arboree, la complessità degli apparati radicali e delle chiome richiede ulteriori approfondimenti nello studio dei processi evapotraspirativi, soprattutto in condizioni di stress idrico. La valutazione dell'evapotraspirazione in colture arboree, specialmente su vaste aree, non è di facile determinazione, in quanto la non uniforme copertura del

manto vegetale determina un'evaporazione consistente, ma altamente variabile, dalla superficie del suolo il quale segue processi molto diversi dalla traspirazione di queste coperture vegetali (Heilman *et al.*, 1994).

Anche i flussi di energia disponibile, definita quest'ultima come la differenza fra radiazione netta e flusso di calore nel suolo, deve essere ripartita a sua volta fra la coltura ed il suolo sottostante. Un'ulteriore problematica è rappresentata dalla scarsa conoscenza delle interazioni tra traspirazione e disponibilità idrica nel suolo nel corso del ciclo colturale. Le situazioni di stress da carenza idrica limitano le opportunità di conseguire livelli di pregio dei vini (Valenti *et al.*, 2004), così come eccessi idrici, soprattutto in alcune fasi fenologiche, possono essere causa di un decadimento qualitativo. È per questo motivo che l'irrigazione della vite da vino è da sempre una problematica molto dibattuta per gli importanti riflessi che determina sulla quantità e qualità del prodotto finale. Il tentativo di razionalizzare l'apporto idrico deriva dall'esigenza di ottenere produzioni qualitativamente elevate limitando contemporaneamente lo sviluppo vegetativo, al fine di evitare una eccessiva competizione tra frutti ed organi vegetativi in accrescimento.

In Italia i disciplinari di produzione dei vini di qualità impongono la limitazione dell'uso dell'acqua ai soli interventi di soccorso, vietati in ogni caso dall'invasatura alla maturazione in modo da ridurre gli sprechi di acqua e favorire la qualità del prodotto attraverso la concentrazione delle componenti dell'uva (Saltini, 2010). Considerando la progressiva diminuzione delle risorse idriche e la necessità di ridurre i costi di produzione in aree viticole, l'irrigazione potrebbe portare a maggiori benefici per gli agricoltori se finalizzata a massimizzare l'efficienza dell'utilizzo dell'acqua (Fereres, 2003).

Da qui la necessità di sviluppare e perfezionare le tecniche di misura e di valutazione dei fabbisogni irrigui delle colture arboree attraverso una più profonda conoscenza dei meccanismi che regolano il processo dell'evapotraspirazione.

#### 1.4 Scopo della tesi

Il presente lavoro di ricerca intende sviluppare e validare metodologie innovative per la determinazione dell'evapotraspirazione (ET) della vite in ambiente mediterraneo. Il lavoro è inserito all'interno di un progetto PRIN sulla "Valutazione degli scambi di massa e di energia per la gestione irrigua di colture arboree in ambiente mediterraneo" coordinato dal professore Guido D'Urso e che coinvolge oltre all'Università degli Studi di Napoli Federico II anche l'Università degli Studi di Palermo e l'Università degli Studi di Catania.

Gli obiettivi specifici di questo lavoro sono pertanto i seguenti:

1. Verificare l'adattabilità alle colture arboree dei **modelli di bilancio idrico** nati per le colture erbacee. I modelli recenti consentono di tener conto con maggior precisione della multidimensionalità del campo di moto e dell'evoluzione degli attingimenti radicali per cui possono essere utilizzati per individuare l'insorgenza di condizioni di stress idrico.
2. Sviluppare ed implementare i **modelli di bilancio energetico** a doppia sorgente da osservazioni nel campo termico acquisite con sensori ad alta risoluzione spaziale, al fine di determinare l'evapotraspirazione effettiva del sistema colturale.
3. Valutare la possibilità di utilizzare strumentazioni di semplice impiego (termometri) per la stima dello stress idrico nelle colture arboree.

#### 4. Individuazione delle **condizioni di stress**, nella coltura in esame.

Il progetto rivede in maniera critica i risultati delle ricerche condotte in merito alla determinazione dell'evapotraspirazione in sistemi arborei complessi e di attuare la loro applicazione nelle condizioni tipiche di colture arboree irrigue mediterranee, mettendo in luce limiti e potenzialità delle metodologie in esame. Dal punto di vista delle potenzialità applicative, i risultati consentiranno di migliorare notevolmente la valutazione dei fabbisogni irrigui nel sistema colturale analizzato. Nella gestione pratica dell'irrigazione, una stima attendibile dei fabbisogni irrigui permette di identificare più facilmente eventuali sprechi e può condurre, ad esempio, ad una revisione delle strategie di distribuzione dell'acqua d'irrigazione nei periodi di carenza della risorsa idrica.

### 1.5 Outline da inserire alla fine descrizione capitolo per capitolo

Questa tesi è organizzata in 4 sezioni: la prima introduttiva, la seconda dedicata allo stato dell'arte, la terza ai materiali e metodi e la quarta ai risultati.

SEZIONE I - Il *Capitolo 1* è dedicato all'inquadramento generale della problematica, ovvero all'importanza di approfondire le conoscenze dei processi evapotraspirativi per far fronte agli effetti del cambiamento climatico e aiutare in questo modo il settore viti-vinicolo. In questo capitolo sono definiti gli obiettivi del lavoro di tesi.

SEZIONE II - Per affrontare la problematica è stato necessario un'analisi della letteratura scientifica inerente allo stress da deficit idrico, ponendo particolare attenzione alle peculiarità biologiche e fisiologiche della *Vitis vinifera* L., descritta nel *Capitolo 2*. A seguire, nel *Capitolo 3*, sono riportati i principali indici di stress utilizzati in studi analoghi. Nei *Capitoli 4 e 5* è descritta la teoria dei modelli utilizzati in questo lavoro per la stima dell'evapotraspirazione: il modello di bilancio idrico (SWAP) e il modello di bilancio energetico (TSEB).

SEZIONE III – Nei materiali e metodi sono state descritte l'area studio e la sua caratterizzazione pedoclimatica (*Capitolo 6*), la descrizione di come è stato condotto l'esperimento, con dettagli inerenti alla strumentazione utilizzata (*Capitolo 7*) e un breve descrizione teorica che è alla base di ogni tecnica di misurazione (*Capitolo 8*). I dati ottenuti dal monitoraggio sono elencati nel *Capitolo 9*.

SEZIONE IV – Nei *Capitoli 10 e 11* sono riportate le implementazioni dei modelli descritti nei Capitoli 4 e 5 e le simulazioni effettuate. I flussi di evapotraspirazione, evaporazione e traspirazione sono stati messi a confronto con le misure della stazione micro-meteorologica e le misure di SAP-FLOW per valutare quale modello sia riuscito meglio a rappresentare le condizioni reali della coltura in esame. Nel *Capitolo 12* sono stati calcolati gli indici descritti nel Capitolo 3 utilizzando i flussi di evaporazione e traspirazione ottenuti dalle diverse simulazioni e messi a confronto. Le conclusioni del lavoro e i commenti sulle possibili ricadute pratiche sono descritte nel *Capitolo 13*.

---

**SEZIONE II**  
**STATO DELL'ARTE**

---

---

## 2 Lo stress da deficit idrico nella *Vitis vinifera* L.

---

La pianta può essere considerata come un sistema idraulico continuo, che mette in connessione l'acqua presente nel suolo con il vapore acqueo contenuto nell'atmosfera. La crescita, le rese produttive e la sopravvivenza sono intimamente collegate all'ambiente atmosferico ed a quello terrestre. La conoscenza di alcuni processi come gli scambi d'energia, l'assimilazione della CO<sub>2</sub> nel processo fotosintetico e la perdita di vapore acqueo nella traspirazione, sono di fondamentale importanza per qualunque tecnica di gestione.

Lo stato idrico della pianta è subordinato alle condizioni pedoclimatiche dell'agroecosistema, i cui cambiamenti si ripercuotono inevitabilmente sul comportamento fisiologico della pianta, che mette in atto degli accorgimenti necessari per adattarsi all'ambiente (Schultz, 1996, Bota *et al.*, 2001); un esempio è la tomentosità presente sulla pagina inferiore delle foglie che ostacola la traspirazione, stabilizza lo strato limite trattenendo acqua e svolge una funzione di coibentazione (Fregoni, 2005).

Determinanti nella produzione finale sono tutti gli interventi colturali che si attuano a partire dall'impianto del vigneto, in quanto vanno a determinare la dimensione e le caratteristiche della canopy (Reynolds e Wardle, 1989, Spano *et al.*, 2000, Carbonneau e Cargnello, 2003, Gladstone e Dokoozlian, 2003, Downey *et al.* 2004) e, quindi, influenzano i consumi idrici e l'intercettazione della luce (Schultz, 1995).

Di seguito sono riportati alcuni aspetti fondamentali che intervengono nei processi fisiologici e nella caratterizzazione dello stress idrico.

### 2.1 L'apparato radicale

Svolge molteplici funzioni: ancoraggio, assorbimento, accumulo di sostanze di riserva e produzione di metaboliti, principalmente ormoni, essenziali per la regolazione dei processi fisiologici, per cui una variazione nello sviluppo, nella distribuzione spaziale e nella capacità di suzione è molto influente nel mantenere un corretto bilancio idrico. La sua espansione varia con le caratteristiche del suolo, la densità d'impianto, il tipo di *portinnesto*, il clima, la gestione agronomica del suolo e la densità stessa dell'apparato. In genere l'apparato radicale si sviluppa nel suolo entro un metro di profondità, ma può arrivare anche a 6-7 m (Fregoni, 2005), mentre l'espansione laterale è influenzata notevolmente dalla densità d'impianto e può raggiungere qualche metro (fino a 4-5 m). Le radici sono sempre di tipo avventizio e fascicolato poiché si originano da talee. L'accrescimento, nel caso della vite, presenta un picco durante la fioritura e uno al raccolto, differenziandosi dalle altre piante da frutto in cui la fase principale di accrescimento si ha prima della schiusura delle gemme.

Un ruolo importante nel determinare l'efficienza di utilizzo dell'acqua e nell'influenzare la resistenza agli stress idrici può essere svolto dalle *simbiosi micorriziche* (frequentemente del genere *Glomus*) che possono interessare il 40% del capillizio radicale (Delrot *et al.*, 2001).

L'adattabilità dei portinnesti alla siccità è un aspetto determinante, considerando il pericolo della salinizzazione e gli effetti che questa ha sulla qualità del prodotto finale (Shani *et al.*, 1993, Cramer *et al.*, 2007).

Alcuni portinnesti come Ramsey, 1103 Paulsen, Ruggeri 140, 101-14 sono relativamente tolleranti a condizioni saline (Stevens e Walker, 2002); tuttavia, questa tolleranza può diminuire con la prolungata esposizione alla salinità.

## 2.2 Il clima

I fattori climatici entrano in maniera diretta nella regolazione del processo evapotraspirativo e sono necessari per definire se una certa area geografica è più o meno vocata alla viticoltura. L'attenzione verso il clima è notevole nell'area mediterranea, in cui si prospetta una modifica del regime pluviometrico, con condizioni sempre maggiori di siccità che porteranno alla necessità di valutare la resilienza del sistema suolo-vegetazione in condizioni di deficit idrico (Portoghesi et al., 2002).

La *radiazione solare* è la fonte di energia maggiormente utilizzata dalla foglia per il processo traspirativo, in quanto agisce sull'apertura stomatica, incrementa il processo di fotosintesi clorofilliana e la temperatura fogliare. Solitamente in un vigneto la radiazione intercettata è circa il 50% e di rado supera il 60%, mentre allo zenit può abbassarsi fino al 25% nelle forme di allevamento con germogli verticali.

Le alte *temperature*, hanno influenze negative soprattutto sull'accrescimento degli acini, che subiscono in casi estremi il disseccamento (Pàstena, 1990). Secondo altri gli effetti sono ancora poco chiari, in generale, i 22 ° C sono considerati limitanti per la produzione di uva destinata alla vinificazione (Jones, 2007, Schultz et Jones, 2008), anche se in molte zone la temperatura è più alta (Tonietto et Carbonneau, 2004); i dannosi effetti delle alte temperature possono essere in gran parte attenuati se la fornitura di acqua è sufficiente e/o se l'umidità è alta.

Le basse temperature, in genere, non provocano gravi danni in quanto si verificano durante il riposo vegetativo. Possono risultare particolarmente dannose le gelate in tarda primavera. Sulla resistenza della vite agli abbassamenti termici possono influire alcuni fattori, fra cui la varietà, l'età e la vigoria della pianta e il momento in cui è stata eseguita la potatura.

L'umidità e il vento creano il deficit di pressione di vapore (VPD) necessario a creare il gradiente lungo il quale si ha il flusso evapotraspirativo. Molti studi hanno dimostrato che la VPD è direttamente collegata alla conduttanza stomatica (Soar et al., 2006, Poni et al., 2009).

## 2.3 L'uso dell'acqua nella pianta e il deficit idrico

Di tutte le risorse di cui le piante hanno bisogno per crescere, l'acqua è il costituente maggiore e nello stesso tempo il fattore limitante. Per produrre un grammo di sostanza organica sono assorbiti dalle radici circa 500 g di acqua; essa tipicamente costituisce l'80-95% nei tessuti non legnosi e il 35-75% nei tessuti legnosi (Mugnai, 2004).

Il deficit si manifesta quando la pianta ha un tasso di assorbimento più basso rispetto alla perdita di acqua per traspirazione ed è caratterizzato da decrementi del contenuto idrico, del turgore e del potenziale idrico, dalla parziale o completa chiusura degli stomi, dalla riduzione della distensione cellulare e dalla riduzione della crescita della pianta (Schultz et Stoll, 2010), dovuta alla riduzione degli scambi di CO<sub>2</sub> e, di conseguenza, della fotosintesi clorofilliana. La riduzione del flusso traspirativo comporta anche una riduzione della produzione in maniera indiretta: con esso, infatti, si riduce anche l'assorbimento dei nutrienti (soprattutto l'azoto) che causa una riduzione della fecondità.

La *Vitis vinifera* L. generalmente non tende a manifestare subito i segni dello stress, ma mostra diversi sintomi causati da un effetto cumulativo sullo sviluppo di germogli e sui frutti (Wample et Smithyman, 2002), per cui quando mostra evidenti segni di stress spesso sono dovuti a carenze verificatesi nella stagione precedente; quindi, le

pratiche condotte influenzeranno anche la produzione degli anni successivi (*Ripoche et al.*, 2011); a parità di varietà il tasso e il grado di recupero può essere molto differenti (*Flexas et al.*, 2004, 2006).

A seconda dello stadio fenologico in cui si trova la pianta quando viene colpita dallo stress, le ripercussioni che questo ha sulla sua crescita, sullo sviluppo e sulla fisiologia possono variare notevolmente. È difficile riscontrare una condizione di stress durante la fase di germogliamento ma, se si verifica, può provocare una riduzione della schiusura delle gemme e dell'accrescimento dei germogli (*Wample et Smithyman*, 2002). Quando lo stress è prolungato si può avere anche uno scarso sviluppo dei grappoli fiorali, e una riduzione dell'allegagione (*Fregoni*, 2005, *Keller*, 2005, *Meneghetti et al.*, 2006), anticipando la fruttificazione e la senescenza delle foglie. Se il deficit tra l'invasatura e la maturazione è lieve si riducono gli attacchi parassitari e migliora la qualità del vino (*McCarthy*, 2000; *Ojeda et al.*, 2002).

La scelta del momento irriguo della vite deve tener conto del fatto che sono i processi di crescita vegetativa a risentire in misura maggiore del deficit idrico (*McCarthy et al.*, 2002) rispetto all'accumulo dei carboidrati che si verifica, nell'acino, in post-invasatura. In questa fase l'acino perde la funzionalità xilematica e diviene molto più tollerante allo stress (*Poni*, 2000), rendendo un eventuale intervento irriguo superfluo e potenzialmente dannoso ai fini della qualità del prodotto finale, infatti solo in caso di temperature molto elevate potrebbe esserci una maggiore necessità di irrigazione per evitare ritiri di bacche d'uva attraverso perdita d'acqua (*Keller*, 2010).

Infine, un abbassamento delle risorse idriche nel suolo induce le radici a sintetizzare l'Acido Abscissico (ABA) che è direttamente coinvolto nella chiusura stomatica (*Loveys et al.*, 2004, *Stoll*, 2000, *Düring et al.*, 1996).

## 2.4 L'irrigazione

L'irrigazione consiste nell'apportare acqua alle colture in maniera artificiale. Un buon sistema irriguo ottimizza la distribuzione temporale e spaziale dell'acqua nel suolo, in modo tale da promuovere lo sviluppo ottimale e la produzione della coltura, innalzando l'efficienza economica-produttiva. Lo scopo non è necessariamente quello di ottenere le rese più alte, ma massimizzare la crescita ed il benessere della pianta.

L'irrigazione aumenta la fotosintesi clorofilliana e la produttività da 1,5 a 4 volte, in relazione ai tempi di applicazione, alla quantità di acqua utilizzata, alla cultivar, alle condizioni ambientali e ad altre pratiche colturali (*Bravdo et al.*, 1985.; *Matthews et al.*, 1987; *Schultz*, 1996; *Williams*, 1996; *Escalona et al.*, 2003). Di fatto solamente in ambienti caratterizzati da un clima caldo arido oppure in annate particolarmente siccitose può portare ad aumenti qualitativi (*Fregoni*, 2005), in genere gli eccessi possono rivelarsi dannosi, stimolando una vegetazione eccessiva, con la diminuzione del grado zuccherino dell'uva.

Allo stato attuale la distribuzione dell'acqua in agricoltura avviene prevalentemente a turnazione, una modalità poco efficiente che dà luogo a perdite consistenti; in viticoltura i sistemi di somministrazione localizzata (ad esempio i sistemi a goccia) riducono le perdite e permettono di controllare lo sviluppo della chioma e delle radici (causando un'essiccazione parziale) e, attraverso un aumento della sintesi dell'Acido Abscissico, viene stimolata la chiusura degli stomi e, quindi, la riduzione della traspirazione (*Cifre*, 2005), oltre ad agire in modo diretto sull'abbassamento della temperatura.

L'irrigazione in viticoltura, come pratica per l'ottenimento di produzioni di qualità, deve necessariamente passare attraverso una chiara comprensione dei fenomeni fisiologici che stanno alla base della risposta della vite allo stress idrico e la conoscenza delle dinamiche del moto dell'acqua nel suolo.

Negli ultimi anni, una maggiore comprensione delle risposte della vite a condizioni di stress e una corretta valutazione della sensibilità di alcuni indicatori fisiologici dello stato idrico sono divenute sempre più importanti per una razionale gestione del vigneto. Le misurazioni del contenuto idrico del suolo danno un'indicazione sulle disponibilità di acqua e, solo indirettamente, sullo stato idrico effettivo della coltura; quelle di evapotraspirazione, invece, misurando la quantità di acqua consumata, forniscono delle indicazioni sulla disponibilità residua e sulle condizioni della pianta.

La chiave per il miglioramento qualitativo delle uve è, quindi, il raggiungimento di un equilibrio attraverso una gestione oculata e razionale delle risorse agricole ed idriche, utilizzando l'irrigazione come strumento per il miglioramento delle produzioni orientato a massimizzare l'efficienza dell'uso dell'acqua).

Purtroppo si tratta di una pratica in cui sono coinvolti molti aspetti sociali, economici e politici (Ferreeres, 2003).



### 3 Gli indici di stress

Negli ultimi cinquant'anni la comunità scientifica si è interessata a come poter stimare lo stress idrico delle colture attraverso l'utilizzo della temperatura fogliare. *Kustas et al.* (2003) distingue i metodi per la stima dello stress idrico delle colture basandosi su:

1. la differenza di temperatura tra la canopy e l'aria ( $T_c - T_a$ );
2. confronto con la temperatura fogliare in un campo ben irrigato;
3. la variabilità della temperatura fogliare all'interno di un campo.

Molto usato è il Crop Water Stress Index (CWSI) (*Jackson et al.*, 1981) che si basa sulla differenza di temperatura ( $T_c - T_a$ ). Quando una coltura è ben irrigata e copre uniformemente il suolo, il suo tasso evapotraspirativo reale ( $ET_e$ ) è pari a quello potenziale ( $ET_p$ ) e, quindi, il tasso ( $ET_e/ET_p$ ) sarà pari a 1 (l'acqua è disponibile e il valore di resistenza della canopy,  $r_c$ , è molto basso), mentre il rapporto sarà uguale a zero quando non c'è flusso evapotraspirativo (l'acqua non è disponibile e il valore di  $r_c$  è infinitamente grande). Questo rapporto è pertanto considerato come un indice di disponibilità di acqua del suolo.

Il CWSI ha un range che va da 0, in condizioni di assenza di stress, e 1, in condizioni di massimo stress, ed è definito dalla relazione:

$$CWSI = 1 - \left( \frac{ET_e}{ET_p} \right) \quad (3-1)$$

Considerando la canopy come funzione dell'energia disponibile ( $R_n - G$ ), del deficit di pressione di vapore ( $e_s - e_a$ ),  $r_a$  e  $r_c$ , è possibile esprimere il CWSI attraverso la differenza ( $T_c - T_a$ ) (*Choudhury*, 1983):

$$CWSI = \frac{[(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{min}]}{[(T_c - T_a)_{max} - (T_c - T_a)_{min}]} \quad (3-2)$$

dove con i pedici *min* e *max* si intendono una condizione di massimo stress e una di riferimento senza stress.

*Choudhury* (1989) ha definito l'indice CWSI attraverso la temperatura a infrarosso delle foglie:

$$CWSI = \frac{(T_v - T_v^0)}{(T_v^{max} - T_v^0)} \quad (3-3)$$

dove  $T_v^0$  indica la temperatura fogliare della coltura ben irrigata,  $T_v$  è la temperatura fogliare della coltura in stress e  $T_v^{max}$  è la temperatura massima ottenibile sotto le prevalenti condizioni atmosferiche con una pianta non-traspirante.

Il CSWI può essere riscritto considerando le resistenze (*Kustas et al.*, 2003):

$$CWSI = 1 - \left( \frac{ET_e}{ET_p} \right) = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{r_{cp}}{r_a} \right) \right]}{\left[ 1 + \left( \frac{r_c}{r_a} \right) \right]} \quad (3-4)$$

Questi indici sono stati sviluppati per condizioni di colture con copertura uniforme e vanno adattati qualora la copertura sia più bassa (*Kalma et al.*, 2008).

Nella letteratura il CWSI viene presentato come un buon indicatore della disponibilità idrica anche in viticoltura (*Jones et al.*, 2002, *Grant et al.*, 2007, *Möller et al.*, 2007, *Stoll e Jones* 2007). Tuttavia proprio perché è una coltura che non copre uniformemente il suolo considerare il rapporto ( $ET_e/ET_p$ ) potrebbe indurre in errore, mentre risulta più corretto considerare la sola frazione traspirativa ( $T_e/T_p$ ) (*Hanson et al.*, 1999, *Lascano et al.*, 1992; *Sudar et al.*, 1981). Al momento, però, non è ancora ben chiaro come questo indice possa essere applicato nella gestione dell'irrigazione (*Jones et al.*, 2002, *Möller et al.*, 2007).

Aspetto cruciale per il calcolo di questi indici è la stima dell'evapotraspirazione e in particolare della frazione traspirativa. A tale scopo sono stati utilizzati un modello di bilancio idrico e un modello di bilancio energetico, descritti nei capitoli a seguire.

## 4 Il bilancio idrico

### 4.1 Il continuum suolo-pianta-atmosfera

La pianta può essere considerata un sistema idraulico continuo, che mette in connessione l'acqua presente nel suolo con il vapore acqueo contenuto nell'atmosfera. Lo stato idrico è definito attraverso il *potenziale idrico* ( $\psi_w$ ), che esprime lo stato energetico dell'acqua. Convenzionalmente,  $\psi_w$  dell'acqua pura a 25°C e 0,1 MPa di pressione atmosferica è pari a zero. Il  $\psi_w$  nei tessuti vegetali è differenziato in due componenti principali: potenziale di turgore ( $\psi_p$ ) e potenziale osmotico ( $\psi_o$ ). Il  $\psi_p$  rappresenta la componente di pressione del potenziale idrico cellulare ed è il risultato della pressione idrostatica nelle cellule; normalmente assume valori positivi e l'intensità di  $\psi_p$  dipende dall'elasticità della parete cellulare ( $\epsilon$ ). Il  $\psi_o$ , invece, è basato sulla concentrazione dei soluti nell'acqua. L'acqua intracellulare contiene elevate quantità di soluti, che possono far arrivare il potenziale osmotico fino a valori estremi di -5 MPa (due volte circa quello dell'acqua marina). I componenti del potenziale idrico si legano fra loro mediante la seguente equazione:

$$\Psi_w = \Psi_p + \Psi_o \quad (4.1-5)$$

Anche lo stato dell'acqua presente nel suolo può essere descritto attraverso il concetto di *potenziale matriciale* ( $\psi_s$ ). Analogamente ai circuiti elettrici, il flusso idrico nella pianta è paragonabile a una rete di potenziali, di resistenze e di capacitance (Figura 1).

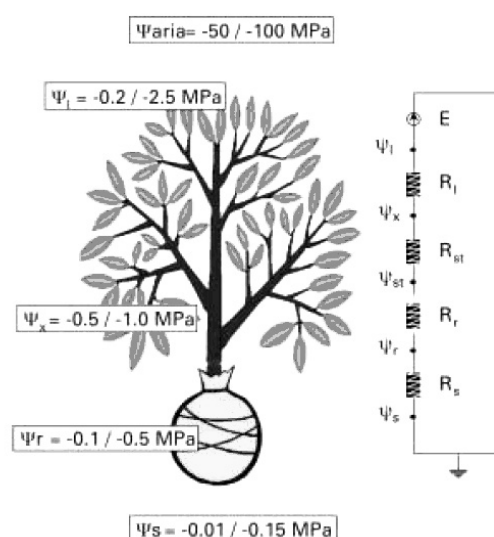


Figura 1 - Descrizione del continuum suolo-pianta-atmosfera attraverso l'analogia con un circuito elettrico tratto da Mugnai (2004). Dove  $\psi_s$  = potenziale idrico del suolo,  $\psi_r$  = potenziale idrico radicale,  $\psi_x$  = potenziale idrico xilematico,  $\psi_l$  = potenziale idrico fogliare,  $\psi_{aria}$  = potenziale idrico dell'atmosfera,  $R_s$  = resistenza suolo,  $R_r$  = resistenza radicale,  $R_{st}$  = resistenza del fusto,  $R_l$  = resistenza fogliare, E = ambiente esterno.

Il movimento dell'acqua nella pianta è governato da regole analoghe a quelle per il flusso di elettricità, come descritto dalla legge di Ohm (Hillel, 1991). Il gradiente di potenziale nel *continuum* suolo-pianta-atmosfera (SPAC) è la forza che guida il trasporto attraverso la pianta: il flusso idrico partirà da un punto del sistema ad alto (meno negativo) potenziale idrico a un altro punto a basso (più negativo) potenziale idrico. Attualmente il sistema SPAC rappresenta l'approccio scientificamente più valido per la descrizione degli scambi idrici tra suolo, pianta ed atmosfera. Lo studio di tale sistema è molto complesso, non soltanto per il notevole numero di variabili che entrano in gioco, ma anche per i fenomeni di autoregolazione interna che si verificano tra le diverse componenti del sistema stesso (Agnese et al., 2008)

#### 4.2 Approcci modellistici per il bilancio idrico

Le complesse relazioni idriche che avvengono all'interno del sistema SPAC possono essere esplicitate seguendo principalmente due impostazioni modellistiche: una di tipo fisicamente basato (Santini, 1992) e l'altra di tipo analogico (Smith, 1992), nel quale il sistema è assimilato ad un serbatoio. Nel primo caso gli scambi idrici che avvengono all'interno del sistema SPAC vengono dedotti mediante modelli dei processi fisici che ne determinano e influenzano la dinamica specifica. Seguono questa impostazione i modelli matematici (SWAP, HYDRUS, ecc.) che risolvono in termini numerici ed in modo integrato le complesse espressioni analitiche che descrivono i processi di scambi idrico tra suolo, pianta ed atmosfera. Seguendo questa impostazione è possibile simulare in termini differenziali le componenti del bilancio idrico ed in particolare attraverso i profili di umidità del suolo  $\theta(z)$ , la variazione della riserva idrica del suolo,  $\Delta W$ , in un intervallo temporale,  $\Delta t$ :

$$\Delta W = \int_0^z [\theta(z, t + \Delta t) - \theta(z, t)] dz \quad (4.2-6)$$

L'impiego dei modelli dinamici richiede la conoscenza delle caratteristiche idrauliche del suolo, ovvero delle funzioni di ritenzione e di conducibilità idraulica, e della definizione delle condizioni al contorno. L'applicazione di questi modelli a livello di comprensorio è possibile utilizzando nuove tecnologie come i sistemi di telerilevamento e di informazione geografica (D'Urso et al., 1999).

Con riferimento all'impostazione di tipo analogico, la modellizzazione degli scambi idrici nel sistema SPAC è molto semplificata rispetto ai modelli fisici e si basa fondamentalmente su una legge di essiccamento del suolo. In questi modelli, solitamente, il suolo è assimilato ad un serbatoio di data capacità massima, definita *capacità idrica utilizzabile* (Portoghese et al., 2002); l'estrazione dell'acqua del suolo da parte delle radici diviene difficile ancor prima che il contenuto d'acqua raggiunga il *punto di appassimento*, quindi è stato introdotto il concetto di *acqua facilmente utilizzabile*, intesa come la frazione di acqua disponibile al di sotto della quale le piante rispondono alle diminuzioni dell'umidità con una riduzione della traspirazione ed in generale cominciano a mostrare i sintomi dello stress idrico (Cavazza, 1997). Questi modelli trascurano i processi di attingimento radicale e usano formulazioni semplificate per la stima della traspirazione effettiva della pianta,  $T_e$ , della evaporazione effettiva dal suolo,  $E_e$ , che sono correlate all'evapotraspirazione potenziale tramite coefficienti dipendenti linearmente dal contenuto idrico medio del serbatoio.

In questa impostazione i termini di bilancio idrico vengono considerati come semplici flussi che entrano ed escono dal serbatoio secondo semplici relazioni e la variazione temporale della riserva idrica nel volume di suolo occupato dall'apparato radicale assume la forma generale:

$$\Delta W = (P_e + I_e - E_e - T_e + v)\Delta t \quad (4.2-7)$$

in cui  $\Delta W$  è la variazione del contenuto d'acqua nel volume di terreno occupato dalle radici,  $P_e$  è l'aliquota di pioggia che si infila nel suolo (pioggia efficace),  $I_e$  è la parte di acqua fornita con l'irrigazione che si infila nel suolo (irrigazione efficace),  $E_e$  è l'evaporazione effettiva dal suolo,  $T_e$  è la traspirazione effettiva dalla pianta e  $v$  è il flusso idrico (percolazione profonda) che attraversa il limite inferiore del volume considerato.

I modelli statici non sono mai stati definiti in modo univoco, non si riferiscono a metodi di misura universalmente adottati e sono peraltro privi di base fisica (Hillel, 1998), tuttavia sono ampiamente diffusi nella pratica agricola data la loro semplicità di utilizzo.

La produzione di applicazioni modellistiche di maggiore complessità è giustificata da una maggiore efficacia di questi modelli nella gestione delle risorse idriche (Singh e Frevert, 2002).

### 4.3 Il termine evapotraspirativo del bilancio idrico

Qualunque sia l'approccio seguito per lo studio degli scambi idrici all'interno del sistema SPAC, è sempre necessario conoscere il termine evapotraspirativo del bilancio, ottenuto dalla combinazione di due processi separati, quali l'evaporazione dell'acqua dal suolo e la traspirazione da parte della vegetazione; essendo i due fenomeni simultanei risulta molto difficile considerarli separatamente e pertanto si parla generalmente di evapotraspirazione come di un singolo processo.

La forte variabilità spaziale che caratterizza l'evapotraspirazione, unitamente alla complessità delle strumentazioni per la sua misurazione diretta, fanno sì che essa venga preferibilmente calcolata a partire da dati climatologici, attraverso equazioni che possono essere semiempiriche o ottenute sulla base di un approccio termodinamico. I metodi empirici sono validi solo sotto specifiche condizioni climatiche e di uso del suolo e non possono dunque essere applicati in modo generalizzato. A partire dai dati climatici si definisce l'evapotraspirazione di riferimento ( $ET_0$ ), ovvero la quantità di acqua dispersa nell'atmosfera da una coltura standard in condizioni ottimali di disponibilità idrica e in assenza di fattori di stress; essa è strettamente correlata alle variabili meteorologiche (radiazione solare, temperatura e umidità dell'aria, velocità del vento) e non è influenzata dai processi fisiologici della coltura. Quando le condizioni di campo differiscono da quelle standard, l'evapotraspirazione della coltura si ottiene moltiplicando l'evapotraspirazione di riferimento,  $ET_0$ , per un coefficiente culturale  $K_c$  che tiene conto della traspirazione culturale, dell'evaporazione del suolo e delle caratteristiche colturali, infatti, varia durante il periodo di crescita della coltura poiché variano le condizioni di copertura del suolo, l'altezza della pianta e l'estensione di area fogliare (Allen et al., 1998):

$$ET_p = K_c ET_0 \quad (4.3-8)$$

Il flusso potenziale o massimo  $ET_p$  della coltura considerata viene successivamente ripartito nei due termini  $T_p$  e  $E_p$ , che corrispondono rispettivamente al flusso potenziale traspirativo e a quello evaporativo. A tal fine, assumendo che

la radiazione netta che entra all'interno della canopy decresca secondo una funzione esponenziale e che il flusso di calore dal suolo possa essere trascurato, può porsi (Ritchie, 1972, Goudriaan, 1977; Belmans et al., 1983):

$$E_p = E_p' e^{-\kappa_{gr} LAI} \quad (4.3-9)$$

nella quale  $\kappa_{gr}$  è il coefficiente di estinzione della radiazione suggerito pari a 0,39 per le comuni colture agrarie, mentre  $E_p'$  è l'aliquota dell'evapotraspirazione di riferimento,  $ET_0$ , che contribuisce al processo evaporativo dal suolo ed è calcolata come:

$$E_p' = K_{soil} ET_0 \quad (4.3-10)$$

dove il coefficiente riduttivo  $K_{soil}$  viene posto pari a 1 quando non si dispone di specifiche indicazioni.

L'evaporazione effettiva,  $E_e$ , è pari al termine potenziale  $E_p$  in condizione di suolo superficiale saturo, mentre, in condizioni insature, tale valore viene ottenuto ricercando il minimo tra il termine potenziale e quello deducibile dall'equazione di Darcy (Cavazza, 1981), applicata tra il primo strato di suolo e l'atmosfera. In particolare condizioni, quali la presenza di residui colturali o compattazione degli strati superficiali, il suddetto confronto può essere esteso anche a valori dedotti con approcci empirici (Black et al., 1969; Boesten e Stroosnijder, 1986).

Calcolato  $E_p$ , il termine di traspirazione potenziale,  $T_p$ , viene, quindi, ottenuto dalla differenza:

$$T_p = ET_p - E_p \quad (4.3-11)$$

Per quanto riguarda le colture erbacee tali parametri appena descritti possono essere facilmente standardizzati, mentre per le colture arboree possono variare sensibilmente da una zona all'altra di coltivazione (Campos et al., 2010).

#### 4.3.1 Metodi per il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento

E' possibile suddividere i metodi per la stima dell'evapotraspirazione di riferimento in quattro categorie: metodi basati su misure di evaporimetri, metodi termometrici, metodi radiativi e metodi combinati.

I primi due tipi di metodi sono di natura empirica e si basano sulla correlazione fra diversi parametri meteorologici e l'evapotraspirazione stessa.

La stima attraverso *evaporimetro* è la meno accurata; l'evapotraspirazione è calcolata grazie a correlazioni empiriche con il volume d'acqua evaporato da apposite vasche di dimensione prefissata (Giardini, 1986). La relazione è del tipo:

$$ET_0 = EA \cdot K_p \quad (4.3.1-12)$$

dove EA corrisponde all'evaporato dalla vasca di classe A e  $K_p$  è il coefficiente di vasca che varia in relazione all'umidità relativa media, alla velocità del vento e all'estensione del prato intorno alla vasca; i coefficienti di correzione tabellari necessitano di ulteriori correzioni in funzione del luogo di misurazione e della vegetazione presente intorno alla vasca.

I *metodi termometrici* sono basati sulle misure della temperatura dell'aria; sono obsoleti e adoperati solo in mancanza di altre informazioni e solo se i dati meteorologici sono distribuiti in un intervallo di tempo piuttosto ampio in quanto, adottando un approccio di tipo empirico, una lunga serie di valori è maggiormente affidabile nel risultato. Rientra in questi metodi l'equazione di Hargreaves (Hargreaves e Samani, 1985).

Risultano soddisfacenti i *metodi radiativi*, basati non su valori empirici bensì su misure dirette della radiazione solare, grandezza fondamentale per il fenomeno dell'evapotraspirazione. I metodi di questa categoria sono meno

accurati in condizioni di clima arido rispetto ad analoghe situazioni in clima umido e non tengono conto della componente del vento; per le condizioni di umidità e temperatura atmosferica è necessario introdurre dei coefficienti di correzione dell'ordine del 10-20%. Di particolare importanza è il metodo di *Priestley-Taylor* (1972), che tiene conto indirettamente della temperatura e dell'umidità attraverso la pendenza della curva di pressione di vapore saturo:

$$ET_0 = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{(R_n - G)}{\lambda} \quad (4.3.1-13)$$

dove  $R_n$  è la radiazione netta [ $\text{MJ m}^{-2}\text{giorno}^{-1}$ ],  $\Delta$  è la pendenza della curva pressione di vapore saturo-temperatura [ $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ],  $G$  è il flusso di calore nel suolo [ $\text{MJ m}^{-2}\text{giorno}^{-1}$ ],  $\gamma$  è la costante psicrometrica [ $0,066 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ],  $\lambda$  è il calore latente di vaporizzazione [ $2,45 \text{ MJkg}^{-1}$  a  $20^\circ\text{C}$ ].

I *metodi combinati*, infine, considerano del processo evapotraspirativo sia la componente energetica, necessaria per il passaggio di stato dell'acqua, sia quella aerodinamica, che consente la rimozione del vapore acqueo. Pur presentando maggiori difficoltà applicative, dovute alla maggiore complessità formale, forniscono in generale stime molto più accurate a scala oraria.

Il metodo più diffuso e realmente efficace per il calcolo dell'evapotraspirazione è quello di Penman-Monteith (*Monteith*, 1965), proposto dalla FAO (*Allen et al.*, 1998). Esso approssima fedelmente l' $ET_0$  di una coltura erbacea in una località definita, avendo basi fisiche ed incorporando sia parametri fisiologici che aerodinamici:

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{ss}}{r_a}\right)} \quad (4.3.1-14)$$

dove  $\rho_a$  è la densità atmosferica [ $\text{kg m}^{-3}$ ],  $c_p$  è il calore specifico dell'aria [ $\text{KJkg}^{-1}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ],  $(e_s - e_a)$  è il deficit della pressione di vapore  $e_s(T)$  [ $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ],  $r_s$  e  $r_a$  rappresentano le resistenze del suolo e della vegetazione agli scambi di massa [ $\text{s m}^{-1}$ ].

L'equazione Penman-Monteith applicata al calcolo dell'evapotraspirazione di una coltura di riferimento, definita come l'evapotraspirazione di una ipotetica coltura in condizioni di disponibilità idrica ottimale, che ricopre interamente la superficie su cui è coltivata ed avente altezza uniforme di 0,12 m, resistenza di superficie pari a  $70 \text{ s m}^{-1}$  ed albedo pari a 0,23 (*Allen et al.*, 1998), può essere descritta anche come:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4.3.1-15)$$

in cui  $ET_0$  è l'evapotraspirazione della coltura di riferimento [ $\text{mm giorno}^{-1}$ ],  $\Delta$  è la pendenza della curva pressione di vapore saturo-temperatura  $e_s(T)$  [ $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ],  $R_n$  è il flusso di radiazione netta [ $\text{MJ m}^{-2}\text{giorno}^{-1}$ ],  $G$  è il flusso di energia attraverso il suolo [ $\text{MJ m}^{-2}\text{giorno}^{-1}$ ],  $T_a$  è la temperatura dell'aria rilevata a 2 m dal suolo [ $^\circ\text{C}$ ],  $(e_s - e_a)$  è il deficit della pressione di vapore, ovvero la differenza tra la pressione di vapore saturo e la pressione di vapore attuale alla data temperatura [ $\text{kPa}$ ],  $\gamma$  è la costante psicrometrica [ $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ] e  $U_2$  è la velocità del vento rilevata a 2 m dal suolo [ $\text{m s}^{-1}$ ]. L'insieme minimo di dati necessari per il calcolo è costituito dalla temperatura dell'aria  $T_a$  [ $^\circ\text{C}$ ], dall'umidità relativa RH [%], dalla velocità del vento  $U_z$  [ $\text{m s}^{-1}$ ] e dal flusso della radiazione solare ad onde corte incidente  $R_s$  [ $\text{MJ m}^{-2}\text{giorno}^{-1}$ ]. Le altre grandezze, in mancanza di misure dirette, possono essere stimate seguendo le procedure presenti in bibliografia (*Smith*, 1992, *Jensen et al.*, 1990, *Allen et al.*, 1998).

#### 4.4 Struttura del modello SWAP

Il modello di simulazione agroidrologico considerato nel presente lavoro è SWAP (Soil, Water, Atmosphere and Plant). Si tratta di un modello matematico che permette di descrivere il moto dell'acqua nel suolo risolvendo l'equazione di Richards con uno schema numerico a differenze finite (Kroes *et al.*, 2008). Il modello utilizza le funzioni idrauliche del suolo descritte dalle espressioni analitiche di van Genuchten e Mualem. Il codice di calcolo implementa sette moduli (meteo, irrigazione, coltura, suolo, trasporto d'acqua, trasporto di soluti e trasporto di calore), ognuno dei quali permette di determinare il relativo termine del bilancio idrico. I processi sono schematizzati nella Figura 2.

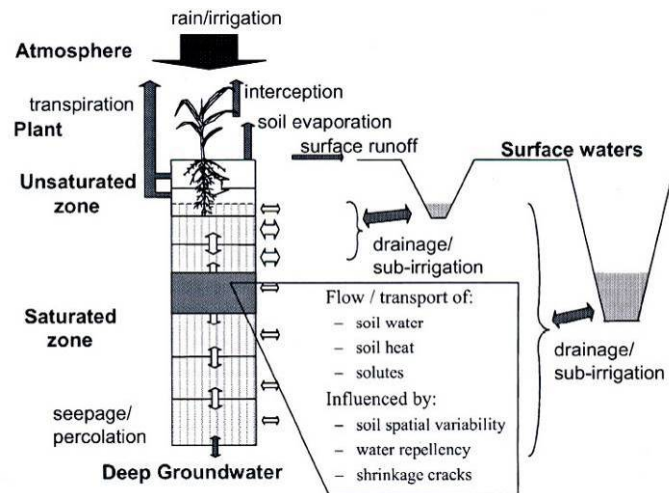


Figura 2 - Schematizzazione dei processi idrologici incorporati in SWAP (tratto da Feddes *et al.*, 2004).

L'equazione che descrive il processo di moto dell'acqua nel suolo, in condizioni di non completa saturazione, è dedotta combinando l'equazione di Darcy, impiegata per quantificare i flussi, con l'equazione di continuità della massa. Nello specifico, se il flusso è unidimensionale, l'equazione di Darcy si può scrivere come:

$$q_w = -K(\psi) \frac{\partial(\psi + z)}{\partial z} \quad (4.4-16)$$

nella quale  $q_w$  è la densità di flusso idrico (assunto positivo verso l'alto) [ $\text{cm d}^{-1}$ ],  $K$  è la conducibilità idrica insatura [ $\text{cm d}^{-1}$ ],  $\psi$  è il potenziale idrico del suolo [ $\text{cm}$ ] e  $z$  la coordinata verticale [ $\text{cm}$ ], assunta positiva verso l'alto.

L'equazione di continuità indica che la variazione infinitesima del contenuto idrico volumetrico nel tempo è pari alla variazione di flusso idrico con la profondità, oltre ad eventuali immissioni o uscite di acqua dal volume elementare (ad es. attingimento di acqua dal suolo per azioni delle radici):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial q_w}{\partial z} - S_a(\psi) \quad (4.4-17)$$

nella quale  $S_a(\psi)$  è la velocità di estrazione dell'acqua da parte delle radici delle piante [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3} \text{d}^{-1}$ ].

Combinando la legge di Darcy (eq.4.4-16) con l'equazione di continuità (eq. 4.4-17) si ottiene l'equazione differenziale di Richards, che è possibile esprimere nelle due forme:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\psi) \left( \frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] - S_a(\psi) \quad (4.4-18)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (4.4-19)$$



L'eq. (4.4-18) descrive il moto dell'acqua in termini di contenuto idrico  $\theta(\psi)$ , conducibilità  $K(\psi)$  e velocità di estrazione d'acqua da parte delle radici  $S_a(\psi)$ , mentre l'eq. (4.4-19) tiene conto di un'altra grandezza denominata capacità idrica differenziale del mezzo poroso,  $C(\psi)$ , espressa come l'inverso della derivata della curva di ritenzione al potenziale matriciale  $\psi$  considerato.

L'equazione di Richards è risolvibile attraverso i metodi di analisi numerica, purché siano specificate le condizioni al contorno e siano note le relazioni tra le proprietà idrauliche del suolo. Queste relazioni, dette funzioni idrauliche del suolo, sono in genere descritte analiticamente e consistono nella *funzione di ritenzione* e nella *funzione di conducibilità idraulica*. La prima descrive la relazione tra il potenziale idrico del suolo ( $\psi$ ) e il corrispondente contenuto idrico ( $\theta$ ) che, in assenza di fenomeni di isteresi (dovuto a variazioni nel diametro dei pori, a differenze nel raggio tra il menisco che avanza e quello che retrocede, all'aria intrappolata, ai processi di rigonfiamento/contrazione), si può considerare biunivoca. La seconda descrive la relazione tra la conducibilità idraulica ( $K$ ) e il potenziale idrico ( $\psi$ ); queste due funzioni rivestono un ruolo importante nella simulazione dei processi idrologici nella zona insatura poiché sono grandezze a cui i modelli sono generalmente molto sensibili (Baroni et al., 2009).

Tra i modelli analitici che descrivono la funzione di ritenzione dell'acqua nel suolo viene utilizzata l'equazione di van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \frac{1}{\left[1 + |\alpha_r \psi|^n\right]^m} \quad (4.4-20)$$

in cui  $\theta_s$  e  $\theta_r$  [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ] sono, rispettivamente, il contenuto idrico a saturazione e quello residuo,  $\alpha_r$  approssimativamente è uguale all'inverso del valore del potenziale nel punto di flesso caratteristico della curva, mentre  $n$  ed  $m$  ne definiscono la forma; in particolare  $n$  definisce la pendenza della curva ossia la velocità con cui essa si avvicina all'asse delle ordinate al diminuire del potenziale.

La funzione di conducibilità idraulica può essere derivata dalla funzione di ritenzione del suolo (Mualem, 1976):

$$K = K_{\text{sat}} S_e^{\lambda_M} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^m \right)^m \right]^2 \quad (4.4-21)$$

dove si indica con  $K_{\text{sat}}$  è la conducibilità idrica satura [ $\text{cm d}^{-1}$ ],  $\lambda_M$  è un parametro che determina la forma della curva, mentre  $S_e$  è il grado di saturazione definito come:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4.4-22)$$

I parametri delle due curve possono essere ottenuti utilizzando il codice di calcolo RETC, proposto da van Genuchten et al. (1991), a partire dalle coppie di valori misurati  $\theta(\psi)$  e  $K(\theta)$  oppure possono essere ottenuti tramite valori tabulari a partire dalle classi tessiture USDA (Carsel e Parrish, 1988).

Nel modello SWAP, particolare importanza riveste il termine di attingimento radicale  $S_a$ , calcolato come aliquota dell'attingimento radicale potenziale,  $S_p$ , definito come il massimo attingimento di acqua che la pianta può compiere in quella determinata condizione ecofisiologica. Il valore massimo delle funzioni di attingimento radicale potenziale corrisponde al valore massimo di traspirazione (traspirazione potenziale) della coltura,  $T_p$ . Per la determinazione dell'attingimento radicale potenziale ad una prestabilita profondità,  $S_p(z)$ , è necessaria la conoscenza della distribuzione dell'apparato radicale lungo il profilo.

Nota la distribuzione radicale, è possibile ricavare per ogni profondità la relativa aliquota di attingimento secondo la relazione:

$$S_p(z) = \rho(z_i) T_p = \frac{l_{\text{root}}(z_i)}{\int_{-z_r}^0 l_{\text{root}}(z_i) dz} T_p \quad (4.4-23)$$

nella quale viene indicato con  $\rho(z)$  la distribuzione dell'apparato radicale, con  $l_{\text{root}}(z_i)$  la densità radicale (lunghezza per unità di volume) alla profondità  $z_i$  e con  $z_r$  lo spessore dello strato di suolo occupato dalle radici.

Per la stima dei flussi traspirativi effettivi da quelli potenziali, SWAP riduce l'attingimento radicale potenziale,  $S_p(z)$ , attraverso i modelli empirici di *Feddes* (1978), per quanto concerne lo stress idrico, e di *Maas-Hoffmann* (1977), per quanto riguarda lo stress salino. In altri termini è possibile definire l'attingimento radicale effettivo ad una determinata profondità,  $S_a(z)$ , come:

$$S_a(z) = S_p(z) \alpha_{rw} \alpha_{rs} \quad (4.4-24)$$

in cui con  $\alpha_{rw}$  ed  $\alpha_{rs}$  vengono indicati rispettivamente i coefficienti di riduzione dovuti allo stress idrico e a quello salino. Questi coefficienti sono di natura empirica e in SWAP i submodelli che tengono conto dello stress idrico e salino sono rappresentati da relazioni di tipo lineare. In particolare per quanto concerne lo stress idrico il coefficiente di riduzione  $\alpha_{rw}$  è funzione del potenziale idrico del suolo,  $\psi$ , e segue l'andamento raffigurato nella Figura 3. Il valore di  $\alpha_{rw}$  varia tra 0 (condizione di massimo stress) e 1 (assenza di stress).

Infine, la traspirazione effettiva giornaliera,  $T_e$ , è data dall'integrazione delle funzioni di attingimento radicale effettivo  $S_e(z)$ , nei diversi comparti nei quali viene discretizzato il suolo.

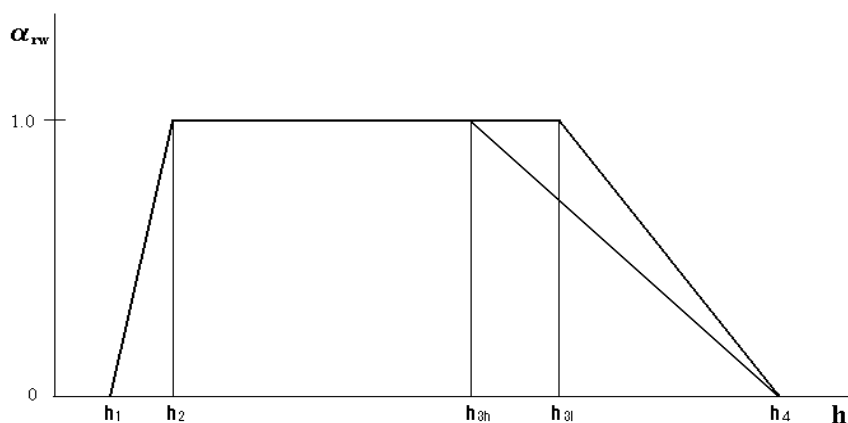


Figura 3 - Rappresentazione grafica della funzione di attingimento radicale in condizioni di stress idrico proposta da *Feddes* (2004); in questa figura il potenziale è indicato con la lettera  $h$ :  $h_1$  è il potenziale a cui le radici cominciano ad estrarre l'acqua dal suolo,  $h_2$  è il potenziale a cui le radici estraggono l'acqua al tasso possibile massimo,  $h_{3h}$  è il valore di potenziale a cui le radici non possono più estrarre l'acqua al tasso massimo,  $h_{3l}$  è uguale a  $h_{3h}$ , ma per un tasso potenziale della traspirazione minore e  $h_4$  è il valore di potenziale a cui non avviene più l'attingimento.

## 5 Il bilancio energetico

L'evapotraspirazione è un processo fisico che richiede oltre alla presenza dell'acqua e di un sink (la pianta) anche quella di una fonte di energia, quindi la stima dell'evapotraspirazione può avvenire anche attraverso il bilancio energetico del sistema. Il bilancio si basa sulla risoluzione dell'equazione:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = R_n - G_0 - H - NPP - \lambda E \quad (5-25)$$

dove  $\frac{\partial S}{\partial t}$  [ $\text{W m}^{-2}$ ] rappresenta il calore accumulato nella canopy e nell'aria,  $R_n$  [ $\text{W m}^{-2}$ ] è la radiazione netta,  $G_0$  [ $\text{W m}^{-2}$ ] è il flusso di calore nel suolo (corrisponde a circa il 10% di  $R_n$ ),  $H$  [ $\text{W m}^{-2}$ ] è il flusso di calore sensibile, ovvero il flusso dovuto agli scambi di calore tra le superfici e l'atmosfera,  $NPP$  [ $\text{W m}^{-2}$ ] è l'energia richiesta dalle piante per la fotosintesi netta (<1% di  $R_n$ ) e  $\lambda E$  è il flusso di calore latente che rappresenta l'energia utilizzata dal sistema per far evaporare l'acqua.

Considerando i termini  $\frac{\partial S}{\partial t}$  e  $NPP$  quantitativamente trascurabili, l'equazione (5-25) diventa:

$$R_n - G_0 - H - \lambda E = 0 \quad (5-26)$$

I termini dell'equazione (5-26) sono considerati positivi quando rappresentano un guadagno energetico in superficie, mentre sono considerati negativi quando sono considerati una perdita (Figura 4).

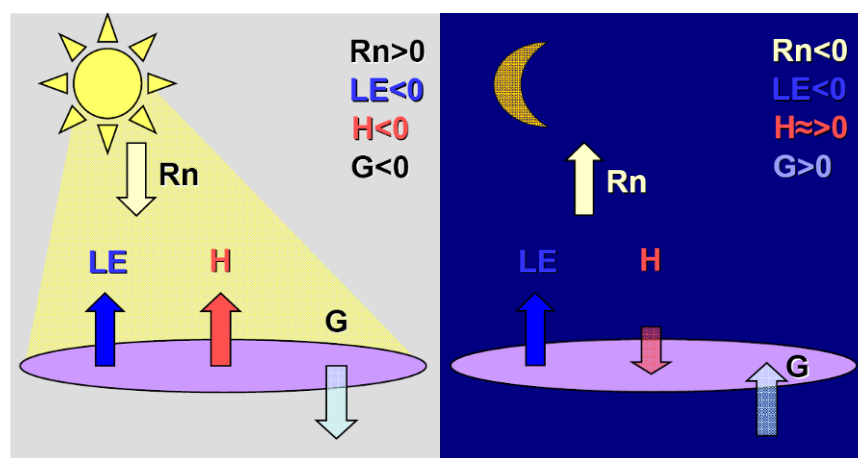


Figura 4 - Schematizzazione del bilancio energetico diurno (a sinistra) e notturno (a destra) (da *Burba e Anderson, 2005*).

Il bilancio espresso attraverso l'equazione (5-26) risulta in realtà composto da una quota proveniente dal suolo e una quota proveniente dalla canopy:

$$R_{n,s} - G_0 = H_s + \lambda E_s \quad (5-27)$$

$$R_{n,c} = H_c + \lambda E_c \quad (5-28)$$

dove con i pedici  $s$  e  $c$  si indicano rispettivamente la frazione suolo e la frazione canopy.

Circa il 90% dell'energia del sistema viene suddivisa tra il calore sensibile  $H$  e il calore latente  $\lambda E$ , restituita poi all'atmosfera attraverso la diffusione turbolenta (Brivio *et al.*, 2006). Il rapporto tra questi due termini prende il nome di *rapporto di Bowen* (Bowen, 1926, Lewis, 1995).

Di seguito sono descritte brevemente le componenti del bilancio.

### 5.1 La radiazione netta

La radiazione solare costituisce la fonte di energia primaria del bilancio energetico.

La radiazione netta  $R_n$  è la quantità di energia disponibile alla superficie terrestre che può essere trasformata in altre forme di energia. Essa è data dalla differenza fra i flussi in entrata e in uscita rispetto alla superficie:

$$R_n = R_{\downarrow} - R_{\uparrow} \quad (5.1-29)$$

Essendo la radiazione composta dalla radiazione a onde corte  $R_{sw}$ , o *short wave* (0.3-0.35  $\mu\text{m}$ ), e dalla radiazione a onde lunghe  $R_{lw}$ , o *long wave* ( $>0.35 \mu\text{m}$ ), l'equazione (5.1-29) può essere riscritta come:

$$R_n = (R_{sw\downarrow} - R_{sw\uparrow}) + (R_{lw\downarrow} - R_{lw\uparrow}) \quad (5.1-30)$$

$$= (1 - \alpha)R_{sw\downarrow} + R_{lw\downarrow} - R_{lw\uparrow} \quad (5.1-31)$$

dove  $\alpha$  è l'*albedo*, ovvero la frazione della radiazione netta a onde corte che viene riflessa dalle superfici. L'albedo varia in funzione del tipo di superficie, della copertura vegetale, del colore del suolo o della vegetazione, della rugosità della superficie, del contenuto di acqua (Campbell e Norman, 1998) e dell'angolo zenitale solare, infatti varia durante l'arco della giornata (Robinson, 1966).

Durante la notte, per assenza della  $R_{sw}$ , l'equazione di bilancio della radiazione (5.1-31) si riduce ai due termini,  $R_{lw\downarrow}$  e  $R_{lw\uparrow}$  e il valore di  $R_n$  diventa negativo.

Le componenti della radiazione sono misurate attraverso la strumentazione presente *in situ* dalle stazioni meteorologiche. Qualora non si disponesse di stazioni al suolo esse possono essere stimate attraverso modelli (Allen *et al.*, 1998).

La radiazione netta a onde corte ( $R_{nsw}$ ) può essere determinata a partire da modelli di insolazione che simulano le condizioni di illuminazione di un certo sito in funzione del tempo (ora, giorno, mese) e della posizione geografica (latitudine, longitudine); i modelli possono tenere conto anche della pendenza, dell'esposizione e delle ombre, particolarmente importanti per le zone di montagna;

Anche la radiazione netta ad onde lunghe in ingresso ( $R_{nlw}$ ) può essere ricavata, in questo caso a partire dalle misure di temperatura e umidità relativa dell'aria attraverso la relazione:

$$R_{nlw} = \varepsilon_0 \left[ 1.23 \left( \frac{e_a}{T_a} \right)^{1/7} \right] \sigma T_a^4 - \varepsilon_0 \sigma T_{RAD}^4 \quad (5.1-32)$$

dove  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzman [ $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ],  $\varepsilon_0$  è l'emissività della superficie,  $T_a$  e  $T_{RAD}$  [K] rappresentano la temperatura dell'aria e della superficie, il termine tra parentesi quadre rappresenta l'emissività apparente dell'atmosfera ( $\varepsilon'$ ) che è legata alla pressione di vapore  $e_a$  (Brutsaert e Sugita, 1982);  $\varepsilon_0$  assume valori da 0.97 a 0.98 rispettivamente per suolo e canopy.

La  $R_n$  è scomponibile in due frazioni come già descritto nelle equazioni (5-27) e (5-28), utilizzando la legge di Beer (Anderson *et al.*, 1997, Norman *et al.*, 1995) si ottiene:

$$R_{n,s} = R_n e^{-kLAI} \quad (5.1-33)$$

$$R_{n,c} = R_n (1 - e^{-kLAI}) \quad (5.1-34)$$

## 5.2 Il flusso di calore nel suolo

Il flusso di calore  $G_0$  è la frazione di radiazione solare assorbita dal suolo. Normalmente è misurata attraverso sensori misurati al di sotto della superficie e segue la legge di Fourier:

$$G_0 = -\lambda_g \frac{T_s - T_d}{\Delta z} \quad (5.2-35)$$

in cui  $\Delta z$  [m] è la profondità dello strato in cui si esegue la misura,  $T_s$  e  $T_d$  [K] sono le temperature rispettivamente in superficie e alla profondità  $\Delta z$  e  $\lambda_g$  è la conduttività termica del suolo [ $W m^{-1} K^{-1}$ ].

$G_0$  può essere espresso in termini di variazione della temperatura nello spazio e nel tempo:

$$\rho_s C_s \frac{\partial T(z)}{\partial t} = \frac{\partial G(z)}{\partial z} \quad (5.2-36)$$

dove  $\rho_s$  [ $kg m^{-3}$ ] è la densità del suolo,  $C_s$  [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ] è il calore specifico del suolo e  $t$  è il tempo [s]. Il termine  $\rho_s C_s$  si definisce come capacità volumetrica di calore e dipende dal tipo di suolo, dal colore e dall'umidità; il segno negativo nell'equazione indica che  $G_0$  è positivo quando il gradiente di temperatura è negativo.

Sulla modellizzazione delle proprietà termiche sono stati condotti numerosi studi (Campbell, 1985, Johansen, 1975).

## 5.3 I flussi di calore sensibile e calore latente

Il flusso di calore sensibile  $H$  tra la superficie e l'atmosfera dipende dalla differenza fra la temperatura della superficie,  $T_s$ , o della copertura vegetale, e la temperatura dell'aria  $T_a$  all'interno della canopy:

$$H = \rho_a c_p \frac{T_s - T_a}{r_a} \quad (5.3-37)$$

in cui  $\rho_a$  [ $kg m^{-3}$ ] è la densità dell'aria,  $c_p$  è il calore specifico dell'aria a pressione costante [ $J kg^{-1} K^{-1}$ ] e  $r_a$  [ $s m^{-1}$ ] è la resistenza aerodinamica fra la superficie e l'altezza di riferimento  $z_T$ .

Il flusso di calore latente  $\lambda E$ , invece, è ricavabile attraverso l'equazione:

$$\lambda E = \frac{\rho_a c_p}{\gamma} \left( \frac{e_s - e_a}{r_a} \right) \quad (5.3-38)$$

le cui componenti sono già state descritte in equazioni precedenti.

Il valore di  $r_a$  è una funzione piuttosto complessa di diversi parametri geometrici e meteorologici, quali la rugosità della superficie e la velocità del vento e viene descritta attraverso un modello di diffusione turbolenta, che in condizioni di calore sensibile basso, assume la seguente forma:

$$r_a = \frac{\ln \left( \frac{z_T - d_0}{z_{0h}} \right) - \Psi_h}{k_v u_*} \quad (5.3-39)$$

dove  $z_T$  [m] rappresenta l'altezza a cui viene misurata la temperatura dell'aria e, quindi, l'umidità,  $d_0$  [m] è il piano zero,  $z_{0h}$  [m] è la lunghezza di rugosità della superficie,  $k_v$  [-] è la costante di von Karman [ $\cong 0.41$ ],  $u_*$  [ $m s^{-1}$ ] è la

velocità del vento all'altezza  $z_T$ ,  $\Psi_h$  è una funzione che esprime le condizioni di stabilità dell'atmosfera (Monteith e Unsworth, 2008). Il trasferimento di calore risulta più efficiente al diminuire della resistenza aerodinamica, cioè quanto è maggiore la rugosità superficiale ( $z_{0h}$ ) e la velocità del vento ( $u_*$ ). Il termine  $z_{0h}$  è legato alla conduttanza dello strato limite che descrive come l'altezza e altre caratteristiche strutturali della vegetazione modificano il profilo della velocità del vento all'interno dello strato vegetale e definisce l'altezza alla quale la velocità media del vento si annulla ( $d_0$ ); la zona di calma di vento è molto importante in quanto i flussi di calore sensibile e latente la devono passare questa zona (attraverso il fenomeno della conduzione) prima di entrare nello strato convettivo.

Calcolare  $H$  e  $\lambda E$  richiede, quindi, la velocità del vento, la temperatura dell'aria e l'umidità al di sopra della superficie, ma anche la temperatura aerodinamica e la pressione di vapore dello strato considerato; queste sono variabili generalmente non note e difficili da misurare data l'eterogeneità delle superfici.

Per la stima di  $H$  e  $\lambda E$  esistono in letteratura due tipologie di modelli; utilizzando la stessa analogia con il circuito elettrico utilizzata per il bilancio idrico (paragrafo 4.1) si distinguono i modelli che seguono uno schema *in serie* e modelli che seguono lo schema *in parallelo*.

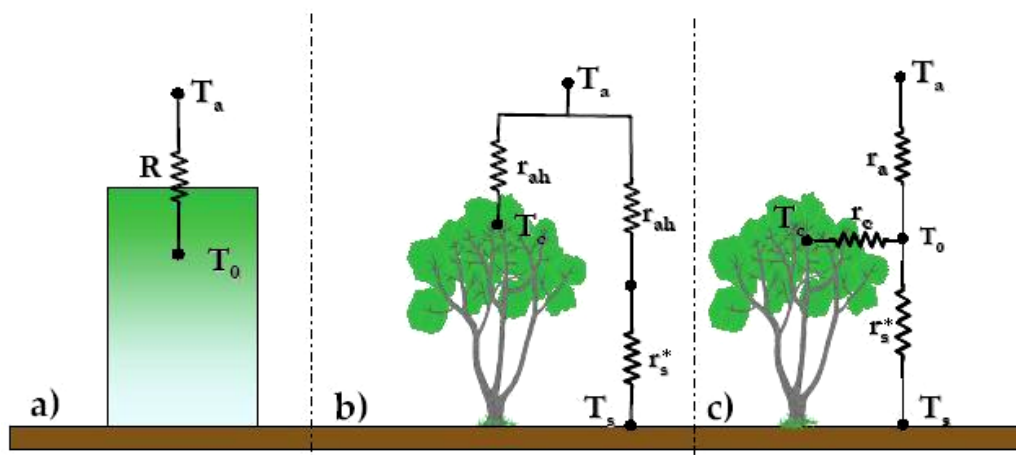


Figura 5 - Schematizzazioni suolo-canopy nella modellazione dei flussi energetici: a) schema "single source", b) schema "two source" in parallelo; c) schema "two source" in serie (da Agnese et al., 2008).

### 5.3.1 Approccio big-leaf per la stima di $\lambda E$

Lo schema in serie (Figura 5 a), chiamato anche *big-leaf*, è stato proposto da Penman (1948) che introduce una resistenza in serie a quella dell'aria che tiene conto della resistenza degli stomi al flusso di vapore ed è chiamata resistenza stomatica ( $r_s$ ). Successivamente Monteith (1965) introduce il concetto vero e proprio di *big-leaf*, ovvero considera la canopy come un'unica foglia posta ad altezza ( $d_0+z_{0h}$ ) all'interno della coltura.

Sulla base di queste modifiche l'equazione (5.3-38) diventa:

$$\lambda E = \frac{\rho_a c_p}{\gamma} \left( \frac{e_s - e_a}{r_a + r_s} \right) \quad (5.3.1-40)$$

Considerando la pressione di vapore a saturazione ( $e_s$ ) come:

$$e_s = e_a + \Delta(T_0 - T_a) \quad (5.3.1-41)$$

dove  $\Delta$  è la pendenza della curva di pressione di vapore,  $T_0$  e  $T_a$  sono rispettivamente le temperature a saturazione e attuale della pressione di vapore, e combinando le equazioni (5.3-40), (5.3-41) a quella del calcolo di  $H$  (equazione

5.3-37), si ottiene la ben nota equazione di Penman-Monteith (equazione 4.3.1-14) utilizzata per il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento nel quaderno 56 della FAO (Allen et al., 1996)

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_{ss}}{r_a}\right)} \quad (4.3.1-14)$$

### 5.3.2 Approccio two-source per la stima di $\lambda E$

Il modello *in parallelo*, chiamato anche *two-source* proposto da Norman et al. (1995) considera la canopy e il suolo come due componenti del sistema separati. Le equazioni (5.3-37) e (5.3-38) diventano:

$$H = H_s + H_c = \rho_a c_p \left( \frac{T_c - T_a}{r_a} + \frac{T_s - T_a}{r_a + r_s^*} \right) \quad (5.3.2-42)$$

$$\lambda E = \lambda E_s + \lambda E_c = \frac{\rho_a c_p}{\gamma} \left( \frac{e_c - e_a}{r_a + r_s} + \frac{e_s - e_a}{r_a + r_s^* + r_{ss}} \right) \quad (5.3.2-43)$$

dove  $r_s^*$  [ $s m^{-1}$ ] è la resistenza al flusso di calore dello strato limite al di sopra del suolo e  $r_{ss}$  [ $s m^{-1}$ ] è la resistenza del suolo al flusso di vapore.

Lo schema in parallelo delle resistenze consente di stimare in modo più corretto  $\lambda E$  in condizioni di scarsa copertura del suolo (Norman et al., 2000).

Considerando le interazioni tra canopy/suolo e flussi generati, come nel modello *in serie*, H e  $\lambda E$  assumono la forma seguente:

$$H = H_s + H_c = \rho_a c_p \left( \frac{T_s - T_0}{r_s^*} + \frac{T_c - T_0}{r_x} \right) \quad (5.3.2-44)$$

$$\lambda E = \lambda E_s + \lambda E_c = \frac{\rho_a c_p}{\gamma} \left( \frac{e_s - e_a}{r_s^* + r_{ss}} + \frac{e_c - e_a}{r_x + r_s} \right) \quad (5.3.2-45)$$

dove  $r_x$  [ $s m^{-1}$ ] è la resistenza dello strato limite della canopy che rappresenta la resistenza del sottile strato di aria chiuso alla superficie delle foglie (Nobel, 2005).

Il termine  $T_0$  che compare nell'equazione (5.3.2-44) è calcolato come:

$$T_0 = \frac{\frac{T_a}{r_a} + \frac{T_s}{r_s^*} + \frac{T_c}{r_x}}{\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_s^*} + \frac{1}{r_x}} \quad (5.3.2-46)$$

Analogamente  $e_0$  diventa:

$$e_0 = \frac{\frac{e_a}{r_a} + \frac{e_s}{r_s^* + r_{ss}} + \frac{e_c}{r_x + r_s}}{\frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_s^* + r_{ss}} + \frac{1}{r_x + r_s}} \quad (5.3.2-47)$$

Adottando la stessa ipotesi dell'approccio big-leaf,  $e_s$  e  $e_c$  possono essere calcolate assumendo che l'aria dello spazio stomatico nelle foglie e l'aria nel suolo possa essere saturato, e che  $e_s$  e  $e_c$  sono calcolabili come:

$$e_s = e_a^* + \Delta(T_s - T_a) \quad (5.3.2-48)$$

$$e_c = e_a^* + \Delta(T_c - T_a) \quad (5.3.2-49)$$

Di fatto, dato  $R_n$ , i modelli proposti stimano  $H$  e  $G_0$  e calcolano  $\lambda E$  come termine residuo del bilancio, per questo l'approccio viene chiamato anche come Residual Source Energy Balance.

Il termine  $T_0$  (eq. 5.3-46) viene sostituito dalla temperatura radiometrica ( $T_{RAD}$ ) ma, essendo il modello two-source nato per essere implementato con dati provenienti da Remote Sensing, l'errore sulla stima di questa temperatura per colture con scarsa copertura può essere elevato (*Troufleau et al.*, 1997). Per questo motivo *Kustas e Norman* (1999) hanno proposto una modifica al modello che tiene conto del contributo di temperatura apportato dalle singole componenti, suolo e canopy. Il calcolo della temperatura radiometrica diventa:

$$T_{RAD} = \left[ f_c T_c^4 + (1 - f_c) T_s^4 \right]^{1/4} \quad (5.3.2-50)$$

dove  $f_c$  è la fraction cover.



---

**SEZIONE III**  
**MATERIALI E METODI**

---

## 6 L'area studio

L'attività sperimentale è stata condotta presso l'azienda agricola vitivinicola "San Nicola", all'interno dell'oasi del WWF Gorgi Tondi (Figura 6), situata a Mazara del Vallo, provincia di Trapani (coordinate Lat 37°35'55" - Long 12°38'51") nel periodo 05/05/2010 – 11/08/2010. Questa azienda ha una estensione di circa 150 ha, destinati a vitigni autoctoni, tra cui il Grillo, lo Zibibbo, la Malvasia, l'Insolia e il Nero d'Avolasia, e a vitigni tradizionali, come lo Chardonnay, il Syrah ed il Merlot.

Il campo oggetto di studio è di circa 3 ha destinato a *Grillo*, allevato a spalliera e potato con il sistema a Guyot, l'anno di impianto è il 2003, quindi si tratta di un vigneto "giovane" rispetto all'età media dei vigneti italiani; il sesto di impianto è di 0.90 m sulla fila e 2.30 m sull'interfila, l'altezza delle piante raggiunge 1.50 m a piena maturazione, e il portinnesto utilizzato è il 420 A.

L'azienda ha predisposto un impianto di irrigazione a goccia (Figura 7) e generalmente effettua 1 o 2 interventi irrigui di soccorso, in funzione dell'andamento climatico; nel periodo di sperimentazione non sono state effettuate irrigazioni.



Figura 6 - Localizzazione geografica dell'azienda (a sinistra) e del campo sperimentale (a destra).



Figura 7 - Dettagli del campo sperimentale.

## 6.1 Il vitigno: scheda descrittiva

Il Grillo è un vitigno a bacca bianca particolarmente diffuso nella provincia di Trapani (zone di Marsala e di Mazara del Vallo), dove costituisce il vitigno base per la produzione del vino DOC *Marsala*, mentre è meno presente nelle province di Palermo, Agrigento, Messina e Caltanissetta (Bica, 2007). L'origine di questo vitigno è praticamente sconosciuta e la prima notizia relativa alla sua coltivazione in Sicilia risale al 1873, Secondo alcuni autori sarebbe stato importato in Sicilia dalla Puglia dopo l'invasione della fillossera.

### CARATTERI MORFOLOGICI:

**GERMOGLIO:** apice molto lanuginoso, di colore verde biancastro con una leggera sfumatura ramata e poche macchioline rossastre ai margini. Foglioline apicali (1-3): pentalobate, pagina superiore cotonosa, le prime due di colore verde chiaro biancastro, la terza bronzata tra le nervature e verde sulle nervature. Pagina inferiore cotonosa, di colore biancastro verde chiaro con sfumature bronzate sulla terza fogliolina. Foglioline basali (4-6): pentalobate, a volte appena eptalobate, pagina superiore da lanuginosa ad aracnoidea con note bronzate particolarmente evidenti sulla 4a e 5a fogliolina. Pagina inferiore da lanuginosa ad aracnoidea, di colore verde con sfumature bronzate tra le nervature.

**TRALCIO ERBACEO:** contorno da quasi liscio a leggermente angoloso, di colore verde con leggere striature rossastre sulla parte esposta al sole; tratto apicale ricurvo o molto ricurvo. Viticci: generalmente trifidi, mediamente lunghi (20-25 cm), di colore verde con parte terminale di colore rossastro.

**FOGLIA ADULTA:** da media a grande, di forma orbicolare (più spesso) o pentagonale, generalmente pentalobata, talvolta eptalobata. Pagina superiore glabra, di colore verde intenso con punto peziolare leggermente rosato. Profilo del lembo a coppa con margini molto ondulati e/o tormentati, superficie debolmente bollosa. Denti mediamente pronunciati, irregolari, alcuni a base larga, altri a base stretta, con margini generalmente rettilineo-convessi o concavi-convessi, a volte rettilinei. Seno peziolare generalmente a V, talvolta a graffa o a lira, chiuso con bordi che tendono a toccarsi o a sovrapporsi. Seni laterali superiori a U o a lira. Pagina inferiore di colore verde chiaro con nervature di colore rosso vinoso alla base, aracnoidea sulle nervature e quasi glabra tra le nervature; presenza di ciuffetti di setoline alla base delle nervature principali e secondarie. Picciolo di lunghezza uguale o maggiore rispetto la nervatura principale mediana, di colore giallo verde sulla parte in ombra e sul tratto basale del lato esposto, di colore rosso vinoso sulla restante parte.

**GRAPPOLO:** medio-grosso, generalmente conico, a volte cilindro-conico, spesso spargolo; peduncolo corto, di colore verde rosato, rachide e pedicelli di colore verde.

**ACINO:** medio-grande o grande (3,30 g), da rotondo a leggermente appiattito (D.L./D.T.=0,99). Buccia debolmente pruinosa, di colore verde giallo con sfumature rosa aranciate di intensità variabile in funzione dell'esposizione al sole.

**TRALCIO LEGNOSO:** internodi da medio corti a medi, sezione trasversale quasi circolare tendente all'ellittico, superficie un po' striata di colore nocciola grigiastro; nodi più scuri, di colore bruno rossastro.

**CLONI SELEZIONATI:** nessuno, la selezione clonale è attualmente in corso.

### PRINCIPALI ASPETTI AGRONOMICI E FENOLOGICI:

**VIGORIA:** buona.

**FORMA DI ALLEVAMENTO E POTATURA:** tradizionalmente allevato ad alberello marsalese (senza sostegno), predilige la potatura mista (Guyot).

COMPORTAMENTO ALLA MOLTIPLICAZIONE: ottima affinità con il portinnesto 420 A, buona con gran parte dei portinnesti del gruppo V. Berlandieri x V. rupestris, ad eccezione del 1103 P.

PRODUTTIVITÀ: medio-buona, spesso irregolare.

RESISTENZA ALLE CRITTOGAME: mediamente resistente all'oidio, un po' meno alla peronospora.

EPOCA DI GERMOGLIAMENTO: media (ultima decade di marzo).

EPOCA DI MATURAZIONE: media (fine settembre).

## 6.2 Caratterizzazione climatica dell'area

Dal punto di vista climatico, l'area è caratterizzata dal tipico clima mediterraneo (Drago, 2005), con le piogge concentrate nel periodo autunno-vernino, mentre risultano scarse durante il periodo primaverile-estivo, quando le temperature e, di conseguenza, la domanda evapotraspirativa è più alta. Nel periodo dell'esperimento si sono avute  $T_{\min}$  di 10 °C,  $T_{\max}$  di 35 °C e  $T_{\text{medie}}$  di 22 °C, una piovosità di circa 30 mm, un'umidità relativa media del 74% e una velocità media del vento di 3 m s<sup>-1</sup>. Gli andamenti climatici sono riportati a seguire dal Grafico 2 al Grafico 5.

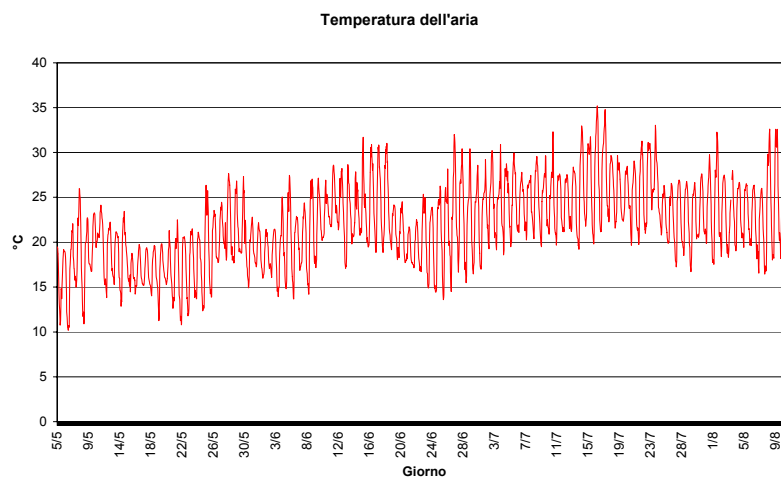


Grafico 2 - Andamento della temperatura dal 05/05/2010 al 11/08/2010 nel campo sperimentale.

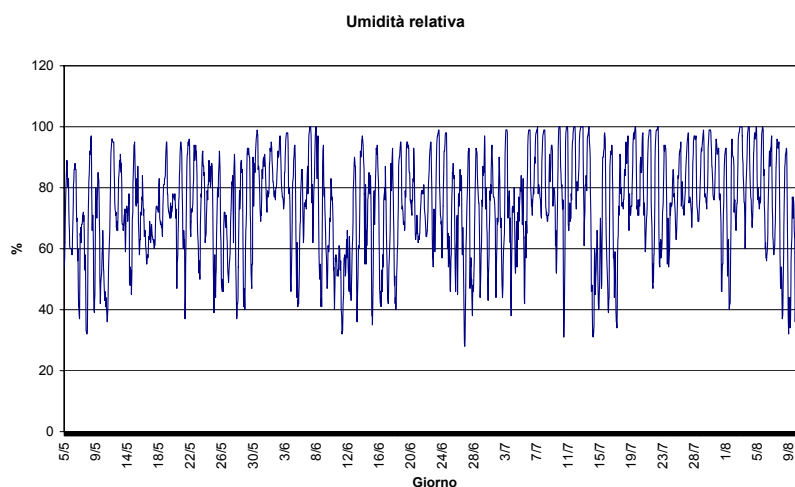


Grafico 3 - Andamento dell'umidità relativa dal 05/05/2010 al 11/08/2010 nel campo sperimentale.

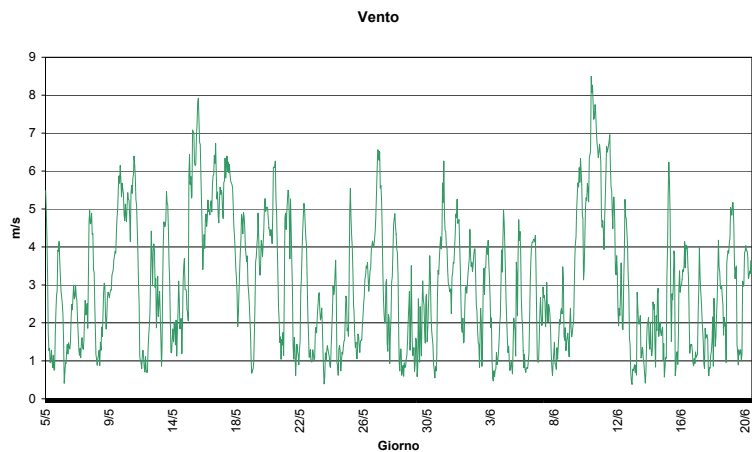


Grafico 4 - Andamento della velocità del vento dal 05/05/2010 al 20/06/2010 nel campo sperimentale (queste misure non sono presenti per tutto il periodo a causa di un guasto della strumentazione).

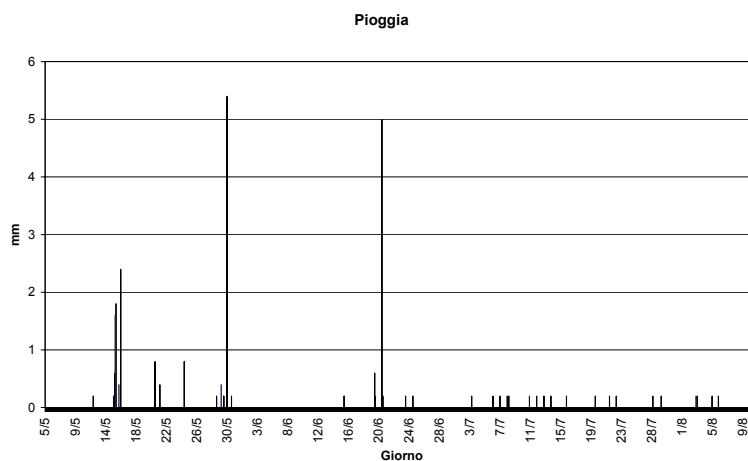


Grafico 5 - Andamento delle piogge dal 05/05/2010 al 11/08/2010 nel campo sperimentale.

### 6.3 Determinazione delle proprietà idrauliche del suolo.

Non potendo effettuare misure dirette sui campioni per stimare la curva di ritenzione e la curva di conducibilità idraulica, si è ricorsi a un metodo indiretto. In letteratura trova ampio spazio l'uso delle funzioni di pedotransfer (PTF) che permettono di ricavare queste curve dalle proprietà fisico-chimiche dei suoli, quali la tessitura, il contenuto di sostanza organica e la densità apparente, disponibili con le normali analisi di laboratorio (*Bouma, 1969, Schaap, 2004*). La misura delle proprietà idrauliche su campioni indisturbati di suolo presenta, però, diverse difficoltà sia in fase di campionamento che di elaborazione del dato, e spesso presenta una scarsa rappresentatività nelle applicazioni a scala di campo, a causa del piccolo volume investigato. In questi casi, può essere preferibile ricorrere a tecniche di stima delle proprietà idrauliche basate sull'inversione del bilancio idrologico, basato sull'equazione di Richards, utilizzando le misure di contenuto d'acqua a diverse profondità.

L'inversione è basata su una procedura di ottimizzazione che iterativamente adatta i parametri idraulici del suolo ai dati forniti in input, quali i dati meteo e le misure di contenuto idrico effettuate in campo.

Il software utilizzato per la procedura di inversione è HYDRUS-1D (Šimůnek *et al.*, 1998), dotato di un'interfaccia per la pre-elaborazione dei dati, la discretizzazione del profilo del suolo e la presentazione grafica dei risultati. Il software permette di impostare il:

- *Main Processes*, che considera il flusso d'acqua transitorio lungo il profilo dello sviluppo radicale, calcolato tramite l'equazione di Richards;
- *Soil Hydraulic Model*, propone il modello per determinare il contenuto idrico e la conducibilità idraulica; si è scelto il modello di van Genuchten, trascurando i fenomeni di isteresi;
- *Time Variable Boundary Conditions*, prevede l'inserimento dei dati meteo, della componente evaporativa e traspirativa calcolate utilizzando l'equazione di Ritchie;
- *Data for Inverse Solution*, permettere di immettere il contenuto di acqua al tempo X e ai nodi del profilo del suolo.

Come ipotesi iniziale sulla *Geometry* si è impostato un suolo della profondità di 1 metro e costituito da 3 strati con caratteristiche granulometriche e di densità differenti e 4 strati per il bilancio di massa che indicano l'entità del flusso di entrata e di uscita. Le prime sequenze di elaborazione hanno mostrato l'effettiva suddivisione del suolo in 3 strati, il primo che va da 0 a 10 cm, il secondo da 10 a 40 cm e il terzo da 40 a 100 cm.

Per la caratterizzazione dell'apparato radicale non è stato possibile effettuare una verifica in campo in quanto questa analisi avrebbe compromesso le funzioni fisiologiche della coltura (Agnese *et al.*, 2008), comportando un danno all'azienda. Quindi è stata adottata la distribuzione dell'apparato radicale proposta da van Zyl e Weber (1981), in cui la densità delle radici della *Vitis vinifera* L. è concentrata maggiormente tra i 30 ed i 50 cm di profondità (Figura 8).

La definizione delle condizioni iniziali del potenziale idrico è di notevole importanza ai fini della simulazione; questa operazione è stata effettuata partendo dai valori misurati con i TDR alle diverse profondità al tempo zero, considerando i profili di esaurimento; in superficie la perdita di acqua è maggiore a causa dell'evaporazione, mentre con l'aumentare della profondità aumenta anche il contenuto idrico (Figura 8).

Per le condizioni al contorno inferiore si è ipotizzato il drenaggio libero dell'acqua.

I risultati ottenuti sono riportati nel capitolo 9.

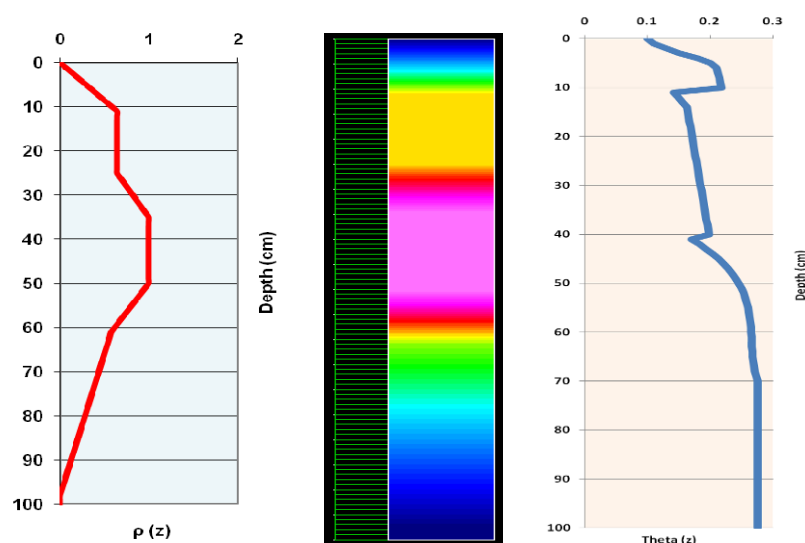


Figura 8 - Modello della distribuzione radicale utilizzato (a sinistra), distribuzione delle radici in Hydrus (al centro) e distribuzione del contenuto idrico iniziale (a destra).

## 7 L'esperimento

Per poter stimare la traspirazione e l'evaporazione è stato necessario acquisire i dati necessari per l'implementazione dei modelli esposti nella sezione II, riportati nella seguente tabella:

| Dato richiesto                             | SWAP | TSEB |
|--|------|------|
| Parametri idraulici del suolo              | Sì   | No   |
| Monitoraggio meteorologico                 | Sì   | Sì   |
| Misure di LAI e della canopy               | Sì   | Sì   |
| Temperature radiometriche delle componenti | No   | Sì   |
| Immagini spettroradiometriche              | No   | Sì   |

Tabella 1- Dati richiesti dai modelli SWAP e TSEB.

La sequenza delle operazioni è stata:

1. installazione degli strumenti di misurazione;
2. determinazione dei parametri vegetazionali (albedo, LAI e copertura del suolo);
3. acquisizione dei dati spettroradiometrici e termometrici;
4. applicazione del metodo del quaderno FAO-56 con i parametri vegetazionali precedentemente determinati per calcolare l' $ET_0$ ;
5. implementazione ed adattamento dei modelli citati per l'individuazione delle condizioni di stress idrico.

La stazione micro-meteorologica utilizzata è basata sul sistema Sonic-Eddy-Covariance (SEC).

Il cuore della strumentazione è costituito da un anemometro sonico (CSAT3-3D, *Campbell Scientific Inc.*) e un igrometro al cripton (KH20, *Campbell Scientific Inc.*), posti all'altezza di 3.70 m (a 2 m circa dal limite superiore della vegetazione), che misurano la velocità del vento nelle 3 direzioni e la concentrazione di  $H_2O$ ; importante è l'orientamento dell'anemometro rispetto alla direzione del vento dominante (in questo caso è Sud-Sud Ovest) e la vicinanza dell'anemometro all'igrometro (Figura 9, a sinistra).

Il radiometro netto (CNR1, *Campbell Scientific Inc.*), posto al disopra dell'anemometro, all'altezza di 4 m dal suolo, ma non allineato ai due strumenti precedenti, per evitare il disturbo nella misura della componente riflessa; questo radiometro è in grado di misurare tutte le componenti della radiazione (radiazione a onde corte e lunghe, incidente e riflessa).

Il termo-igrometro (HMP45C, *Campbell Scientific Inc.*), posto all'altezza di 1.70 m dal suolo, misura la temperatura e l'umidità dell'aria.

Il barometro (RPT410F CS106, *Campbell Scientific Inc.*) è posto sul corpo centrale, misura la pressione atmosferica. Il pluviometro non è stato previsto all'interno di questa installazione, in quanto i dati di pioggia sono stati forniti dalla stazione meteo aziendale situata a circa 100 m dal sito sperimentale.

Per la misura del flusso di calore nel suolo il metodo SEC prevede due termocoppie (TCAV-L, *Campbell Scientific Inc.*), due piastre di flusso (HFP01SC, *Campbell Scientific Inc.*) e un riflettometro (CS616, *Campbell Scientific Inc.*) il cui schema di installazione è mostrato in Figura 10 (a sinistra). Sono state utilizzati due gruppi di questa



strumentazione lungo una diagonale sull'interfila in modo da monitorare sia il lato dell'interfila esposto più alla luce sia quello sottoposto all'ombra (Figura 10, a destra).



Figura 9 - Stazione micro-meteorologica SEC (a sinistra) e termometro a infrarosso (a destra).

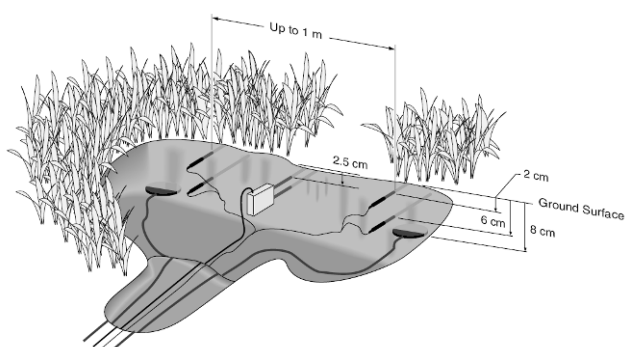


Figura 10 - Schema di installazione della strumentazione per la misura del flusso di calore nel suolo.

In aggiunta alla strumentazione di base SEC sono stati previsti quattro termometri a infrarosso (MI210, *Apogee Instruments Inc.*), disposti uno sulla vegetazione, uno sul suolo e due per il rilievo della temperatura radiometrica del complesso suolo-vegetazione (Figura 9, a destra).

A completare la stazione i due datalogger (CR3000 e CR1000, *Campbell Scientific Inc.*) per la registrazione dei dati e il pannello solare per l'alimentazione del sistema.

Grazie alla collaborazione dell'Università degli Studi di Palermo è stato possibile in contemporanea installare la strumentazione TDR (TDR100, *Campbell Scientific Inc.*) e SAP-FLOW (SFM, *ICT International Phyto-IT*); sono state utilizzate 3 sonde TDR per ciascuno dei 4 profili con lo scopo di monitorare il contenuto idrico del suolo per uno spessore di 0.80 m (lo schema di installazione è mostrato in Figura 11 a sinistra) e 3 sonde SAP-FLOW per monitorare il flusso xilematico di 3 piante (Figura 11 a destra).



Nel periodo di monitoraggio dei dati ambientali sono state effettuate due campagne di misure di LAI (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer, *Li-Cor*) in data 05/05/2010 e 19/06/2010; seguendo lo schema in Figura 12, ogni misura è stata eseguita effettuando 2 ripetizioni di 8 misure più una di riferimento con un'ottica di 270°.

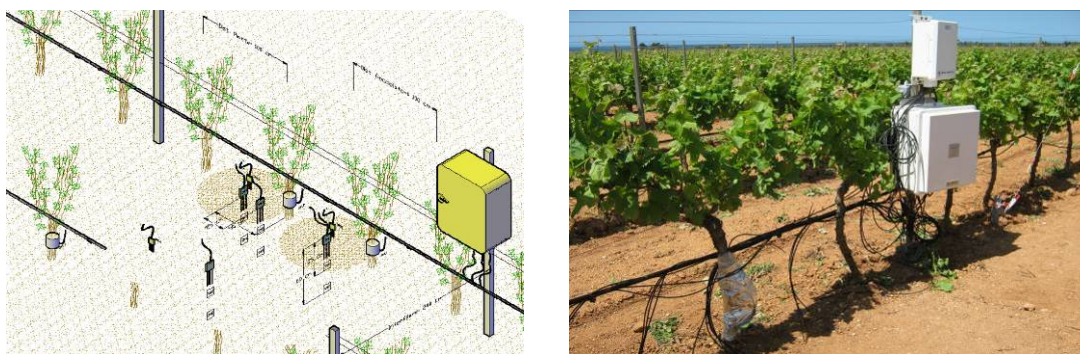


Figura 11 - Schema di installazione delle sonde TDR (a sinistra) e SAP-FLOW (a destra).

Grazie alla collaborazione con l'Università degli studi di Palermo è stato possibile acquisire 11 immagini nel campo del visibile (VIS), dell'infrarosso vicino (NIR) e del termico; sono stati utilizzati uno spettroradiometro (Mini MCA, *TETRACAM. Inc.*) e una termocamera (SC305, *FLIR System Inc.*), posti ad all'altezza di 4 m dal suolo (Figura 13), e un termometro IR (Enviro-Therm 4000L, *Everest Interscience Instruments*) per ulteriori misure puntuali di temperatura radiometrica ed effettuare la calibrazione dei 4 termometri IR già precedentemente installati. Le acquisizioni sono avvenute nei giorni 10 e 11 agosto 2010.

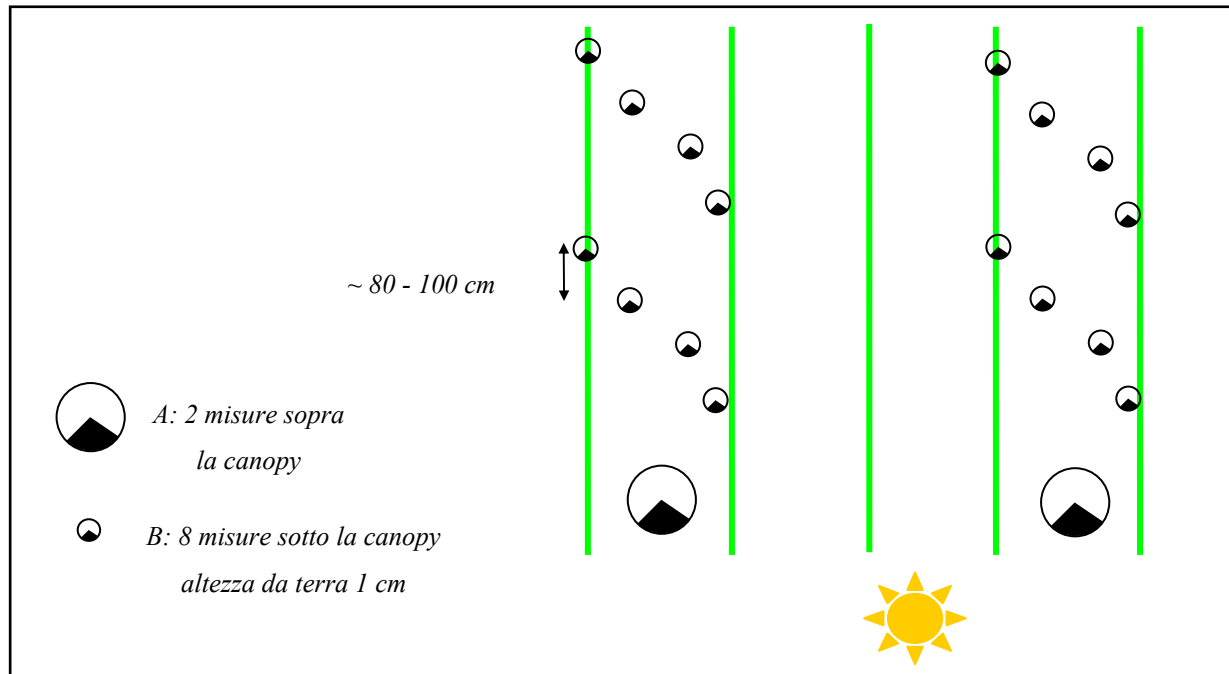


Figura 12 - Schema utilizzato per effettuare una singola misura di LAI (Indice di Area Fogliare). Le linee in verde sono i filari, i cerchi grandi sono le misure di riferimento sopra chioma, mentre i cerchi piccoli sono le misure sottochioma; la posizione del sole è sempre alle spalle.



Figura 13 - Installazione della termocamera, dello spettroradiometro e di un ulteriore termometro.

## 8 Approccio fisico delle tecniche di misurazione

### 8.1 Teoria delle misure micro-meteorologiche

La tecnica Sonic Eddy Covariance (SEC) misura gli scambi di carbonio, acqua ed energia a livello di ecosistema. Le misure avvengono in continuo, su larga scala e senza disturbare il sistema misurato (*Xiloyannis et al., 2004*). Questa tecnica può essere applicata a diversi ecosistemi, dalle superfici forestali alle superfici agricole. Negli ultimi anni si sono sviluppate reti di monitoraggio che comprendono numerose stazioni eddy covariance, che integrano i dati su scala nazionale, europea e mondiale; un esempio sono CAROBEUROFLUX per l'Europa, AMERIFLUX per gli Stati Uniti, ASIAFLUX per l'Asia, FLUXNET a scala mondiale (*Valentini et al. 1999*).

I flussi sono calcolati come la covarianza tra le fluttuazioni della velocità verticale del vento e dello scalare. I dati vengono acquisiti in continuo e mediati su un periodo che solitamente è di 30 minuti (*Baldocchi, 1988, Baldocchi et al., 1996*). Per convenzione flussi positivi indicano i flussi di massa ed energia diretti dalla superficie all'atmosfera, i flussi negativi indicano i flussi diretti dall'atmosfera alla biosfera. I dati integrano i flussi generati su di una superficie posta sopravvento al punto di campionamento, di dimensioni che possono arrivare a qualche km<sup>2</sup>, a seconda dell'altezza di campionamento e delle caratteristiche atmosferiche. Il sistema standard è composto da un anemometro sonico tridimensionale, un analizzatore ad infrarossi e un computer per acquisire i dati e per calcolare i flussi (*Aubinet et al., 2000*). Le misure di flusso vengono completate da misure meteorologiche quali radiazione luminosa, temperatura del suolo e dell'aria e precipitazioni.

Il metodo SEC si basa sull'assunzione che il flusso d'aria può essere immaginato come un flusso orizzontale di numerosi vortici rotanti, ogni vortice ha componenti 3D, inclusa una componente verticale del vento. In Figura 14, il flusso d'aria è rappresentata dalla grande freccia che attraversa la stazione di misurazione ed è costituito da diverse dimensioni di vortici (*Kaimal e Finnigan, 1994, Swinbank, 1951, Wyngaard, 1990*)



Figura 14 - Il flusso dell'aria nel sistema (da *Burba e Anderson, 2005*).

Ogni singolo pacchetto di aria, chiamato “eddy” si può spostare verso l’alto o verso il basso (Figura 15) con una propria velocità ed è caratterizzata da una propria concentrazione, temperatura e umidità; quindi, nota la sua velocità, è noto anche il flusso.

Il principio alla base di questo metodo, quindi, è che il flusso verticale può essere calcolato come covarianza tra misurazioni di velocità verticale (i movimenti in alto e in basso) e la concentrazione della grandezza di interesse.

Queste misure richiedono strumentazioni molto sofisticate, perché le fluttuazioni turbolente sono molto rapide, e le variazioni della concentrazione, della densità o della temperatura sono molto piccole, pertanto devono essere misurate in modo veloce ed accurato.

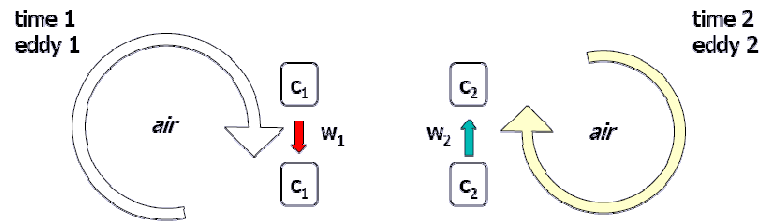


Figura 15 - Schematizzazione del SEC in un unico punto. “Eddy 1” si sposta in basso grazie al movimento del flusso di aria (freccia bianca) con una velocità  $w_1$ , mentre “eddy 2” si muove verso l’alto grazie al flusso di aria (freccia gialla) con una velocità  $w_2$ .

Dal punto di vista matematico il vento è un vettore in quanto definito da 3 componenti che per convenzione si orientano lungo gli assi  $x$  e  $y$ , posti nel piano orizzontale, e  $z$ , orientato nel piano verticale; le velocità del vento lungo le 3 direzioni  $x$ ,  $y$  e  $z$  sono chiamate rispettivamente  $u$ ,  $v$  e  $w$ . Considerando la componente verticale del vento ( $w$ ), la densità dell’aria ( $\rho_a$ ), è il generico scalare ( $\bar{s}$ ) e la sua deviazione istantanea ( $s'$ ), si può scrivere che il flusso  $F$  è uguale a:

$$F = \overline{\rho_a w s} \quad (8.1-51)$$

Assumendo che tutti gli “eddies” siano computati nella fluttuazione turbolenta, che sia applicabile la decomposizione di Reynolds e che la fluttuazione della densità dell’aria sia trascurabile (*Burba e Anderson, 2005, Baldocchi, 2005*) allora il flusso eddy è considerabile come quasi uguale a :

$$F \approx \overline{\rho_a w' s'} \quad (8.1-52)$$

Importanti per l’applicazione di questa metodologia sono le assunzioni, ovvero che:

- le fluttuazioni di densità si assumono trascurabili, anche se questo non sempre è vero, soprattutto in caso di venti forti la densità fluttuazioni il termine  $p'w'$  può essere grande e non deve essere ignorato; nella maggior parte dei casi quando la superficie è vasta è orizzontale, la fluttuazione della densità può essere tranquillamente assunta trascurabile;
- il flusso medio verticale si assume trascurabile quando il suolo è orizzontale e omogeneo, in modo che nessun flusso di deviazione/conversione possa avvenire. Ci sono prove, tuttavia, che se il sito sperimentale si trova, anche su un piccolo pendio, allora questa seconda ipotesi potrebbe non essere valida. È importante esaminare il sito specifico di sperimentazione in termini di deviazioni o conversioni per correggere gli eventuali errori.

Dall’equazione generale (8.1-51) si possono ricavare quelle per il calcolo del flusso di calore sensibile e di calore latente:

$$H = \rho_a C_a \overline{w' T'} \quad (8.1-53)$$

$$\lambda E = \rho_a c_p \overline{w' e'} \quad (8.1-54)$$

Le misure, ovviamente, non sono mai perfette, in quanto le ipotesi possono non essere rispettate, per problemi strumentali o per caratteristiche specifiche del sito. Nessuno di questi errori è banale in quanto possono costituire

oltre il cento per cento del valore iniziale del flusso misurato. Per ridurre al minimo gli errori esistono un certo numero di procedure di correzione all'interno della tecnica SEC (Tabella 2) (Foken e Oncley, 1995, Massman e Lee, 2002, Twine et al., 2000).

| Errori dati da               | Flussi affetti                                      | Range  | Tipo di correzione                      |
|------------------------------|---|--------|---|
| Frequenza di risposta        | tutti   | 5-30 % | correzione della risposta di frequenza  |
| Ritardo temporale            | tutti   | 5-15 % | aggiustamento del ritardo               |
| Picchi di rumore             | tutti   | 0-15 % | rimozione dei picchi                    |
| Non livellamento strumentale | tutti   | 0-25 % | rotazione coordinate                    |
| Fluttuazioni della densità   | H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> | 0-50 % | correzione Webb-Pearman-Leuning         |
| Errore del calore sonico     | calore sensibile                                    | 0-10 % | correzione della temperatura sonica     |
| Ampliamento della banda      | soprattutto CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>       | 0-20 % | correzione dell'ampliamento della banda |
| Ossigeno                     | H <sub>2</sub> O                                    | 0-10 % | correzione ossigeno                     |
| Dati mancanti                | tutti   | 0-20 % | metodologia/test: Monte-Carlo ecc.      |

Tabella 2 - Gli errori riscontrabili nelle misure di SEC (da Burba e Anderson, 2005).

Fondamentale per la riuscita della misure è la manutenzione dei sensori che richiedono calibrazioni in fabbrica semestrale o annuale. Oltre alla manutenzione ordinaria, bisogna tenere in considerazione le riparazioni dovute ad imprevisti (incendi, fulmini, trombe d'aria, danni da roditore, mancanza di corrente, ecc.)

Importante è anche la definizione dell'altezza strumentale che è strettamente legata all'impronta di flusso, ovvero l'area che apporta con i suoi flussi il maggior contributo alla misura. L'area vicino alla torre può contribuire molto, se l'altezza di misura è bassa e la rugosità superficiale è alta (Gash, 1986, Rebmann et al., 2005).

L'intervallo di acquisizione non dovrebbe essere troppo lungo altrimenti non includerebbe il contributo del flusso turbolento; se è troppo breve risulteranno mancanti i contributi delle frequenze più basse; è consigliato uno standard di 30 minuti o 1 ora.

Misurati i flussi H e  $\lambda E$ , vanno considerate le misure di  $R_n$  e G. Eventuali errori nella misura della radiazione sono dovuti all'angolo di incidenza, pertanto il sensore deve essere posizionato perfettamente parallelo rispetto al piano del suolo. Un altro problema nell'utilizzo del bilancio energetico è spesso legato alla difficoltà di misurare il flusso G, specialmente in un suolo con cambiamento rapido del contenuto di acqua o a tessitura irregolare (ad esempio con presenza di zolle o pietre che non permettono il contatto del suolo al sensore); le piastre utilizzate nell'esperimento non richiedono calibrazione in quanto prevedono al loro interno un sistema di auto-calibrazione.

Nonostante queste difficoltà, e con le dovute precauzioni, il metodo SEC rimane comunque il metodo più convincente per la stima dei flussi nel bilancio energetico.

Esiste la possibilità di utilizzare la metodologia anche per situazioni in cui non sono valide le assunzioni fatte; in questo senso sono stati fatti diversi studi su come effettuare le correzioni (McMillen, 1988, Lee et al., 2004, Raupach e Finnigan, 1997).

La convalida del metodo SEC avviene attraverso la chiusura del bilancio, che si verifica quanto il termine ( $R_n + G$ ) è pari a  $[-(H + \lambda E)]$ , ovvero quando la pendenza della regressione è pari a di 1 e l'offset pari a zero (Wilson et al., 2002, Rosset et al., 1997). La chiusura, però, non avviene mai completamente, sia perché rimangono errori residui sia perché nell'assunzione iniziale si trascura l'energia assorbita dalla pianta per effettuare la fotosintesi.

## 8.2 Teoria delle misure di LAI

L'Indice di Area Fogliare (LAI) è utilizzato nella modellazione della traspirazione, dell'evaporazione e dell'intercettazione della pioggia da parte della vegetazione. Le misure dirette, operate tramite campionamento distruttivo, richiedono un notevole investimento di tempo, per questo si è preferito un metodo indiretto (Facchi *et al.*, 2009).

Il principio di misurazione del LAI-2000 per la misura del LAI (Figura 16) si basa sulla misura simultanea, secondo 5 anelli concentrici (0-13°, 16-28°, 32-43°, 47-58°, 61-74°), della radiazione diffusa sopra chioma ( $\Phi_0$ ) e sotto chioma ( $\Phi$ ), per determinare l'estinzione della radiazione proveniente dall'alto dovuta alla presenza delle foglie (Napolitano *et al.*, 2005). Questo tipo di misura consente di ottenere anche informazioni sulla distribuzione degli angoli delle foglie delle piante (i valori di MTA).

Utilizzando la legge di estinzione di Lambert-Beer che quantifica l'estinzione di radiazione in un mezzo omogeneo:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-kLAI} \quad (8.2-55)$$

dove  $\Phi_0$  è la radiazione incidente,  $\Phi$  è la radiazione visibile trasmessa attraverso i diversi strati di foglie e  $k$  è il coefficiente di estinzione della radiazione. Da quest'ultima equazione è possibile calcolare il LAI:

$$LAI = -\frac{1}{k} \ln \frac{\Phi}{\Phi_0} \quad (8.2-56)$$

Lo strumento non richiede calibrazioni in quanto ad ogni serie di misure ne viene effettuata una di riferimento soprachioma.

L'accuratezza dei risultati dipende dal grado di violazione di alcuni presupposti su cui si basa lo strumento. Normalmente essi possono essere ignorati grazie alla presenza di un filtro blu, che respinge le radiazioni con lunghezza d'onda superiore ai 490 nm (le foglie diventano come corpi neri: non riflettono né trasmettono nessuna radiazione), e effettuando le misurazioni con cielo coperto o al tramonto o all'alba (Gower e Norman 1991).

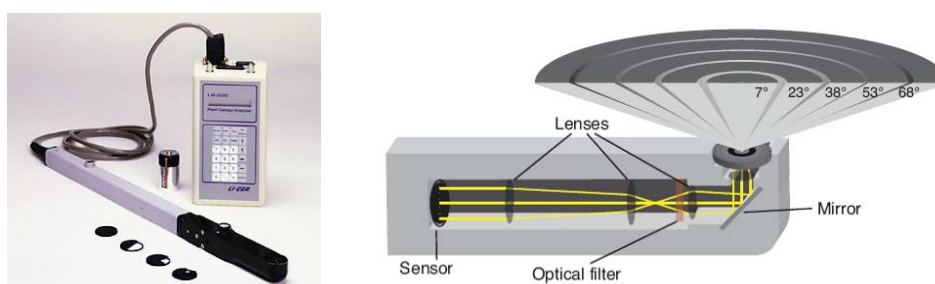


Figura 16 - Strumentazione LAI-2000 Plant Canopy Analyzer.

## 8.3 Teoria delle misure di TDR

Lo stato idrico del suolo è stato determinato mediante l'utilizzo della tecnica della Riflettometria nel Dominio del Tempo (TDR), uno dei metodi più attendibili per la misura del contenuto idrico. Essa ha numerosi vantaggi rispetto agli altri metodi di misura, in termini di flessibilità, sensibilità, capacità di automazione, rapidità di esecuzione, ampiezza del range di misura (Dalton, 1987).

Questa tecnica consente di rilevare una permittività apparente del suolo, da porre in relazione al contenuto d'acqua, attraverso la misura della velocità di propagazione di un segnale elettromagnetico convogliato in una linea di

trasmissione inserita nel suolo. La misura è effettuata installando, nelle zone in cui si vuole eseguire i rilievi, dei conduttori metallici paralleli di lunghezza nota ed inviando in essi un impulso di tensione caratterizzato da un ripido fronte di salita (in genere utilizzando un tester per cavi da campo). Il segnale, che si propaga con una velocità che dipende dalle proprietà dielettriche del suolo, giunto al termine della linea si riflette e ritorna verso l'apparecchiatura che provvede alla sua registrazione, consentendo la misura del tempo di transito sulla linea e, quindi, della sua velocità di propagazione. Questa tecnica risulta poco sensibile alla geometria delle sonde, dipende solo dalle proprietà dielettriche e magnetiche del mezzo (Liu *et al.*, 2006) e può utilizzare relazioni di calibrzioni che risultano sufficientemente valide per un ampio campo dei suoli, senza richiedere ulteriori adattamenti alle situazioni di misura (Romano, 2004).

La velocità del segnale è calcolata attraverso l'equazione:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_a \mu_r}} \quad (8.3-57)$$

dove  $c$  [ $3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>] è la velocità della luce nel vuoto,  $\mu_r$  [-] è la permeabilità magnetica relativa (per il suolo è pari a 1) e  $\epsilon_a$  [-] è la permittività dielettrica apparente del mezzo. In pratica la velocità  $v$  è ricavata misurando il tempo di transito  $\Delta t$  [s] del segnale, nota la lunghezza  $L$  [m] della linea di trasmissione. Quindi dall'equazione (8.3-57) si ha:

$$\epsilon_a = \left( c \frac{\Delta t}{2L} \right)^2 \quad (8.3-58)$$

in cui il fattore moltiplicativo 2 indica che la lunghezza  $L$  è percorsa dal segnale due volte prima di essere rilevato dall'apparecchiatura.

Per mettere in relazione  $\epsilon_a$  con il contenuto idrico ( $\theta$ ) [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ] Topp *et al.* (1980) hanno proposto la seguente equazione:

$$\theta = -e_0 + e_1 \epsilon_a - e_2 \epsilon_a^2 + e_3 \epsilon_a^3 \quad (8.3-59)$$

Qualora fosse necessaria una maggiore precisione delle misure esistono altre equazioni proposte da Roth *et al.* (1990).

#### 8.4 Teoria delle misure di SAP-FLOW

La tecnica utilizzata per la stima della traspirazione è denominata SAP-FLOW e consente di misurare il flusso traspirativo attraverso il flusso xilematico. Questa tecnologia, da lungo tempo diffusa in arboricoltura, è ancora poco applicata in viticoltura (Eastham e Gray, 1998).

Il metodo utilizzato è quello di Granier (1985) che si basa sul riscaldamento del tronco: una parte del calore è dispersa radialmente dal tronco verso l'esterno, un'altra parte è dispersa lungo il tronco verso l'alto e verso il basso, ed infine una parte è assorbita dalla linfa e trasportata da essa verso le foglie.

I sensori sono costituiti da una resistenza elettrica applicata su un supporto di sughero avvolto al tronco della pianta e da delle termocoppie inserite nel legno (Figura 17).

Il metodo tiene conto dei gradienti termici naturali all'interno del legno e le due termocoppie di riferimento servono a monitorarli in continuo ( $\Delta T1$ ,  $\Delta T2$ ). Durante il monitoraggio i valori di differenza di temperatura tra il sensore riscaldato e la temperatura ambiente del legno ( $\Delta T$ ) sono corretti mediante i valori  $\Delta T1$  e  $\Delta T2$ .

Il riscaldamento continuo della sonda superiore, stima il flusso di linfa attraverso l'applicazione di un'equazione empirica che lega il flusso alla differenza di temperatura:

$$F = \left( \frac{1}{\alpha^*} \frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1/\beta^*} \quad (8.4-60)$$

dove  $F$  è il flusso di linfa [ $\text{l h}^{-1}$ ],  $\alpha^*$  e  $\beta^*$  sono due coefficienti che dipendono dal quantitativo di calore applicato al sensore,  $\Delta T_{\max}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] è la massima differenza di temperatura misurata tra la sonda riscaldata e la non riscaldata,  $\Delta T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] è la differenza di temperatura tra le sonde al flusso misurato.

Vi sono alcune limitazioni dovute alla determinazione del flusso della linfa durante le ore notturne, che implica l'assenza di traspirazione e del processo di riempimento del fusto.

Il metodo richiede la calibrazione (Ping Lu et al., 2004).

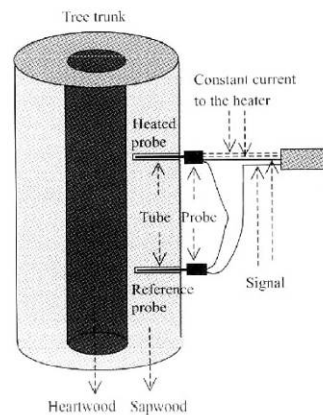


Figura 17 - Schema di funzionamento del SAP-FLOW.

### 8.5 Teoria delle misure spettroradiometriche e termometriche

Lo spettroradiometro è uno strumento in grado di rilevare lo spettro della radiazione in un certo intervallo. Solo alcune lunghezze d'onda sono filtrate e la radiazione che arriva al detector genera un segnale elettrico che viene campionato per un certo intervallo di tempo, poi quantizzato e registrato come numero digitale (DN).

La calibrazione è la procedura necessaria per legare il DN alla radianza. Queste due grandezze sono legate da un coefficiente di guadagno, chiamato gain, e ad un valore che rappresenta il rumore, l'offset. Di fatto la calibrazione consiste nel prendere l'immagine del tag calibrazione in spectralon sotto le stesse condizioni di illuminazione delle immagini in fase di studio; il rapporto tra rosso / NIR o verde / NIR è poi applicato come un offset per il calcolo dei vari indici di vegetazione. L'immagine di calibrazione deve essere presa entro un'ora o due dalle immagini di campo, altrimenti il calcolo degli indici non sarà accurato.

La termocamera consente di misurare e rappresentare la frazione infrarossa della radiazione emessa da un oggetto. Essendo la radiazione funzione della temperatura emessa dalla superficie ma anche dell'emissività, definita come il rapporto tra il flusso energetico spettrale emesso da un oggetto e quello emesso da un corpo nero alla stessa temperatura e lunghezza d'onda, la temperatura è ricavabile attraverso la legge di Stefan-Boltzmann (Brivio et al., 2006):

$$M = \varepsilon \sigma T^4 \quad (8.5-61)$$

in cui  $M$  [ $\text{W m}^{-2}$ ] è l'emittanza totale,  $\varepsilon$  [-] è l'emissività e  $\sigma$  [ $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-4}$ ] è la costante di Stefan-Boltzmann.



## 9 Dati acquisiti

I dati meteo monitorati dalla stazione micro-meteorologica sono stati già in parte mostrati dal Grafico 2 al Grafico 5. Di seguito sono mostrati gli andamenti dei flussi e la chiusura del bilancio energetico (Grafico 6). Il flusso di calore latente risulta molto basso rispetto agli andamenti proposti negli studi di SEC; la chiusura del bilancio, invece, è perfettamente in accordo con quanto è stato descritto nella teoria SEC, infatti la pendenza della retta di regressione è di 0.92, valore prossimo a 1 (Meyers e Hollinger, 2004, Prueger et al., 2005, Wilson et al., 2002). Attraverso i sensori per la misura del flusso di calore nel suolo è stata monitorata la temperatura alla profondità dei sensori (Grafico 7).

Le misure di LAI sono state eseguite nel campo di studio (Vigna\_3) e in altri 3 punti di campi limitrofi aventi le stesse caratteristiche di omogeneità (Tabella 3) e che apportano un parziale contributo alle misure SEC. L'andamento del LAI del campo considerato è mostrato nel Grafico 8.

Nel Grafico 9 è riportato l'andamento giornaliero del flusso xilematico misurato dalle sonde di SAP-FLOW.

Il monitoraggio del contenuto idrico tramite TDR è mostrato nel Grafico 10 e nel Grafico 11.

Nel Grafico 12 sono riportate le temperature radiometriche del suolo e delle foglie ottenute dai termometri a infrarosso.

I monitoraggi sono stati effettuati a scale temporali diverse (15 min, 30 min, 1 ora) per tanto sono stati aggregati con un time step orario e successivamente giornaliero per poter effettuare l'implementazione nei modelli.

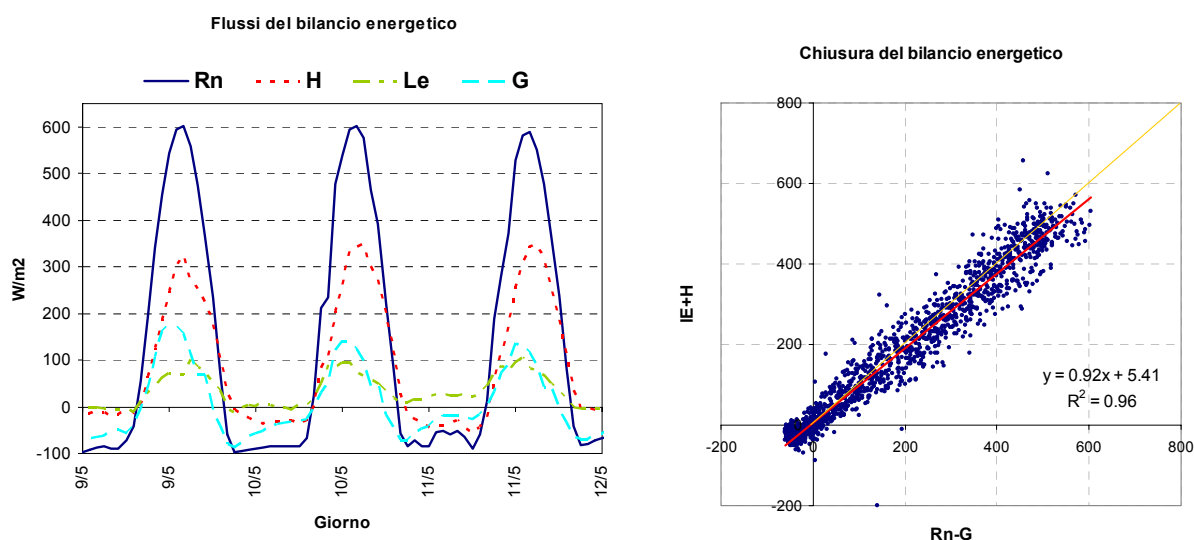


Grafico 6 - Andamento giornaliero dei flussi di radiazione netta, calore sensibile, calore latente e calore nel suolo (a sinistra) e chiusura del bilancio energetico (a destra).

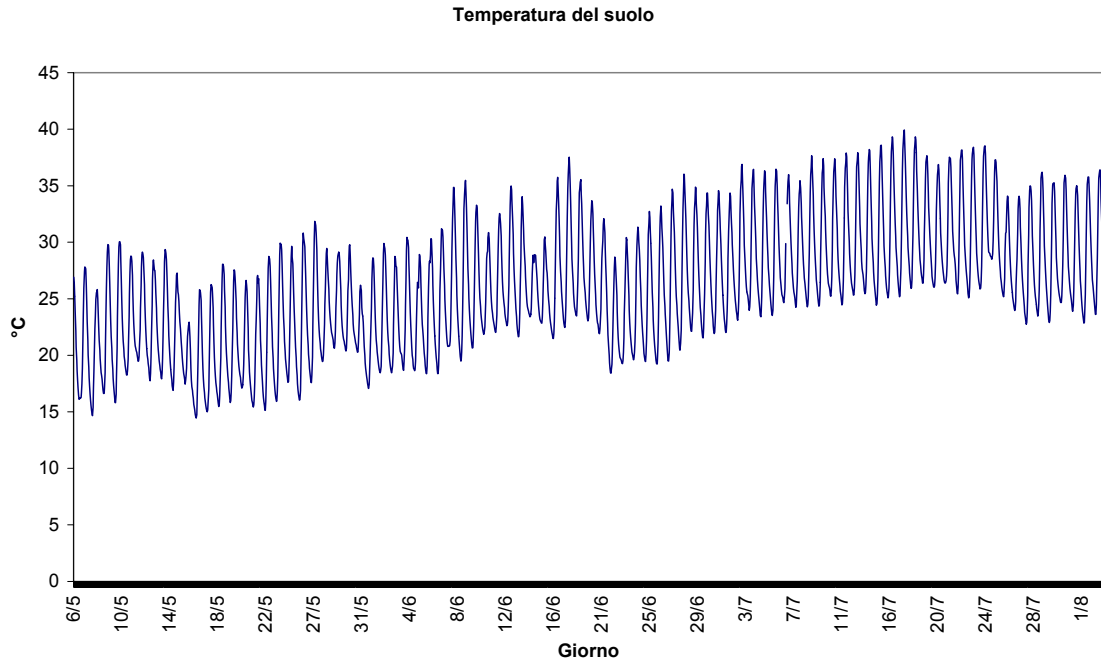


Grafico 7 - Andamento della temperatura del suolo misurata attraverso i sensori utilizzati per la determinazione del flusso di calore.

| Punto            | Vigna_1   | Vigna_2   | Vigna_3   | Vigna_4   |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Latitudine       | 37°36.005 | 37°35.920 | 37°35.812 | 37°35.739 |
| Longitudine      | 12°38.904 | 12°38.148 | 12°38.775 | 12°38.644 |
| LAI (05/05/2010) | 0.35      | 0.36      | 0.23      | 0.42      |
| MTA (05/05/2010) | 53        | 53        | 60        | 50        |
| LAI (19/06/2010) | 0.95      | 0.89      | 0.69      | 0.91      |
| MTA (19/06/2010) | 42        | 45        | 39        | 39        |

Tabella 3 - Misure di LAI eseguite in campo.

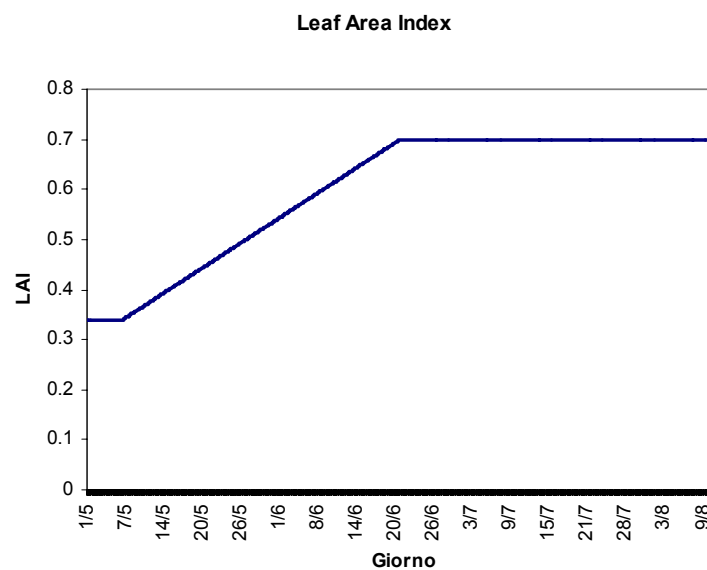


Grafico 8 - Andamento del LAI durante il periodo dell'acquisizione delle misurazioni.

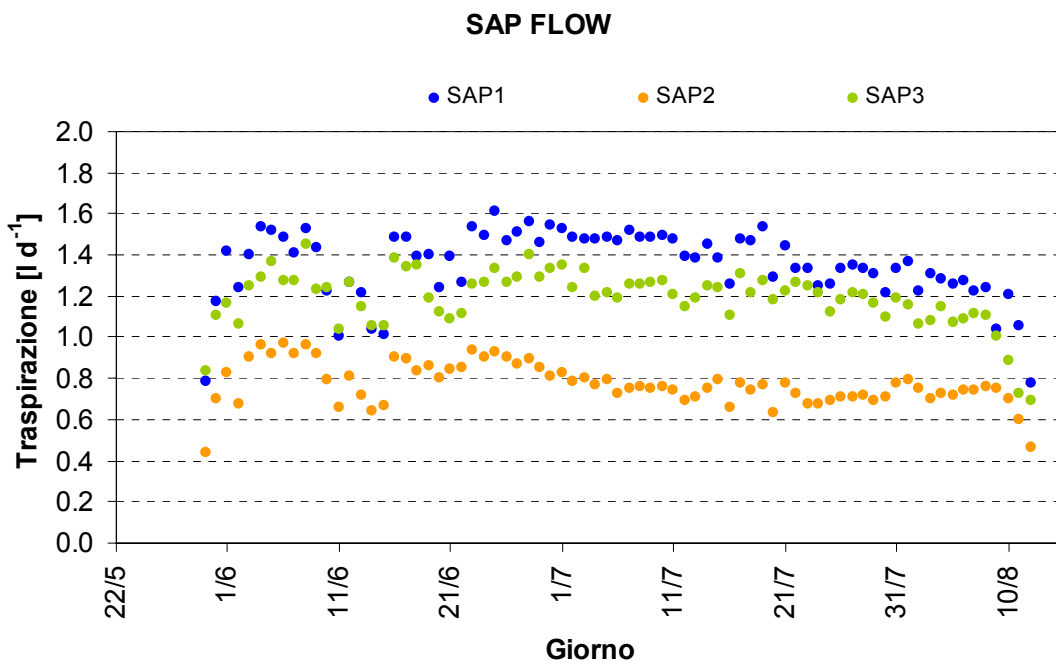


Grafico 9 - Andamento del flusso xilematico giornaliero, aggregato a partire dai dati orari.

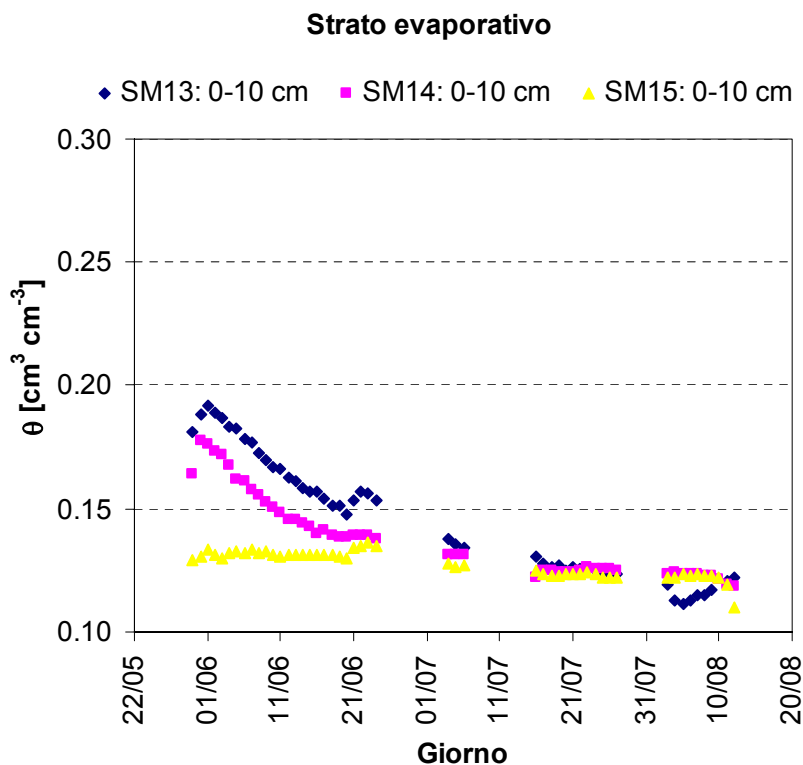


Grafico 10 - Contenuti idrici dei primi 10 cm dei profili esaminati.

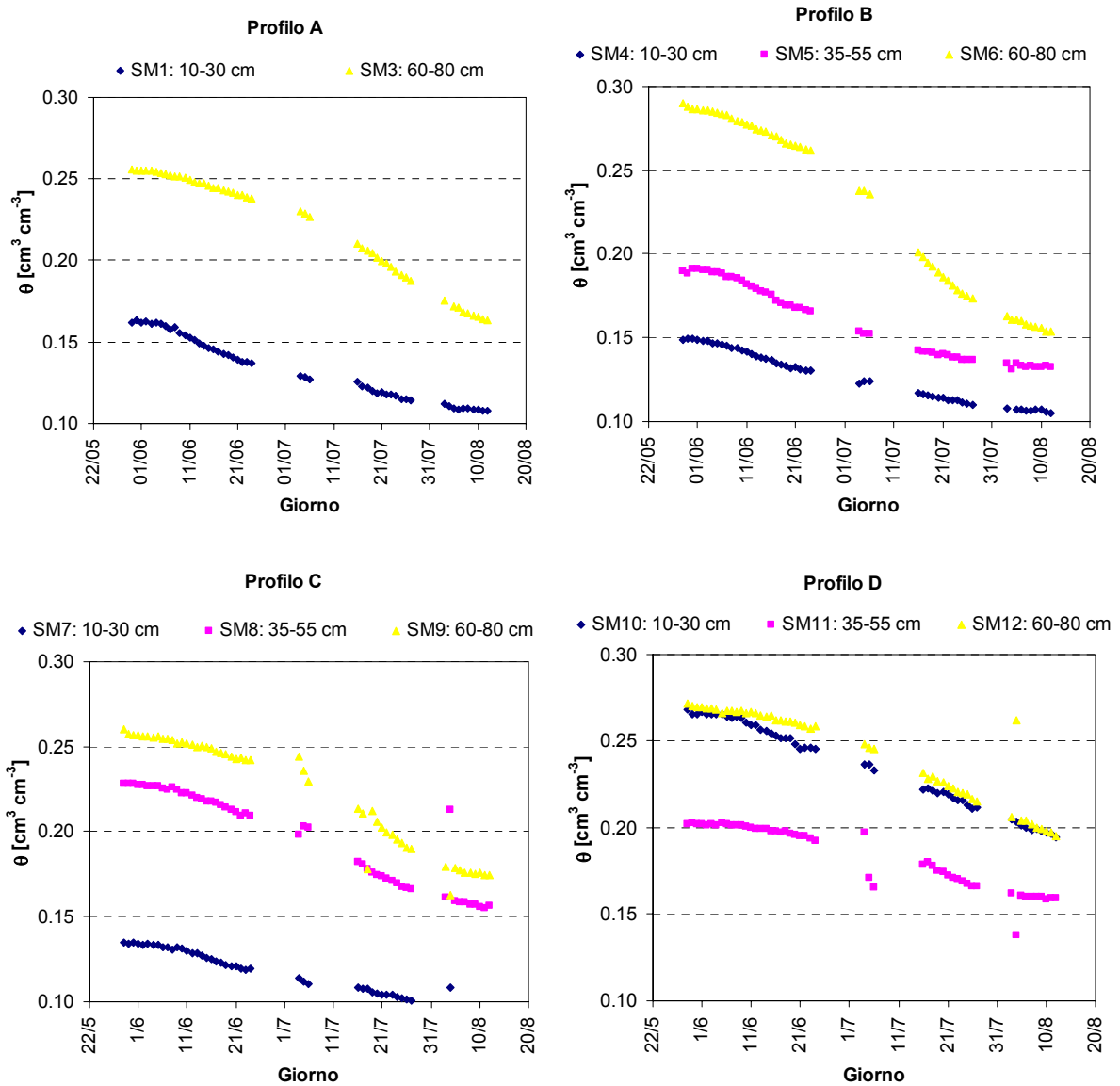


Grafico 11 - Contenuti idrici dei 4 profili di suolo.

La procedura di inversione in HYDRUS-1D ha portato ai seguenti parametri necessari per la risoluzione della funzione di Van Genuchten-Mualem del modello SWAP a scala oraria:

| Strato | $\theta_r$ | $\theta_s$ | $\alpha$   | $n$   | $K_s$    | $l$ |
|--------|------------|------------|------------|-------|----------|-----|
| 1      | 0.0        | 0.4185     | 0.00076985 | 2.095 | 0.000178 | 0.5 |
| 2      | 0.0        | 0.5        | 0.002106   | 3.008 | 0.00119  | 0.5 |
| 3      | 0.0        | 0.5        | 0.001531   | 3.243 | 0.0584   | 0.5 |

Tabella 4 - Parametri del suolo ottenuti tramite Inverse solution.

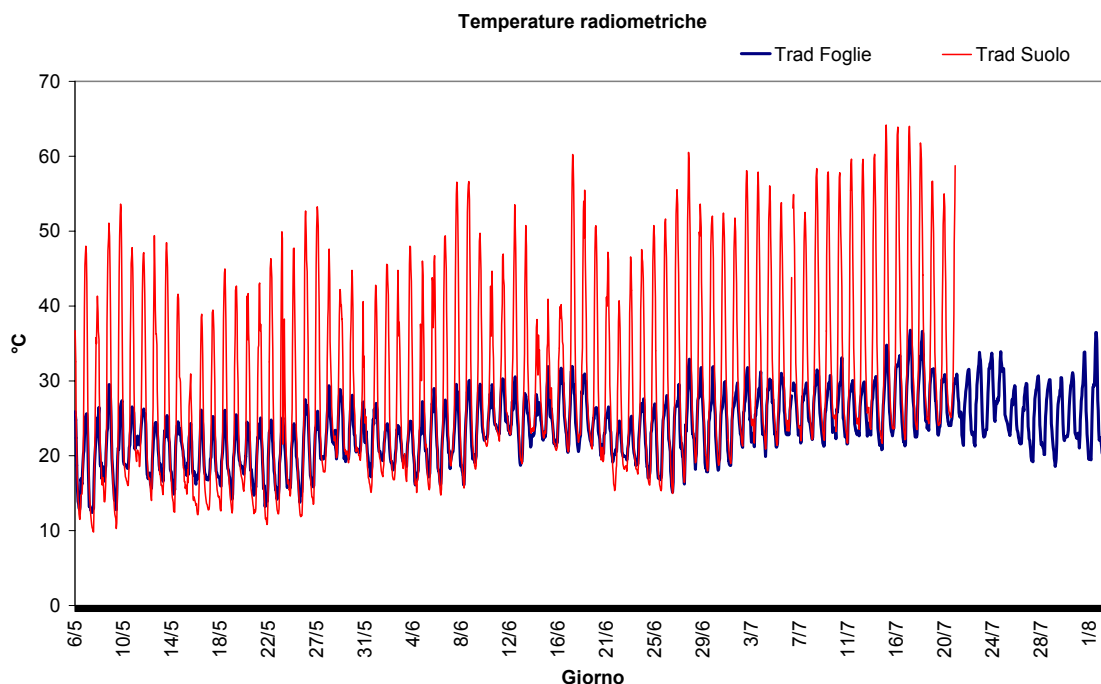


Grafico 12 - Andamento delle temperature radiometriche della superficie del suolo e delle foglie.

La campagna di misure spettroradiometriche e termometriche realizzata il 10 e 11 agosto 2010, ha portato all'acquisizione di 11 immagini (un esempio è riportato in Figura 18 - A)

Queste immagini sono state sottoposte a una fase di preparazione:

1. allineamento delle 6 bande tetracam;
2. calibrazione delle immagini in riflettanza mediante correlazioni lineari fra valori di DN e firme spettrali misurate con lo spettrometro sui target di riferimento (mattonelle, suolo, pannello e canopy). Le regressioni ottenute sono risultate ben correlate con valori di  $R^2$  compresi tra 0.8-1;
3. determinazione dei fattori peso per il calcolo dell'albedo mediante elaborazione dei valori irradianza derivata dagli spettri acquisiti su spectralon;
4. calcolo dell'albedo (relativo al range 440-970 nm);
5. diminuzione della risoluzione spaziale delle bande tetracam al valore di circa 1 cm prossimo alla risoluzione delle immagini FLIR;
6. georiferimento delle immagini FLIR sulle bande Tetracam (il risultato di questa operazione non ha evitato le distorsioni prospettiche dovuta alla non perfetta collocazione dei due sensori e ai diversi field of view);
7. generazione di un unico Stack layer contenente i suddetti 8 layers (elencati in Tabella 5);
8. subset unico di tutte le immagini in un'area minima comune a tutte le acquisizioni.

Alla fase di preparazione è seguita una fase di elaborazione per ottenere i dati da implementare successivamente nel modello TSEB:

1. eliminazione dalle immagini delle tavolette utilizzate per le calibrazioni (Figura 18- B);

2. classificazione di tipo supervised finalizzata all'individuazione della frazione di suolo illuminato e in ombra, e alla frazione di foglie illuminate e in luce (Figura 18 – C), eseguita con il software ERDAS Imagine 9.0 (*Leica Geosystem Geospatial Imaging LLC*);
3. overlay tra l'immagine classificata e la banda termica (Figura 18 – D) per ottenere le temperature medie di ogni componente (Tabella 6 e Tabella 7).

| Numero Banda | Lunghezza d'onda (nm) | Rappresentazione |
|--------------|-----------------------|------------------|
| 1            | riflettanza 440-460   | blu              |
| 2            | riflettanza 530-570   | giallo           |
| 3            | riflettanza 645-655   | rosso            |
| 4            | riflettanza 715-725   | infrarosso       |
| 5            | riflettanza 830-870   | infrarosso       |
| 6            | riflettanza 930-970   | infrarosso       |
| 7            |                       | albedo           |
| 8            |                       | temperatura (°C) |

Tabella 5 - Specifiche delle bande costituenti le immagini acquisite in data 10-11/08/2010.

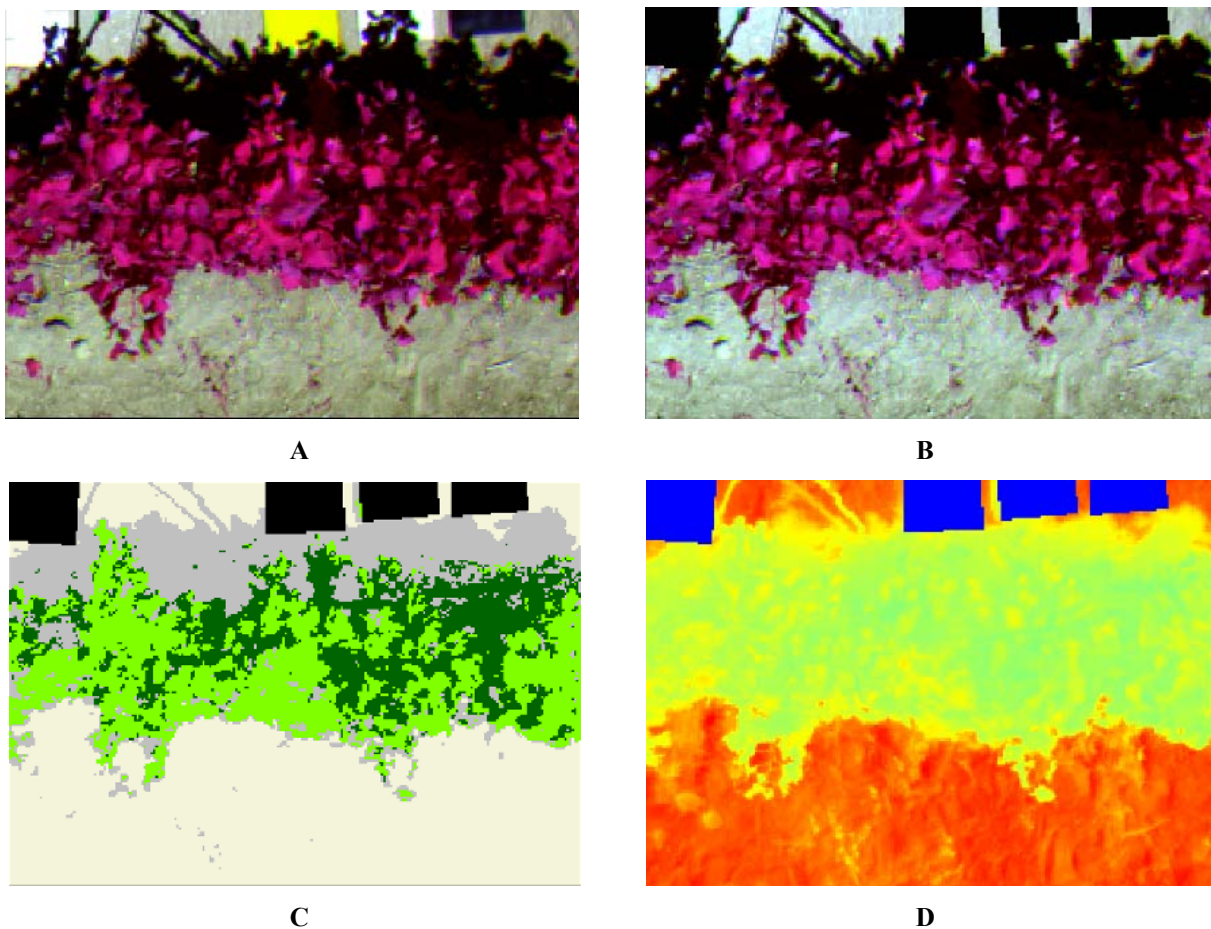


Figura 18 - Elaborazione eseguita sull'immagine del 10/08/2010 ora 12.40.

| DATA IMG   | LEGENDA         | ZONE CODE | AREA (mq) | MIN   | MAX   | RANGE | T media (°C) | Dev Stand | AREA % |
|------------|-----------------|-----------|-----------|-------|-------|-------|--------------|-----------|--------|
| 10-08-1100 | suolo in luce   | 1         | 1.87      | 30.00 | 55.00 | 25.00 | <b>43.40</b> | 3.80      | 42.86  |
|            | foglie in luce  | 2         | 1.01      | 30.00 | 38.00 | 8.00  | <b>31.63</b> | 1.47      | 23.06  |
|            | foglie in ombra | 3         | 0.97      | 28.00 | 34.00 | 6.00  | <b>30.06</b> | 1.12      | 22.11  |
|            | suolo in ombra  | 4         | 0.52      | 30.00 | 46.00 | 16.00 | <b>36.32</b> | 4.06      | 11.96  |
| 10-08-1240 | suolo in luce   | 3         | 2.12      | 43.20 | 58.40 | 15.20 | <b>50.86</b> | 2.65      | 43.54  |
|            | foglie in luce  | 1         | 1.08      | 31.00 | 41.30 | 10.30 | <b>34.41</b> | 1.86      | 22.30  |
|            | foglie in ombra | 2         | 0.75      | 29.90 | 36.30 | 6.40  | <b>32.85</b> | 1.29      | 15.50  |
|            | suolo in ombra  | 4         | 0.91      | 31.60 | 43.80 | 12.20 | <b>36.83</b> | 2.78      | 18.65  |
| 10-08-1300 | suolo in luce   | 3         | 1.64      | 37.80 | 60.10 | 22.30 | <b>51.29</b> | 4.12      | 35.51  |
|            | foglie in luce  | 1         | 1.33      | 31.90 | 53.90 | 22.00 | <b>37.73</b> | 5.22      | 28.85  |
|            | foglie in ombra | 2         | 0.72      | 30.60 | 38.50 | 7.90  | <b>34.00</b> | 1.48      | 15.59  |
|            | suolo in ombra  | 4         | 0.93      | 32.00 | 52.70 | 20.70 | <b>36.28</b> | 2.00      | 20.05  |
| 10-08-1400 | suolo in luce   | 3         | 1.28      | 46.10 | 62.30 | 16.20 | <b>53.73</b> | 2.39      | 27.80  |
|            | foglie in luce  | 1         | 1.32      | 31.60 | 54.20 | 22.60 | <b>36.76</b> | 4.47      | 28.68  |
|            | foglie in ombra | 2         | 0.85      | 30.00 | 36.60 | 6.60  | <b>33.35</b> | 1.38      | 18.46  |
|            | suolo in ombra  | 4         | 1.15      | 32.20 | 46.00 | 13.80 | <b>34.86</b> | 2.20      | 25.06  |
| 10-08-1600 | suolo in luce   | 3         | 1.47      | 33.20 | 57.60 | 24.40 | <b>48.58</b> | 5.50      | 32.17  |
|            | foglie in luce  | 1         | 1.33      | 33.70 | 55.10 | 21.40 | <b>39.77</b> | 5.82      | 28.93  |
|            | foglie in ombra | 2         | 0.72      | 33.00 | 40.60 | 7.60  | <b>35.54</b> | 1.45      | 15.72  |
|            | suolo in ombra  | 4         | 1.06      | 32.00 | 42.90 | 10.90 | <b>34.56</b> | 1.15      | 23.18  |
| 10-08-1700 | suolo in luce   | 3         | 1.51      | 33.40 | 53.40 | 20.00 | <b>45.36</b> | 4.74      | 32.84  |
|            | foglie in luce  | 1         | 0.95      | 33.50 | 48.60 | 15.10 | <b>38.23</b> | 3.00      | 20.62  |
|            | foglie in ombra | 2         | 0.94      | 33.10 | 42.10 | 9.00  | <b>35.59</b> | 1.40      | 20.52  |
|            | suolo in ombra  | 4         | 1.20      | 32.90 | 46.30 | 13.40 | <b>36.35</b> | 3.01      | 26.02  |
| 11-08-0900 | suolo in luce   | 3         | 1.07      | 26.50 | 39.20 | 12.70 | <b>30.86</b> | 1.79      | 22.32  |
|            | foglie in luce  | 1         | 0.68      | 25.50 | 34.50 | 9.00  | <b>27.38</b> | 1.53      | 14.23  |
|            | foglie in ombra | 2         | 1.36      | 24.10 | 32.20 | 8.10  | <b>26.42</b> | 1.31      | 28.48  |
|            | suolo in ombra  | 4         | 1.67      | 25.20 | 35.80 | 10.60 | <b>27.55</b> | 1.44      | 34.97  |
| 11-08-1000 | suolo in luce   | 3         | 1.13      | 28.80 | 50.00 | 21.20 | <b>38.08</b> | 3.11      | 24.59  |
|            | foglie in luce  | 1         | 1.39      | 27.80 | 41.60 | 13.80 | <b>30.28</b> | 2.13      | 30.33  |
|            | foglie in ombra | 2         | 0.98      | 26.60 | 33.80 | 7.20  | <b>28.97</b> | 1.19      | 21.37  |
|            | suolo in ombra  | 4         | 1.09      | 28.20 | 39.90 | 11.70 | <b>29.92</b> | 1.89      | 23.71  |
| 11-08-1200 | suolo in luce   | 3         | 2.18      | 36.10 | 58.70 | 22.60 | <b>47.85</b> | 2.67      | 48.00  |
|            | foglie in luce  | 1         | 1.16      | 30.00 | 44.00 | 14.00 | <b>32.85</b> | 2.35      | 25.54  |
|            | foglie in ombra | 2         | 0.66      | 29.00 | 34.40 | 5.40  | <b>31.30</b> | 1.18      | 14.54  |
|            | suolo in ombra  | 4         | 0.54      | 30.60 | 51.10 | 20.50 | <b>37.25</b> | 4.40      | 11.92  |
| 11-08-1300 | suolo in luce   | 3         | 1.99      | 37.20 | 58.80 | 21.60 | <b>50.90</b> | 3.10      | 42.69  |
|            | foglie in luce  | 1         | 1.27      | 30.30 | 51.90 | 21.60 | <b>34.84</b> | 4.03      | 27.11  |
|            | foglie in ombra | 2         | 0.66      | 29.90 | 36.80 | 6.90  | <b>32.57</b> | 1.21      | 14.18  |
|            | suolo in ombra  | 4         | 0.75      | 31.70 | 50.40 | 18.70 | <b>38.07</b> | 4.84      | 16.02  |
| 11-08-1600 | suolo in luce   | 3         | 1.59      | 0.00  | 57.20 | 57.20 | <b>47.43</b> | 6.21      | 34.03  |
|            | foglie in luce  | 1         | 1.24      | 30.90 | 51.10 | 20.20 | <b>35.15</b> | 4.48      | 26.49  |
|            | foglie in ombra | 2         | 0.73      | 29.80 | 44.00 | 14.20 | <b>32.71</b> | 1.93      | 15.62  |
|            | suolo in ombra  | 4         | 1.12      | 30.80 | 44.00 | 13.20 | <b>33.44</b> | 1.25      | 23.86  |

Tabella 6 – Dettaglio dei risultati dalla procedura di overlay tra l'immagine classificata e la banda termica.

| Date       | HH.mm | Temperatura media °C |                |                 |                |
|------------|-------|----------------------|----------------|-----------------|----------------|
|            |       | Suolo in luce        | Foglie in luce | Foglie in ombre | Suolo in ombra |
| 10/08/2010 | 11.00 | 43.40                | 31.63          | 30.06           | 36.32          |
| 10/08/2010 | 12.40 | 50.86                | 34.41          | 32.85           | 36.83          |
| 10/08/2010 | 13.00 | 51.29                | 37.73          | 34.00           | 36.28          |
| 10/08/2010 | 14.00 | 53.73                | 36.76          | 33.35           | 34.86          |
| 10/08/2010 | 16.00 | 48.58                | 39.77          | 35.54           | 34.56          |
| 10/08/2010 | 17.00 | 45.36                | 38.23          | 35.59           | 36.35          |
| 11/08/2010 | 9.00  | 30.86                | 27.38          | 26.42           | 27.55          |
| 11/08/2010 | 10.00 | 38.08                | 30.28          | 28.97           | 29.92          |
| 11/08/2010 | 12.00 | 47.85                | 32.85          | 31.30           | 37.25          |
| 11/08/2010 | 13.00 | 50.90                | 34.84          | 32.57           | 38.07          |
| 11/08/2010 | 16.00 | 47.43                | 35.15          | 32.71           | 33.44          |

Tabella 7 - Temperature medie delle singole componenti delle immagini.



---

**SEZIONE IV**  
**APPLICAZIONI E RISULTATI**

---

## 10 Implementazione dei modelli, risultati e discussione

### 10.1 Implementazione del modello di bilancio idrico e risultati

Il modello utilizzato è la versione 93 di SWAP, più facile da gestire rispetto alla recente versione 3.2.26.

Le condizioni al contorno superiore sono state definite attraverso i dati di precipitazione, di evaporazione e di traspirazione potenziali espresse in cm. L' $ET_0$  è stata calcolata attraverso l'equazione di Priestley-Taylor (eq. 4.3.1-13), che risulta essere meno influenzata dai parametri colturali e dalla velocità del vento. Questa scelta è stata obbligata in quanto nell'equazione di Penman-Monteith (eq. 4.3.1-14) è necessario inserire la velocità del vento, un dato non disponibile per tutto il periodo considerato (la ricostruzione dei dati mancanti è descritta nell'Appendice A).

Il coefficiente colturale utilizzato è pari a 1, quindi,  $ET_0$  è uguale a  $ET_p$ , in quanto i dati utilizzati sono quelli raccolti nel vigneto e, quindi, la correzione è insita nelle misure stesse (ad esempio la radiazione netta considera già l'albedo del vigneto).

La ripartizione dell' $ET_p$  in  $E_p$  e  $T_p$  è stimata mediante l'equazione di Ritchie (eq. 4.3-9), che utilizza il LAI (Grafico 8) e il coefficiente di estinzione della radiazione solare ( $k_{gr}$ ). La determinazione del valore di  $k_{gr}$  è piuttosto complessa, richiede una serie di misure di radiazione solare globale al di sopra e al di sotto della canopy, in diverse condizioni di soleggiamento e secondo diverse angolature (Agnese *et al.*, 2008). In bibliografia non sono riportati dati affidabili di  $k_{gr}$  per specie arboree di interesse agronomico; per la *Vitis vinifera* alcuni autori lo considerano pari a 0.45-0.50 (Agnese *et al.*, 2008, Bindi *et al.*, 1997). L'utilizzo di un diverso  $k_{gr}$  porta a una stima della traspirazione potenziale che può essere molto diversa, come mostrato nel Grafico 13; per valori di LAI pari a 0.70 l'aumento del valore di  $k_{gr}$  da 0.39 a 1.25 comporta un aumento del 50% nella stima della traspirazione potenziale e, di conseguenza, una stima errata della traspirazione effettiva. Per questo motivo si riportano più simulazioni che, a parità di tutti gli altri parametri, mettono a confronto i valori di ET, E e T ottenuti utilizzando diversi valori di  $k_{gr}$ , pari a 0.39 (come consigliato nell'equazione originale di Ritchie), 0.50 (come riportato in bibliografia per la *Vitis vinifera*), 0.80 e 1.25.

Per l'ulteriore riduzione del flusso evaporativo dal suolo non è stato considerato alcun modello.

I parametri per la descrizione della curva di ritenzione idrica e di conducibilità idraulica necessari per la risoluzione della funzione di Van Genuchten-Mualem sono stati riportati in Tabella 4; si è considerato un profilo della profondità di 1 m, 3 orizzonti (da 0 a 20, da 20 a 62 e da 62 a 100 cm) e 40 compartimenti.

Le condizioni al contorno inferiore sono considerate attraverso la falda iniziale a 180 cm di profondità e il drenaggio libero.

Le condizioni iniziali del profilo del suolo al primo giorno di simulazione sono state considerate con un potenziale matriciale in ogni nodo del profilo calcolato come in equilibrio con la falda.

I parametri per la descrizione della funzione di attingimento radicale (illustrata in Figura 3 del Capitolo 4.4) reperiti in letteratura (Taylor e Ashcroft, 1972) e quelli considerati per la simulazione sono riportati in Tabella 8; per valori

di  $ET < 2 \text{ mm d}^{-1}$ , ovvero per condizioni di maggiore aridità sono suggeriti valori di potenziale  $h_{3h}$  e  $h_{3l}$  più bassi rispetto a quelli in condizioni di non aridità.

La geometria dell'apparato radicale è considerato costante per tutto il periodo di simulazione (153 giorni), mentre la copertura varia da 0.42 a 0.52, con andamento analogo al LAI.

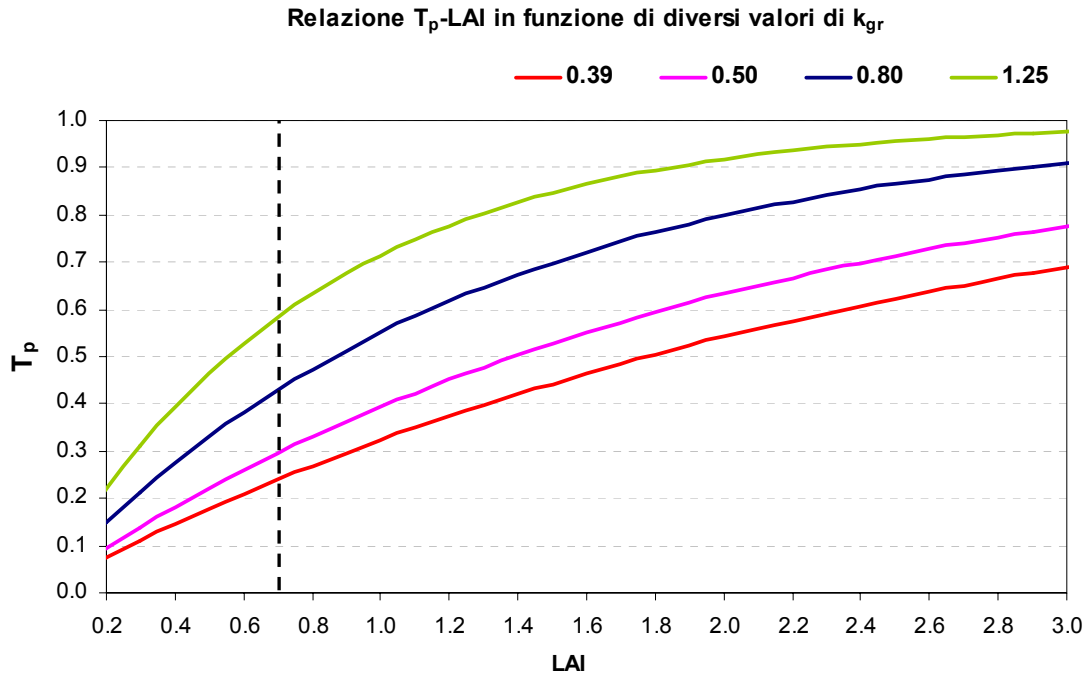


Grafico 13 - Relazione  $T_p$ -LAI in funzione di  $k_{gr}$  pari a 0.39, 0.50, 0.80 e 1.25. La linea verticale tratteggiata rappresenta il valore di LAI pari a 0.70.

| Potenziali critici | Proposti [cm]                         | Utilizzati [cm] |
|--------------------|---------------------------------------|-----------------|
| $h_1$              | -10                                   | -10             |
| $h_2$              | -25                                   | -25             |
| $h_{3h}$           | -750                                  | -800            |
|                    | -1000 se $ET < 2 \text{ [mm d}^{-1}]$ |                 |
| $h_{3l}$           | -750                                  | -800            |
|                    | 1000 se $ET < 2 \text{ [mm d}^{-1}]$  |                 |
| $h_4$              | -10000                                | -12000          |

Tabella 8 - Potenziali critici per la Vitis vinifera.

Nel Grafico 14 e nel Grafico 15 sono mostrati i dettagli dei risultati delle simulazioni per i periodi dal 28 maggio al 6 giugno e dal 31 luglio all'11 agosto 2010, utilizzando i diversi coefficienti di estinzione  $k_{gr}$ ; con  $ET_{swap}$ ,  $E_{swap}$  e  $T_{swap}$  sono indicati i valori di evapotraspirazione, evaporazione e traspirazione simulati da SWAP, mentre con  $ET_{sec}$  è indicato il valore di evapotraspirazione misurato attraverso la stazione micro-meteorologica.

Per tutti i valori di  $k_{gr}$  considerati  $ET_{swap}$  raggiunge i livelli di evapotraspirazione potenziale in corrispondenza degli eventi piovosi. In particolare l'incremento è dovuto all'evaporazione dal suolo e non alla traspirazione simulata che,

in condizioni di assenza di stress a seguito della pioggia, raggiunge la sua quota potenziale. Questo comportamento è spiegato dalla ripartizione tra  $E_p$  e  $T_p$  attraverso l'equazione di Ritchie, che poco si adatta a colture con scarsa copertura del suolo. Infatti, una volta effettuata la ripartizione, i valori di  $E$  e  $T$  vengono ridotti dal livello potenziale a quello effettivo mediante due meccanismi diversi:

- l'evaporazione del suolo, legata allo stato idrico in prossimità della superficie ed alla conducibilità idraulica;
- la traspirazione, che dipende dal potenziale idrico riscontrato in corrispondenza dell'apparato radicale, in funzione dei parametri di attingimento (Tabella 8).

Pertanto, la somma dei termini  $E$  e  $T$  non corrisponde al valore che si ottiene dalle misure di Eddy Covariance, se il coefficiente  $k_{gr}$  è valutato erroneamente.

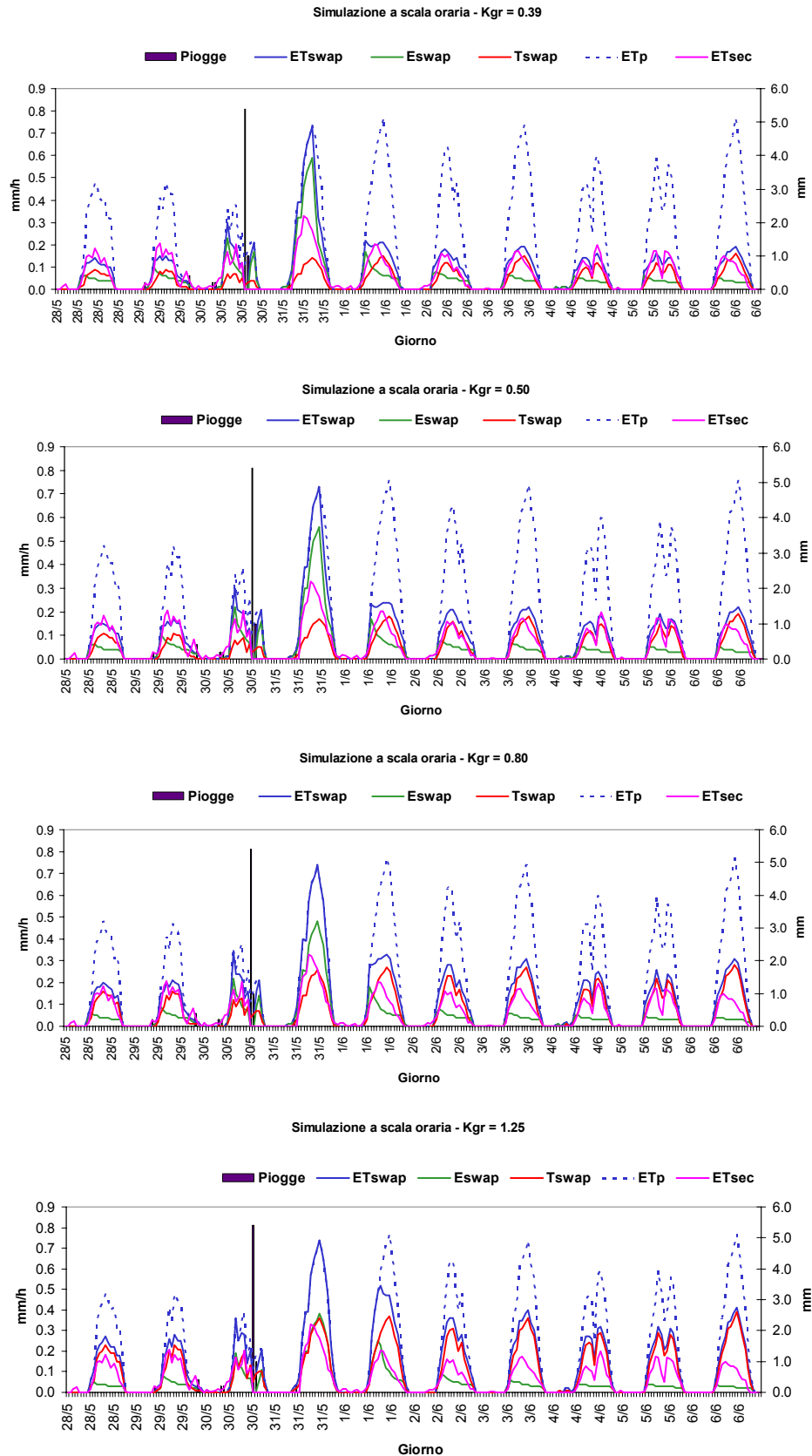


Grafico 14 - Andamento a scala oraria di ET, E e T simulate con SWP, considerando  $kgr=0.39, 0.50, 0.80$  e  $1.25$  e confronto con  $ET_{sec}$ ; nel grafico è mostrato il dettaglio del periodo dal 28 maggio al 6 giugno 2010.

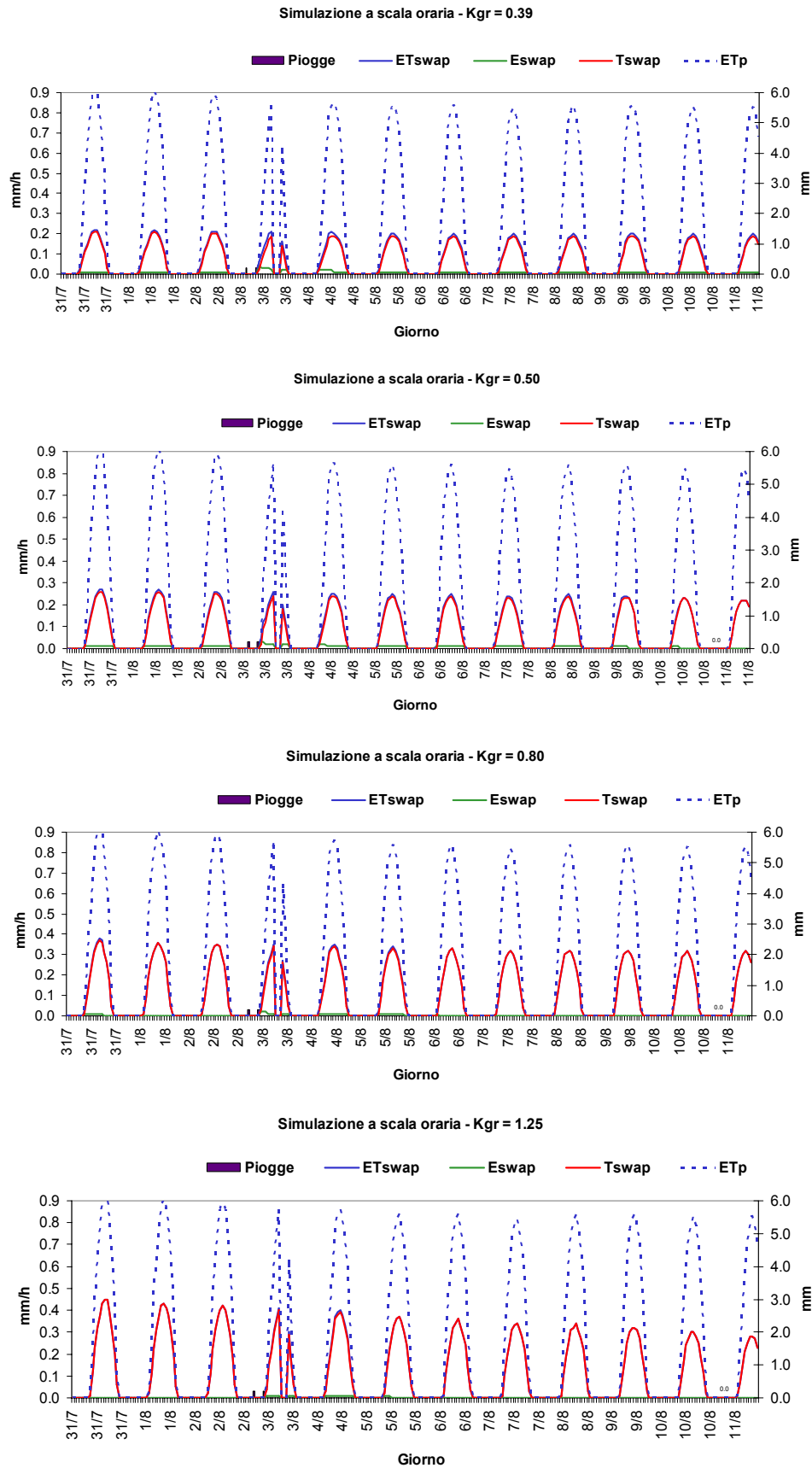


Grafico 15 - Andamento a scala oraria di ET, E e T simulate con SWP, considerando  $kgr=0.39, 0.50, 0.80$  e  $1.25$  e confronto con  $ET_{sec}$ ; nel grafico è mostrato il dettaglio del periodo dal 31 luglio all'11 agosto 2010.

Per valutare la simulazione che meglio approssima le misure in campo è stata effettuata un'analisi statistica sugli scarti a scala oraria tra la curva di evapotraspirazione di riferimento ( $ET_{sec}$ ), ottenuta dalle misure della stazione micro-meteorologica, e le curve di evapotraspirazione simulate con SWAP ( $ET_{swap}$ ), ottenuta utilizzando  $k_{gr}$  pari a 0.39, 0.50, 0.80 e 1.25. Un dettaglio degli andamenti degli scarti è mostrato nel Grafico 16; le evapotraspirazioni simulate sono tendenzialmente più alte rispetto a quella misurata, come confermato dal valore medio degli scarti in Tabella 9. La simulazione che utilizza il coefficiente di estinzione della luce pari a 0.39 è quella che si avvicina di più alle misure di Eddy Covariance, in quanto sia il valore medio degli scarti sia il valore di RMSE (Root Mean Square Error), che misura la variabilità degli scarti, sono bassi. In realtà anche le misure di riferimento sono affette da errore, come dimostra la non perfetta chiusura del bilancio energetico (Grafico 6).

Un'ulteriore analisi statistica è stata effettuata sugli scarti a scala oraria tra la curva di traspirazione ottenuta dalle misure di SAP-FLOW ( $T_{sap}$ ), trasformate da litri/ora a mm/ora, e le curve di traspirazione simulate con SWAP, utilizzando  $k_{gr}$  pari a 0.39, 0.50, 0.80 e 1.25. Gli andamenti degli scarti sono mostrati nel Grafico 17 e indicano che i valori di traspirazione misurati sono più alti di quelli simulati. In questo confronto la simulazione che più si avvicina alle misure di SAP-FLOW è quella che utilizza il coefficiente di estinzione della luce pari a 0.80, in quanto presenta un basso valore medio degli scarti e un basso valore di RMSE. Quest'analisi, però, risulta di difficile lettura in quanto si è tentato di confrontare misure puntuali, quali le misure di SAP-FLOW, con le simulazioni del modello SWAP che, invece, sono a scala di campo e subiscono l'influenza dei flussi dei campi limitrofi a quello sperimentale.

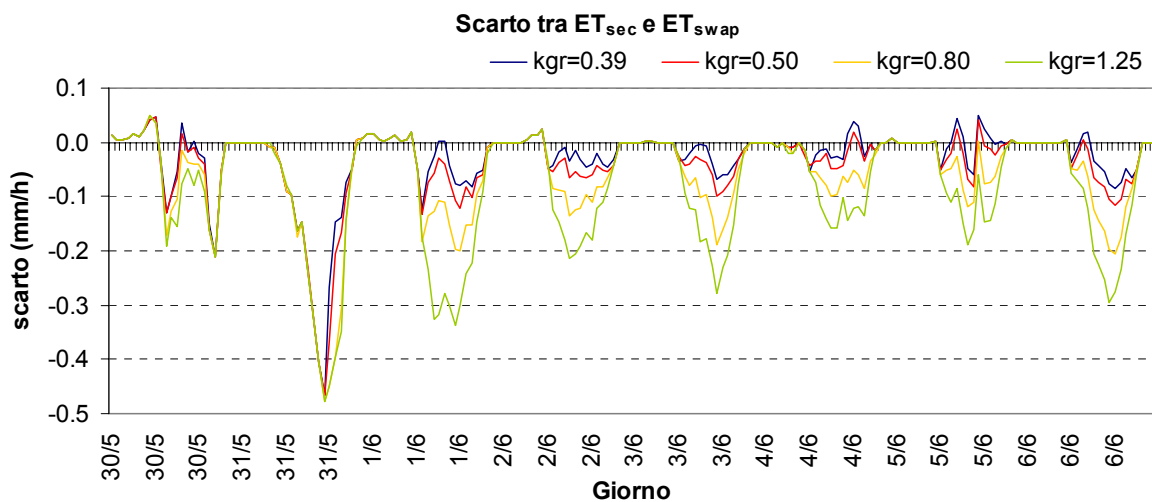


Grafico 16 – Andamento degli scarti tra la curva di evapotraspirazione misurata con la stazione micro-meteorologica ( $ET_{sec}$ ) e quella simulata ( $ET_{swap}$ ) con i diversi valori di  $k_{gr}$ .

|             | Scarto tra $ET_{sec}$ e $ET_{swap}$ |               |               |               |
|-------------|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|             | $k_{gr}=0.39$                       | $k_{gr}=0.50$ | $k_{gr}=0.80$ | $k_{gr}=1.25$ |
| <b>RMSE</b> | 0.06                                | 0.07          | 0.08          | 0.10          |
| <b>Mean</b> | -0.02                               | -0.02         | -0.04         | -0.07         |

Tabella 9 - Valori di RMSE e delle medie calcolati sugli scarti tra i valori di evapotraspirazione misurati dalla stazione micro-meteorologica ( $ET_{sec}$ ) e di evapotraspirazione simulata ( $ET_{swap}$ ) con i diversi  $k_{gr}$ .

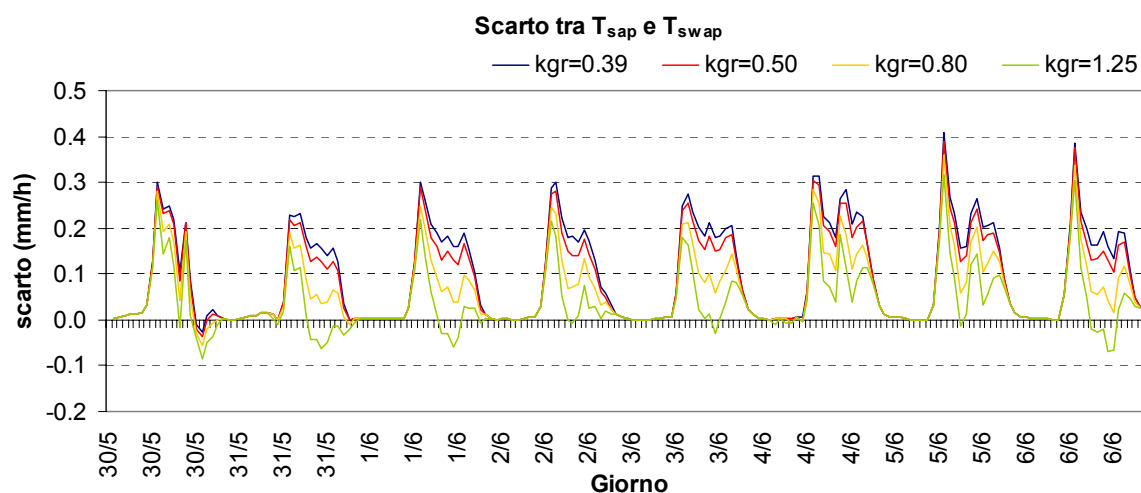


Grafico 17 – Andamento degli scarti tra la curva di traspirazione misurata con la tecnica del SAP-FLOW ( $T_{sap}$ ) e quella simulata ( $T_{swap}$ ) con i diversi valori di  $k_{gr}$ .

|             | <b>Scarto tra <math>T_{sap}</math> e <math>T_{swap}</math></b> |                 |                 |                 |
|-------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
|             | <i>kgr=0.39</i>  | <i>kgr=0.50</i> | <i>kgr=0.80</i> | <i>kgr=1.25</i> |
| <b>RMSE</b> | 0.09   | 0.08            | 0.07            | 0.09            |
| <b>Mean</b> | 0.08   | 0.07            | 0.04            | 0.01            |

Tabella 10 - Valori di RMSE e delle medie calcolati sugli scarti tra i valori di traspirazione misurati dalla stazione micro-meteorologica ( $T_{sap}$ ) e di traspirazione simulata ( $T_{swap}$ ) con i diversi  $k_{gr}$ .



## 10.2 Implementazione del modello di bilancio energetico e risultati

Il modello TSEB è stato implementato per i giorni 10 e 11 agosto utilizzando i dati meteorologici e le temperature radiometriche delle componenti ottenute dalle immagini prelevate con l'utilizzo della termocamera (Tabella 6); i dati in input sono specificati in Tabella 11; il modello restituisce in output i valori dei flussi  $R_n$ ,  $H$ ,  $G_0$  e  $\lambda E$  sia per la canopy che per il suolo. La simulazione è stata ripetuta utilizzando gli stessi dati in input, sostituendo le temperature radiometriche misurate dalla termocamera con le temperature radiometriche misurate dai termometri IR, installati insieme alla stazione micro-meteorologica (l'installazione degli strumenti è stata illustrata nel Capitolo 7). I valori di traspirazione ottenuti dalle due simulazioni risultano correlati con un valore di  $R^2$  pari a 0.62 (Grafico 18) e tendenzialmente i valori ottenuti dalla termocamera risultano più alti. La differenza nelle temperature radiometriche misurate è dovuta in parte alla precisione strumentale, ma soprattutto al posizionamento degli strumenti: la termocamera è posizionata in alto e il suo asse forma un angolo di  $90^\circ$  con il suolo (Capitolo 7, Figura 13) per cui rileva principalmente la temperatura delle foglie più esterne, al contrario i termometri IR sono posizionati direttamente sulla pianta (Figura 9) e rilevano le temperature radiometriche in parte delle foglie esterne e in parte delle foglie più interne della canopy.

I risultati ottenuti dalle simulazioni del bilancio energetico sono state messe a confronto nel Grafico 19: con  $T_{\text{iseb}}$  sono indicati i valori di traspirazione ottenuti dalla simulazione del modello TSEB che implementa le temperature radiometriche ottenute dalle immagini termiche ad alta risoluzione, con  $T_{\text{iseb-IR}}$  sono indicati i valori di traspirazione ottenuti dalla simulazione del modello TSEB che implementa le temperature radiometriche ottenute dai termometri IR, con  $T_{\text{swap}}$  sono indicati i valori di traspirazione simulati con il modello di bilancio idrico SWAP utilizzando i valori di  $k_{\text{gr}}$  di 0.39 e 0.80 e, in fine, con  $T_{\text{sap-flow}}$  sono indicati i valori di traspirazione ottenuti dalle misure di SAP-FLOW.

Nonostante si stia cercando di confrontare modelli e misure a scale diverse, il confronto è soddisfacente.

| Grandezza implementata | Descrizione   |
|------------------------|---|
| zu                     | Altezza a cui è misurata la velocità del vento [m]    |
| zm                     | Altezza a cui è misurata la temperatura [m]           |
| ta                     | Temperatura dell'aria [ $^\circ\text{C}$ ]            |
| rh                     | Umidità relativa [%]                                  |
| u                      | Velocità del vento [ $\text{m s}^{-1}$ ]              |
| p                      | Pressione atmosferica [hPa]                           |
| Rs                     | Radiazione solare ad onde corte [ $\text{W m}^{-2}$ ] |
| hh sun angle           | Ora e angolo del sole                                 |
| hc                     | Altezza della coltura [m]                             |
| fc avg                 | Fraction vegetation cover medio [-]                   |
| trad (TIR)             | Temperatura radiometria [K]                           |

Tabella 11 - Dati in input nel modello TSEB.

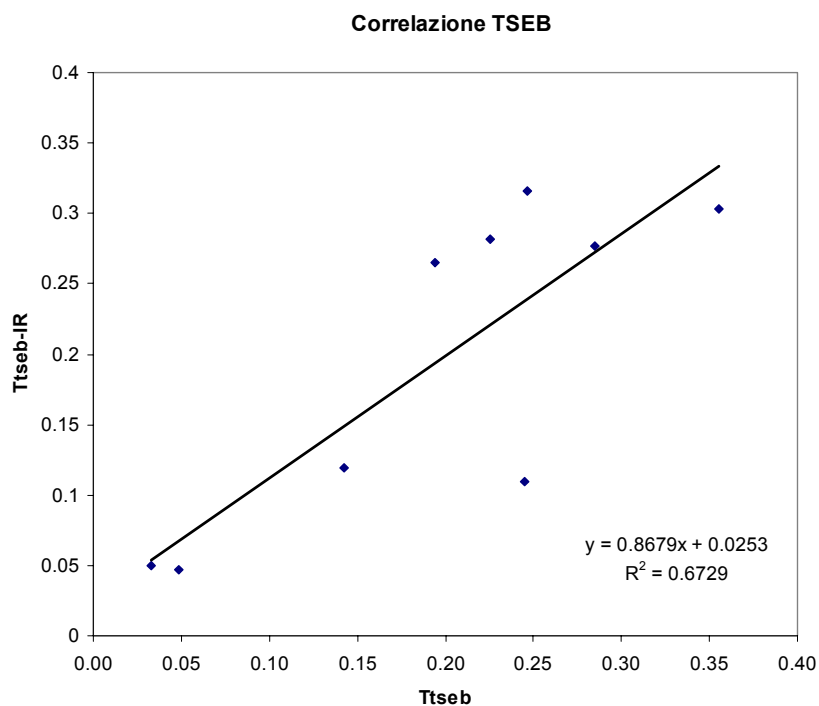


Grafico 18 - Correlazione tra la traspirazione simulata con TSEB che implementa la  $T_{\text{rad}}$  della termocamera ( $T_{\text{tseb}}$ ) e la traspirazione simulata con TSEB che implementa la  $T_{\text{rad}}$  dei termometri ( $T_{\text{tseb-IR}}$ ).

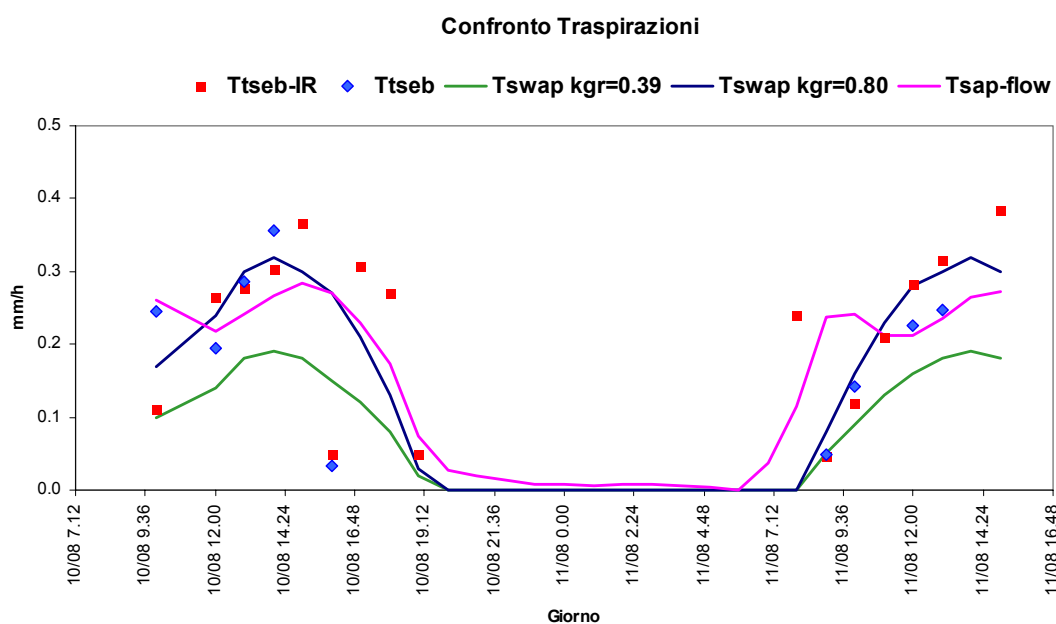


Grafico 19 - Risultati dell'implementazione del TSEB per il 10 e 11 agosto 2010.

Sono state effettuate delle simulazioni utilizzando la temperatura IR dei termometri anche per il periodo dal 29 maggio al 4 giugno 2010 (Grafico 20) e per il periodo dal 5 agosto all'11 agosto 2010 (Grafico 21). Quello che risulta è che tendenzialmente la traspirazione simulata con il modello TSEB risulta essere più alta di quella simulata con SWAP, mentre i valori risultano più vicini dopo un evento piovoso.

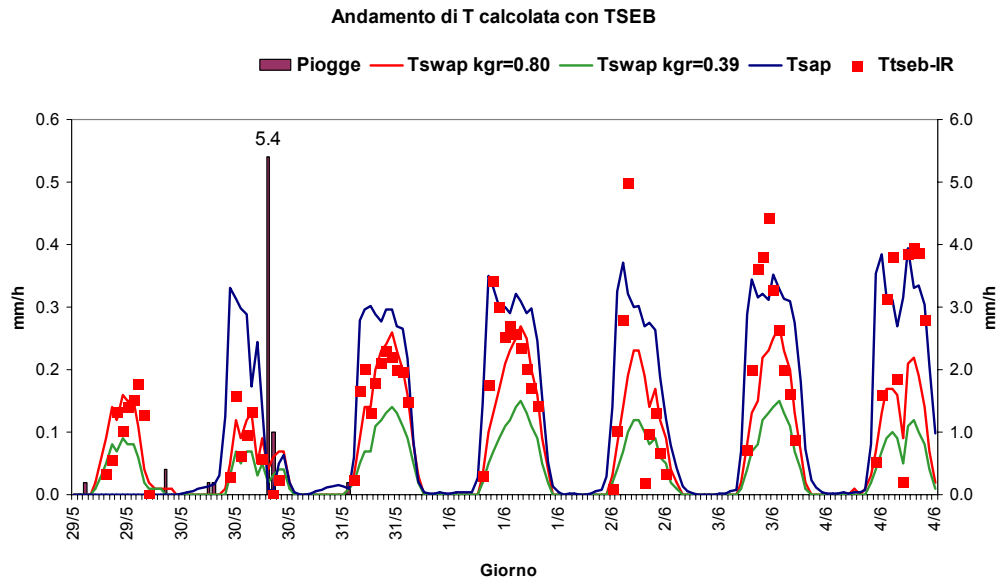


Grafico 20 - Risultati dell'implementazione del TSEB con temperatura IR dai termometri per il periodo dal 29 maggio al 4 giugno 2010.

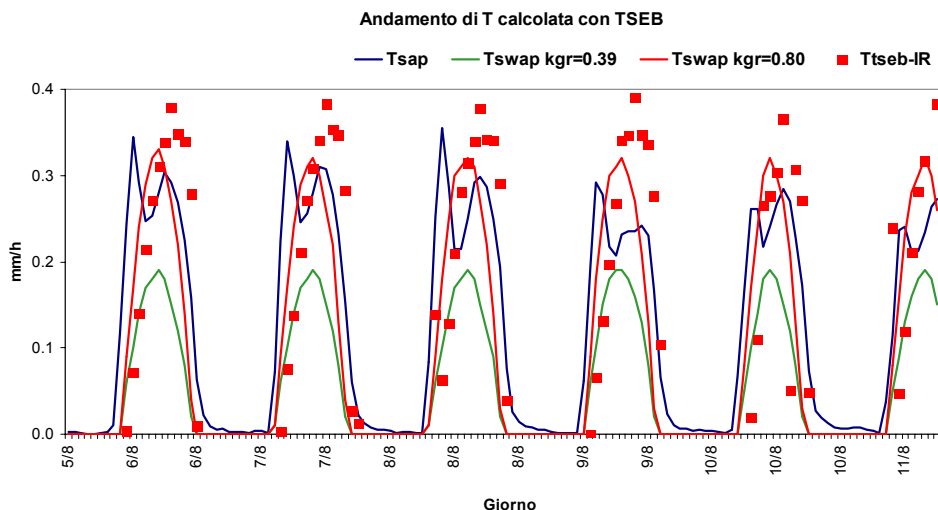


Grafico 21 - Risultati dell'implementazione del TSEB con temperatura IR dai termometri per il periodo dal 5 all'11 agosto 2010.

|             | Calcolato sullo scarto tra: |                                    |                                    |
|-------------|-----------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
|             | $T_{sap}$ e $T_{tseb-IR}$   | $T_{tseb-IR}$ e $T_{swap, k=0.39}$ | $T_{tseb-IR}$ e $T_{swap, k=0.80}$ |
| <b>RMSE</b> | 0.12                        | 0.11                               | 0.11                               |
| <b>Mean</b> | 0.05                        | 0.10                               | 0.03                               |

Tabella 12 - Valori di RMSE e delle medie calcolati sugli scarti tra i valori di traspirazione misurati con SAP-FLOW ( $T_{sap}$ ) e quelli simulati con il modello TSEB ( $T_{tseb-IR}$ ), che utilizza le temperature radiometriche dei termometri IR; quindi sono stati calcolati anche per gli scarti tra i valori di traspirazione ottenuti dal modello TSEB e quelli ottenuti dalle simulazioni precedenti effettuate con SWAP.

L'analisi statistica degli scarti tra la curva di traspirazione del SAP-FLOW e quella simulata con il TSEB, che utilizza le temperature radiometriche dei termometri IR, presenta un valore medio di 0.05 e un RMSE di 0.12 (Tabella 12). Il confronto dell'analisi degli scarti calcolati tra la curva di traspirazione simulata con il modello TSEB e quella simulata con SWAP, indica che la simulazione di SWAP che utilizza  $k_{gr}$  pari a 0.80 è più simile a quella del TSEB, in quanto a parità di RMSE, ovvero di variabilità degli scarti, il valore medio degli scarti è più basso, e quindi le curve risultano più vicine.

Nonostante la diversità delle tecniche di misura e dei modelli di simulazione si è tentato uno studio di correlazione tra i flussi simulati e quelli misurati, riportato nel Grafico 22: il flusso di  $R_n$  è simulato correttamente come dimostra il valore di  $R^2$  pari a 0.87; il flusso di H presenta una buona correlazione,  $R^2$  pari a 0.74, ma risulta essere sottostimato rispetto a quello misurato;  $G_0$ , invece non ha alcuna correlazione con quello misurato, ma è noto in bibliografia che questa misura costituisce un elemento di grossa incertezza e per questo  $G_0$  è valutato come percentuale della radiazione netta; anche il valore di  $\lambda ET$  risulta avere una bassa correlazione,  $R^2$  pari a 0.42.

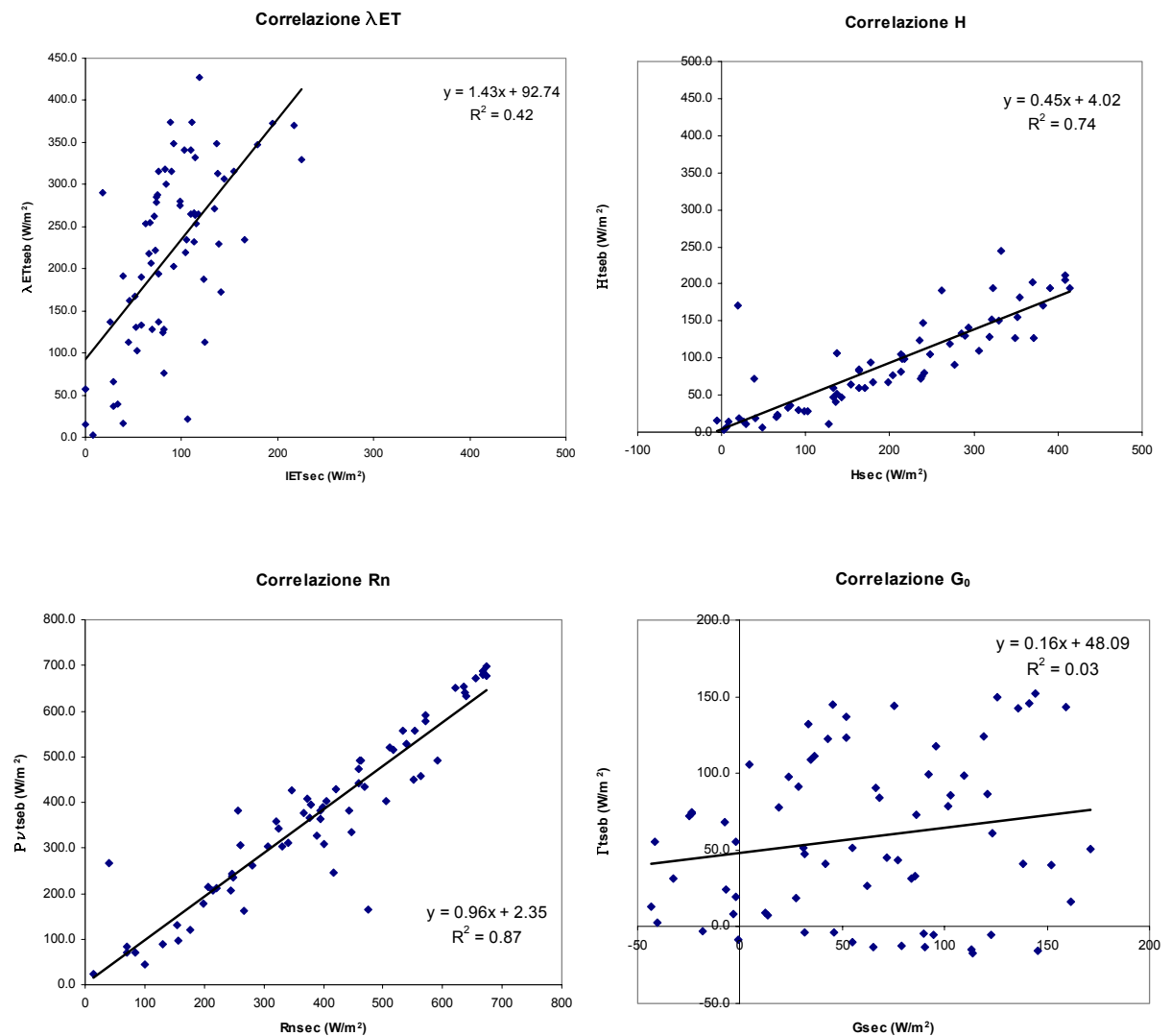


Grafico 22 - Correlazioni tra i flussi misurati dalla stazione SEC e quelli simulati con TSEB.

## 11 Calcolo degli indici di stress

Gli indici di stress utilizzati sono stati presentati del Capitolo 3.

Utilizzando i valori delle simulazioni ottenute da SWAP con i diversi  $k_{gr}$  sono stati calcolati  $ET_{swap}/ET_p$  e  $T_{swap}/T_p$ , che variano tra 1 (assenza di stress idrico) a 0 (massimo stress idrico). I risultati sono stati riportati e messi a confronto nel Grafico 23 e nel Grafico 24, in cui si riporta il periodo certo di stress, ovvero dal 31 luglio all'11 agosto 2010. L'indice che utilizza ET (Grafico 23) mostra un "falso" stress in quanto la pianta continua a traspirare in condizioni quasi potenziali fino ai primi giorni di agosto, come mostra l'indice che utilizza T (Grafico 24), infatti la traspirazione costituisce quasi tutta l'evapotraspirazione nei mesi di luglio e di agosto, come mostrato nelle simulazioni del bilancio idrico (Grafico 15).

La pianta, da quanto accertato con visite in campo, ha mostrato segni di sofferenza solo nelle ore pomeridiane tra fine luglio e inizio agosto, pertanto la migliore simulazione che descrive la condizione reale è quella ottenuta utilizzando un  $k_{gr}$  pari a 0.80, con un indice di stress che raggiunge il valore di 0.90 durante la prima settimana di agosto.

In realtà la differenza tra gli indici calcolati a partire dalle simulazioni che hanno utilizzato  $k_{gr}$  pari a 0.39, 0.50 e 0.80 è veramente molto piccola. Questo si può spiegare attraverso il fatto che il coefficiente ripartisce la traspirazione potenziale e quella simulata nello stesso modo, tanto che il loro rapporto non varia molto.

Un altro indice calcolato è stato quello descritto dall'equazione (3-2):

$$CWSI = \frac{[(T_c - T_a) - (T_c - T_a)_{min}]}{[(T_c - T_a)_{max} - (T_c - T_a)_{min}]} \quad (3-62)$$

Questo indice si basa sulla differenza di temperatura tra l'aria e la canopy (Grafico 25), varia anch'esso tra 1 (assenza di stress) e 0 (massimo stress), ma non riesce a definire bene la condizione di stress probabilmente a causa del fatto che la temperatura delle foglie risulta quasi sempre maggiore rispetto a quella dell'aria, come mostrato nel Grafico 26.

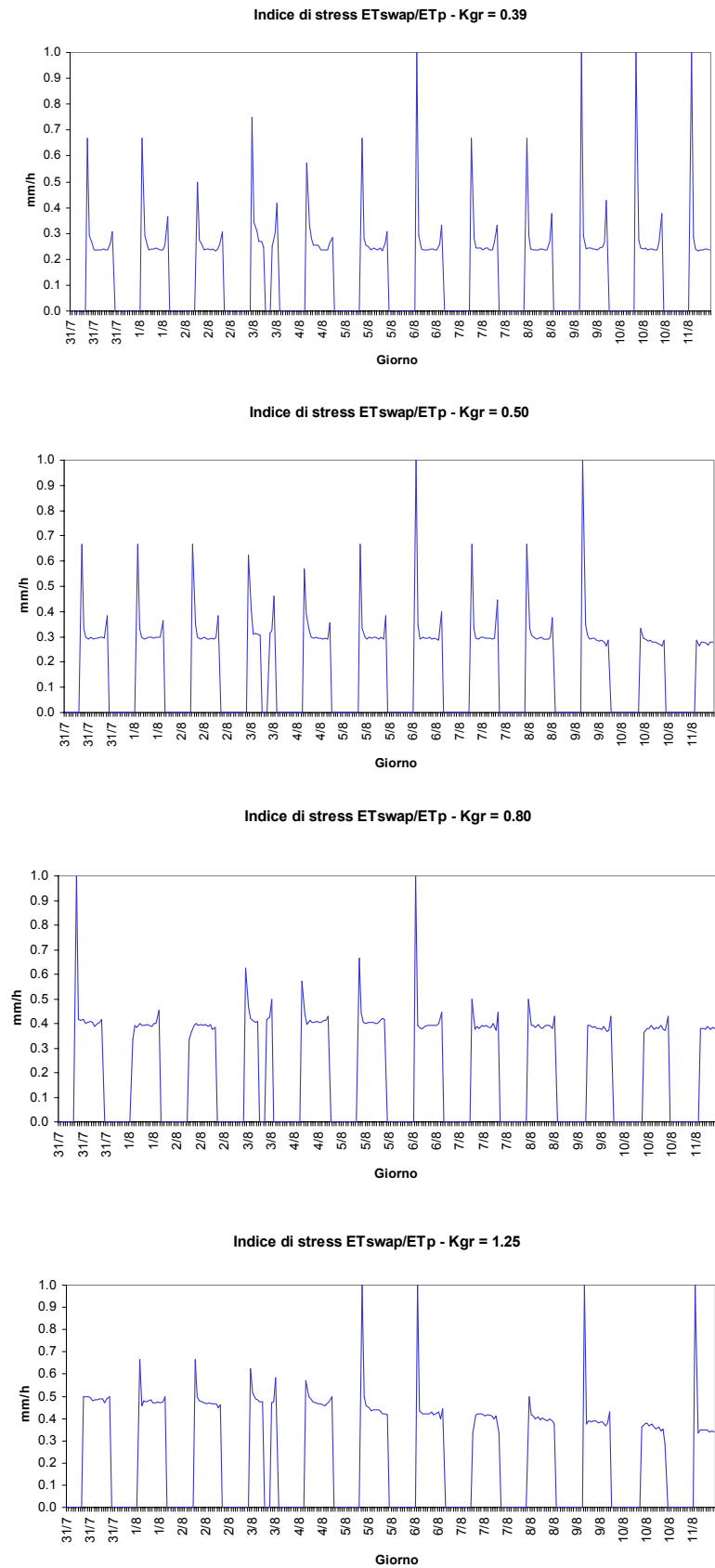


Grafico 23 – Andamento dell'indice di stress  $ET_{swap}/ET_p$  a partire dalla simulazione di SWAP con diversi valori di  $k_{gr}$  per il periodo dal 31 luglio all'11 agosto 2010.

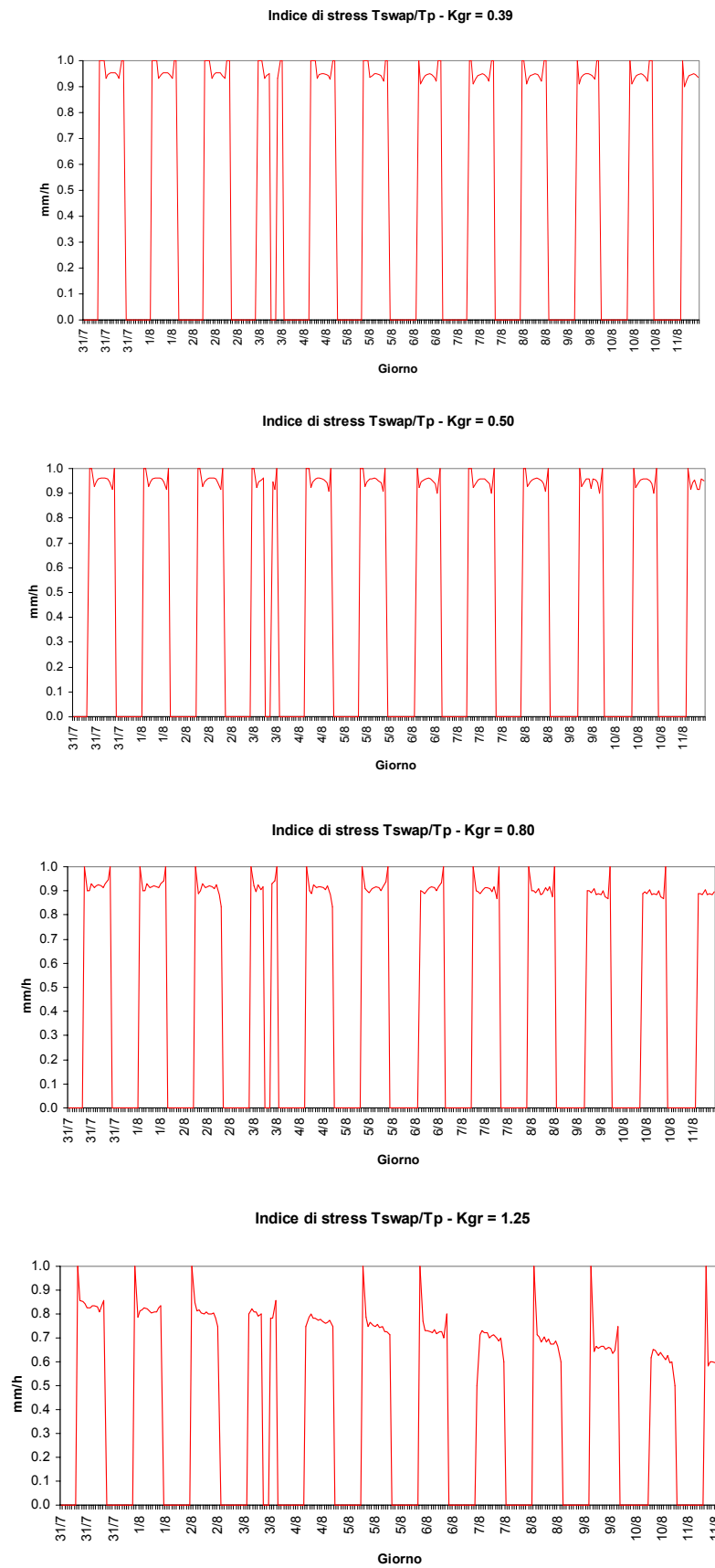


Grafico 24 – Andamento dell'indice di stress  $T_e/T_p$  a partire dalla simulazione di SWAP con diversi valori di  $k_{gr}$  per il periodo dal 31 luglio all'11 agosto 2010.

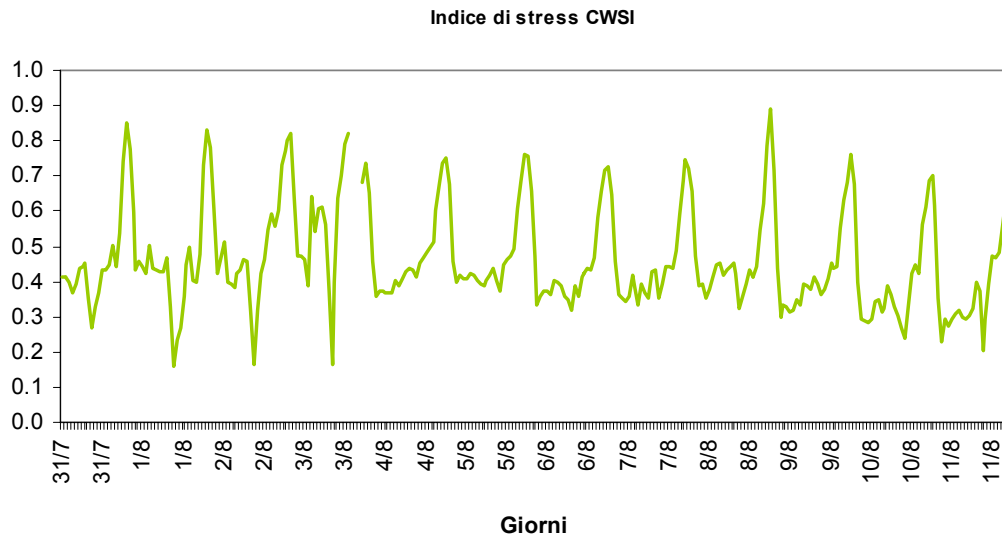


Grafico 25 – Andamento dell'indice CSWI per il periodo dal 31 luglio all'11 agosto 2010.

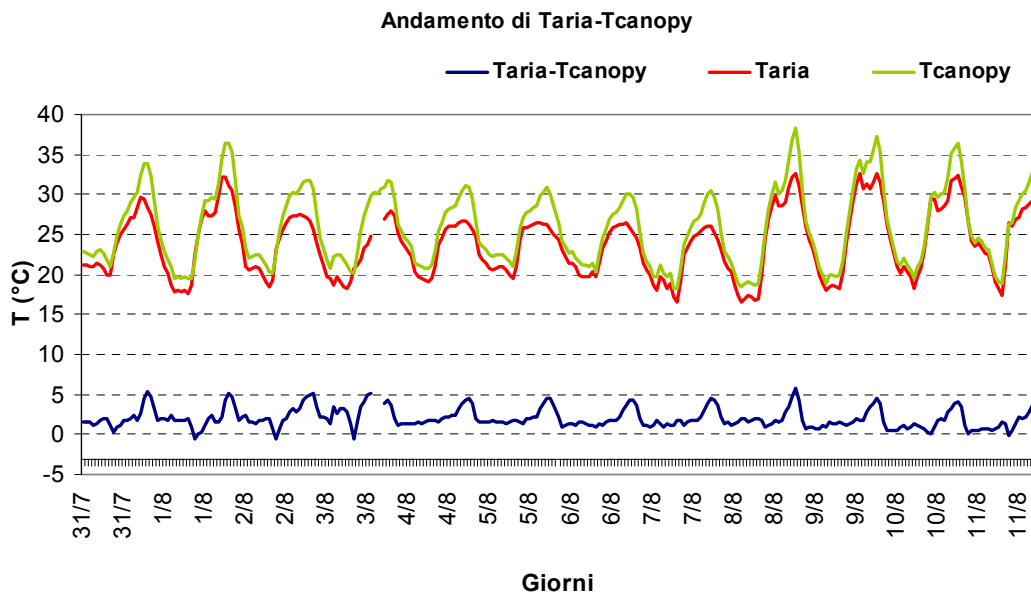


Grafico 26 – Andamenti della temperatura della canopy, dell'aria e della differenza tra queste due per il periodo dal 31 luglio all'11 agosto 2010.



---

## 12 Conclusioni

---

Il progetto di tesi rivede in maniera critica i risultati delle ricerche condotte in merito alla determinazione dell'evapotraspirazione in un sistema arboreo complesso, quale quello della vite, e di attuarne la loro applicazione mettendo in luce limiti e potenzialità delle metodologie in esame.

La complessità dei modelli di simulazione associata alla difficoltà di reperire una grande quantità di dati, spesso affetti da errori diversi perché ottenuti con metodologie diverse, rendono difficile l'utilizzo di molti modelli per scopi pratici, quindi è auspicabile lo sviluppo di modelli che riducano le grandezze da monitorare a pochi parametri fisiologici.

In riferimento al punto 1 degli obiettivi, ovvero verificare l'adattabilità alle colture arboree dei **modelli di bilancio idrico** nati per le colture erbacee, il lavoro di tesi ha dimostrato che:

- i modelli di simulazione del bilancio idrologico, originariamente concepiti per colture erbacee con copertura uniforme del suolo, possono essere utilizzati per colture arboree complesse in condizioni di aridità, come la vite in ambiente siciliano. Tuttavia il modello SWAP tende a sovrastimare l'evaporazione dal suolo a seguito di eventi piovosi;
- la funzione di attingimento radicale è in grado di descrivere con sufficiente precisione il comportamento fisiologico della pianta, consentendo di valutare l'insorgenza di condizioni di stress idrico;
- le simulazioni hanno portato alla definizione del coefficiente di estinzione della radiazione per la vite allevata a spalliera pari a 0.80 (dato piuttosto incerto in letteratura) in quanto la simulazione ottenuta con tale valore riesce a spiegare meglio la condizione di stress idrico riscontrata in campo;
- uno svantaggio nell'applicazione del modello SWAP è che necessita della caratterizzazione di numerosi parametri, spesso non noti; a tal proposito è stato dimostrato che è possibile caratterizzare tramite inversione le proprietà idrauliche del suolo, partendo dal contenuto idrico volumetrico.

In riferimento al punto 2 degli obiettivi, ovvero sviluppare ed implementare un modello di **bilancio energetico** a doppia sorgente da osservazioni nel campo termico acquisite con sensori ad alta risoluzione spaziale, al fine di determinare l'evapotraspirazione effettiva del sistema colturale, il lavoro di tesi ha dimostrato che la traspirazione calcolata attraverso il modello energetico concorda nell'andamento con quella simulata dal modello di bilancio idrico con coefficiente di estinzione pari a 0.80, anche se tende a sovrastimarla, sia utilizzando la temperatura radiometrica da termocamera sia la temperatura radiometrica dai termometri IR.

In riferimento al punto 3 degli obiettivi, ovvero valutare l'utilizzazione di strumentazioni di semplice impiego (termometri) per la stima dello stress idrico nelle colture arboree, si è visto che

- le simulazioni del modello energetico prodotte utilizzando la temperatura radiometrica dei termometri sono simili a quelle prodotte implementando la temperatura radiometrica da termocamera. In questo caso le immagini nel campo termico sono servite a calibrare i parametri del modello TSEB;
- i vantaggi dell'utilizzo di un modello energetico per la stima dello stress sono notevoli, in quanto il modello non richiede la caratterizzazione del suolo e in termini di costo richiede solo l'installazione di termometri IR in aggiunta alla stazione meteorologica aziendale.

I risultati ottenuti da entrambi i modelli sono stati confrontati con tecniche di misure indipendenti quali il SAP-FLOW, che misura il flusso xilematico, e la tecnica Sonic-Eddy-Covariance, che misura i flussi energetici del

campo. Quest'ultima tecnica, considerata uno standard per la comunità scientifica, risulta essere poco affidabile in caso di colture eterogenee, come la vite allevata a spalliera, oltre ad essere economicamente non sostenibile per scopi pratici ed è per questo che è necessario sviluppare tecniche alternative che possano essere applicate a scala aziendale.

Una volta ottenute le stime dell'evapotraspirazione sono stati calcolati gli indici di stress, come dal punto 4 degli obiettivi, e si è visto che:

- la stima dello stress attraverso l'indice  $ET_e/ET_p$  non è indicativa, in quanto attribuisce lo stress alla frazione evaporativa dal suolo, che in realtà tende ad annullarsi;
- tra gli indici di stress proposti dalla letteratura il più utile ai fini pratici è quello basato sulla traspirazione ( $T_e/T_p$ ) che costituisce la componente principale dell'evapotraspirazione durante il periodo di maggiore aridità.

Dal punto di vista delle potenzialità applicative, questo lavoro consente di migliorare notevolmente la valutazione dei fabbisogni irrigui nel sistema colturale analizzato. Questo, nella gestione pratica dell'irrigazione, permette di individuare il momento di intervento irriguo al fine di migliorare la qualità. Da questo punto di vista la figura dell'agricoltore risulta comunque cruciale: di fatti i modelli servono da supporto, ma sarà l'agricoltore a decidere in funzione della fase fenologica e della distanza dalla raccolta se effettuare o meno l'intervento irriguo. Per garantire una gestione idrica del vigneto sempre più efficiente e l'ottenimento di produzioni di qualità, la facilità di utilizzo del modello è un requisito obbligatorio.

Mettendo a confronto i modelli SWAP e TSEB, il secondo risulta sicuramente più agevole in termini operativi e di costo inferiore, ma presenta ancora dei problemi nella stima dei flussi, oltre a richiedere ulteriori calibrazioni e validazioni per condizioni climatiche, forme di allevamento e cultivar diverse che sono al momento in corso.

## APPENDICE A – RICOSTRUZIONE DEI DATI MANCANTI

I dati di vento mancanti sono stati ricostruiti a partire da quelli provenienti dalla stazione meteo n° 305 del SIAS, situata a Mazara Del Vallo; i valori di velocità del vento, suddivisi per fasce orarie, presi all’altezza di 10 m presentano una maggiore correlazione con quelli della stazione SEC (Grafico 27), quindi sono stati scalati all’altezza di quest’ultima, secondo l’equazione logaritmica proposta da *Allen et al.* (1998):

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)} \quad (\text{Appendice A - 63})$$

dove  $u_2$  [ $\text{m s}^{-1}$ ] è la velocità del vento presa a 2 metri,  $u_z$  [ $\text{m s}^{-1}$ ] è la velocità del vento presa all’altezza  $z$  [m].

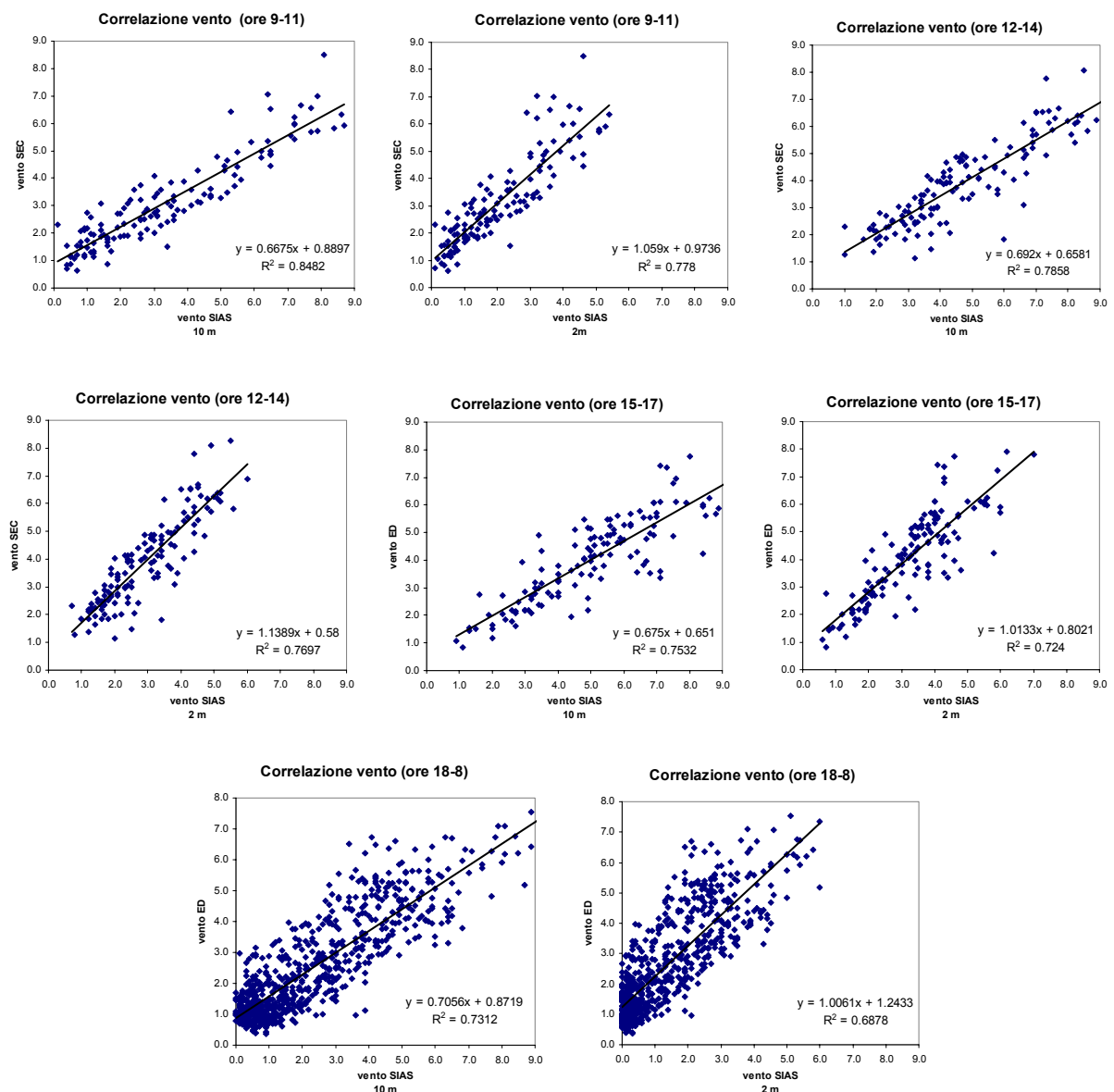


Grafico 27 - Studio di correlazione tra la stazione meteo SIAS e la stazione micro-meteorologica SIAS (a 10 e a 2 m di altezza), diviso per fasce orarie.

La seconda correzione è stata effettuata attraverso la retta di regressione tra i dati meteo della stazione meteo SEC e quelli della stazione meteo SIAS scalati da 10 a 2 m.

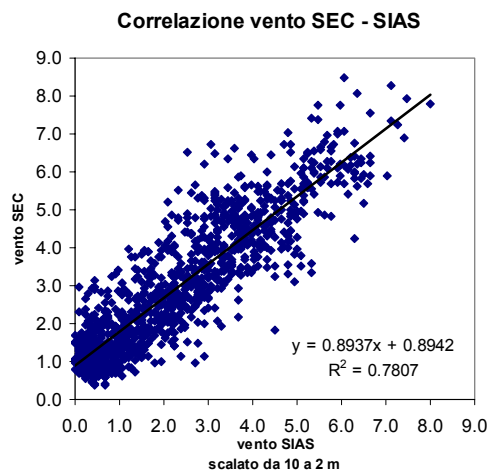


Grafico 28 – Correlazione tra le velocità del vento scalate da 10 a 2 m e le velocità misurate dalla stazione micro-meteorologica.

---

**BIBLIOGRAFIA**

---

- Agnese C., Blanda F., Cammalleri C., Ciralo G., D'Urso G., Iovino M., et al. (2008). A cura di Agnese C. *Sviluppi recenti e nuove tecnologie per la stima dei fabbisogni irrigui in ambiente mediterraneo*. Volume sui risultati della ricerca condotta nell'ambito del progetto: "Modellistica idrologica e telerilevamento satellitare a supporto delle informazioni agro-meteorologiche della Regione Sicilia". Palermo. ISBN: 978-88-6305-002-8.
- Al-Kaisi M.M., Yin X. (2003). *Effects of nitrogen rate, irrigation rate and plant population on corn yield and water use efficiency*. *Agronomy Journal*, 95: 1475–1482.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998). *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements*. FAO irrigation and drainage. Paper 56, Rome, Italy. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>
- Anderson M.C., Norman J.M., Diak G.R., Kustas W.P. and Mecikalski J.R. (1997). *A two-source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing*. *Remote Sensing Environ.*, 60: 195-216.
- Annan K. (2000). *Un Millennium Summit*. <http://www.un.org/millennium/summit.htm>
- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, U., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A.S., Martin, P.H., Berbigier, P., Bernhofer, C., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grunwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R. & Vesala, T. (2000) *Estimates of the Annual Net Carbon and Water Exchange of Forests: The EUROFLUX Methodology*. *Advances in Ecological Research* 30, 113-175.
- Baldocchi, D. (2005). *Argomenti avanzati di Biometeorologia e Micrometeorologia. Lezione 2*. <http://nature.berkeley.edu/biometlab/espm228/>
- Baldocchi, D., Valentini, R., Running, S., Oechel, W. & Dahlman, R. (1996) *Strategies for measuring and modelling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems*. *Global Change Biology*, 2: 159-169.
- Baldocchi D.D., Hicks B.B. & Meyers, T.P. (1988) *Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods*. *Ecology*, 69: 1331-1340.
- Barbagallo S., Consoli S., D'Urso G., Toscano A. (2002). *Valutazione delle prestazioni dei sistemi irrigui mediante tecniche di telerilevamento: applicazione ad un comprensorio irriguo siciliano*. 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche. Potenza 16-19 settembre 2002.
- Baroni G., Facchi A., Gandolfi C., Ortuani B., Horeschi D., Van Dam J.C. (2009). *Valutazione funzionale di diversi metodi per la stima dei parametri idraulici del suolo mediante l'utilizzo di due modelli idrologici*. IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria. Ischia Porto, 12-16 settembre 2009, memoria n. 3-1.
- Belmans C. Wesseling J.G. and Feddes R.A. (1983). *Simulation of the water balance of a cropped soil: SWATRE*. *Journal Hydrology*, 63: 271-286.
- Bica D. (2007). *Vitigni di Sicilia*. Palermo: Regione Sicilia, Assessorato agricoltura e foreste, Servizi allo sviluppo, Dipartimento Interventi Infrastrutturali.
- Bindi M., Miglietta F., Gozzini B., Orlandini S., Seghi L. (1997). *A simple model for simulation of growth in grapevine (Vitis vinifera L.)*. I. Model description. *Vitis*, 36: p.67-71.
- Black T.A., Gardner W.R. and Thurtell G.W. (1969). *The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil*. *Soil Science Society of America Journal*, 33: 655-660.
- Boesten J.J.T.I and Stroosnijder L. (1986). *Simple model for daily evaporation from fallow tilled soil under spring conditions in a temperate climate*. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 34: 75-90.
- Bota J., Flexas J., Medrano H. (2001). *Genetic variability of photosynthesis and water use in Balearic grapevine cultivars*. *Annals of Applied Biology*, 138: 353–361.
- Bouma J. (1989). *Using soil survey data for quantitative land evaluation*. *Developments in soil science*, 9:177-213.
- Bowen I.S., (1926). *The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface*. *Physical Review*, 27: 779–787.
- Bravdo B., Hepner Y., Loinger C., Cohen S., Tabacman H. (1985). *Effect of irrigation and crop level on growth, yield and wine quality of Cabernet Sauvignon*. *American Journal of Enology and Viticulture*, 36: 132–139.

- Brivio P. A., Lechi G., Zillioli E. (2006). *Principi e metodi di Telerilevamento*. Città Studi Edizioni.
- Brutsaert W. and Sugita M. (1992). Regional Surface Fluxes from Satellite-Derived Surface Temperatures (AVHRR) and Radiosonde Profiles Boundary-Layer. *Meteorology*, 58: 355-366.
- Buono R. e Vallariello G. (2002). *Introduzione e diffusione della vite (Vitis vinifera L.) in Italia*. *Delpinoa*, 44: 39-51.
- Burba G.G., Anderson D.J. (2005). *Introduction to the Eddy Covariance Method: General Guidelines and Conventional Workflow*. LI-COR Biosciences, pp. 141.
- Campbell G.S. (1985). *Soil Physics with BASIC. Transport Models for Soil-Plant Systems*. Elsevier, Amsterdam.
- Campbell G.S. and Norman J.M., (1998). *An Introduction to Environmental Biophysics*. Springer-Verlag, New York.
- Campos I., Neale C.M.U., Calera A., Balbontín C, González-Piqueras J. (2010). *Assessing satellite based basal crop coefficients for irrigated grapes (Vitis vinifera L.)*. *Agricultural Water Management* , doi:10.1016/j.agwat.2010.07.011.
- Carbonneau A. and Cargnello G. (2003). *Architecture de la vigne et systèmes de conduites*. Dunod Editore, Paris, p. 123.
- Carsel R.F., Parrish R.S. (1988). *Developing joint probability distributions of soil water characteristics*. *Water Resources Research*, 24: 755-769.
- Cavazza L. (1981). *Fisica del terreno agrario*. Edizioni UTET, Torino. p. 432-439.
- Cavazza L. (1997). *Acqua disponibile e acqua facilmente utilizzabile*, in: Angeli F., *Metodi di Analisi Fisica del Suolo*, Ministero per le Politiche Agricole, Osservatorio Nazionale Pedologico e per la Qualità del Suolo. Parte VIII, 8: 139-141.
- Choudhury B.J. (1983). *Simulating the effects of weather variables and soil water potential on a corn crop canopy temperature*. *Agriculture Meteorology*, 29: 169–182, Doi:10.1016/0002-1571(83)90064-X.
- Choudhury BJ (1989). *Estimating evaporation and carbon assimilation using infrared temperature data Vistas in Modeling*. In: Asrar G., *Theory and applications of optical remote sensing*. Wiley, New York, pp 628–690.
- Cifre J., Bota J., Escalona J.M., Medrano H., Flexas J. (2005). *Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (Vitis vinifera L.)*. *An open gate to improve water-use efficiency?* *Agriculture Ecosystem and Environment*, 106:159-170.
- Cramer G.R., Ergül A., Grimplet J., Tillett R.L., Tattersall E.A.R., Bohlman M.C., Vincent D., Sonderegger J., Evans J., Osborne C., Quilici D., Schlauch K.A., Schooley D.A. and Cushman J.C. (2007). *Water and salinity stress in grapevines: early and late changes in transcript and metabolite profiles*. *Functional and Integrative Genomics*, 7: 111–134.
- D'Urso G., Menenti M., Santini A. (1999). *Regional application of one-dimensional water flow models for irrigation management*. *Agricultural Water Management*, 40: 291-302.
- Dalton F.N. (1987). *Measurement of soil water content and electrical conductivity using time domain reflectometry*. In *Proceedings of the International Conference on measurement of Soil and Plant Water Status*, 1. Utah State University, 95-8.
- Delrot S., Picaud S., Gaudillère J.P. (2001). *Water transport and aquaporins in grapevine*. In *Molecular Biology & Biotechnology of the grapevine*. Kluwer Academic Publishers. pp 241-262.
- Downey M.O., Harvey J.S. and Robinson S.P. (2004). *The effect of bunch shading on berry development and flavonoid accumulations in Shiraz grapes*. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 10: 55–73.
- Drago A. (2005). *Atlante climatologico della Sicilia – Seconda edizione*. *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, 2: 67-83.
- Düring H., Loveys B.R., Dry P.R. (1996). *Root signals affect water use efficiency and shoot growth*. *Proc. Workshop Strategies to Optimize Wine Grape Quality*. *Acta Horticulturae*. pp 427.
- Eastham J., Gray S.A. (1998). *A preliminary evaluation of the suitability of sap flow sensors for use in scheduling vineyard irrigation*. *American Journal of Enology and Viticulture*, 49:171-176.
- Escalona J.M., Flexas J., Bota J., Medrano H. (2003). *From leaf photosynthesis to grape yield: influence of soil water availability*. *Vitis*, 42: 57–64.

- Facchi A., Baroni G., Boschetti M., Gandolfi C. (2009). *Comparazione di metodi per la determinazione dell'indice di area fogliare in un campo a mais*. IX Convegno Nazionale dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria Ischia Porto, 12-16 settembre 2009, memoria n. 2-2.
- Feddes R.A and Raats P.A.C. (2004) *Parameterizing the soil-water-plant root system*. In Feddes R.A, de Rooij G.H. and van Dam J.C., *Unsaturated-zone Modeling. Progress, Challenges and Applications*. Kluwer Academic Publishers. p 364.
- Feddes R.A., Kowalik P.J., Zaradny H. (1978). *Simulation of field water use and crop yield. Simulation monographs*. Pudoc. Wageningen. pp189.
- Fereres E. (2003). *Water productivity of crop plants in the Mediterranean*. In: Proceedings of the Workshop Optimisation of Water Use by Plants in the Mediterranean, Cala Bona (Mallorca).
- Flexas J., Bota J., Cifre J., Escalona J.M., Galmés J., Lefi E., Martínez-Cañellas S.F., Moreno M.T., Ribas-Carbó M., Riera D., Sampol B. and Medrano H. (2004). *Understanding downregulation of photosynthesis under water stress: future prospects and searching for physiological tools for irrigation management*. *Annals of Applied Biology*, 144: 273–283.
- Flexas J., Bota J., Galmés J., Medrano H. and Ribas-Carbó M. (2006). *Keeping a positive carbon balance under adverse conditions: responses of photosynthesis and respiration to water stress*. *Physiologia Plantarum*, 127: 343–352.
- Foken, T. and Oncley, S.P. (1995). *Instrumental and methodical problems of land surface flux measurements*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76: 1191-1193.
- Fregoni M. (2005). *Viticultura di qualità*. Editore Phytoline, Verona.
- Gash, J.H.C. (1986) *A note on estimating the effect of limited fetch on micrometeorological evaporation measurements*. *Boundary Layer Meteorology* 35: 409-413
- Gaudillère J.P., Van Leeuwen C. and Ollat N. (2002). *Carbon isotope composition of sugars in grapevines, an integrated indicator of vineyard water status*. *Journal of Experimental Botany*, 369: 757–763.
- Giardini L. (1986). *Agronomia generale 3*. Bologna, Pàtron.
- Gladstone E.A. and Dokoozlian N.K. (2003). *Influence of leaf area density and trellis/training system on the light microclimate within grapevine canopies*. *Vitis* 42: 124–131.
- Goudriaan J. (1977). *Crop meteorology: a simulation study*. Simulation monographs, Pudoc, Wageningen.
- Gower, S.T. & Norman, J.M. (1991) *Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations*. *Ecology*, 72: 1896-1900.
- Granier A., (1985). *Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres*. *Annales des sciences forestières*, 42: 193-200.
- Grant O.M., Tronina L., Jones H.G. and Chaves M.M. (2007). *Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation systems*. *Journal of Experimental Botany*, 58: 815–825.
- Gruber B.R. and Schultz H.R. (2009). *Comparison of physiological parameters for scheduling low-frequency irrigation on steep slopes in a cool climate grape (Vitis vinifera L.) growing region*. *Irrigation Science* (in stampa).
- Hanson J.D., Rojas K.W., Shaffer M.J. (1999). *Calibration and evaluation of the Root Zone. Water Quality Model*. *Agronomy Journal*, 91: 171–177.
- Hargreave, G.L. and Samani Z.A. (1985). *Reference crop evapotranspiration from temperature*. *Applied Engineer. In Agriculture.*, 1, 2, 96-99.
- Heilman J.L., Mc Innes K.J, Savage M.J., Gesh R.W., Lascano R. J. (1994). *Soil and canopy energy balances in a west Texas vineyard*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71: 99–114.
- Hillel D. (1991). *SPACE: A modified soil-plant-atmosphere continuum electroanalog*. *Soil Science Society of America Journal*, 151: 399-404.
- Hillel D. (1998). *Environmental soil physics*. Academic Press. New York.
- IPCC (2008) *Climate change and water*. In: IPCC Tech. Paper VI (Eds. B.C. Bates, Z.W. Kundzewicz, S. Wu, J.P. Palutikof). IPCC Secretariat, Geneva.
- ISTAT (2007). [www.istat.it](http://www.istat.it)

ISTAT (2009). [www.istat.it](http://www.istat.it)

Jackson R.D., Idso S.B., Reginato R.J., Pinter P.J. (1981). *Canopy temperature as a crop water stress indicator*. Water Resources Research, 17:1133–1138. Doi:10.1029/WR017i004p01133.

Jensen M.E., Burman R.D and Allen R.G., (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE manuals and reports on engineering practice 70. ASCE, New York, pp 332.

Johansen O. (1975). *Thermal conductivity of soil*. Ph.D. thesis, University of Trondheim, Trondheim, Norway.

Jones G.V. (2007) *Climate change: observations, projections and general implications for viticulture and wine production*. In: Work Paper No 7, Economics department Whitman College. Eds. Essick E., Griffin P., Keefer B., Miller S. and Storchmann K., Whitman College, Walla Walla, USA. pp. 1–15.

Jones H.G., Stoll M., Santos T., Sousa C. and Chaves M.M. (2002). *Use of infrared thermometry for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine*. Journal of Experimental Botany, 53: 2249–2260.

Kaimal, J.C. and J.J. Finnigan. (1994) *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*. Oxford University Press, Oxford, UK. pp 289

Kalma J.D., McVicar T.R., McCabe M.F. (2008) *Estimating Land Surface Evaporation: A Review of Methods Using Remotely Sensed Surface Temperature Data*. Surveys in Geophysics. Doi: 10.1007/s10712-008-9037-z

Keller M. (2005). *Deficit irrigation and vine mineral nutrition*. American Journal of Enology and Viticulture, 56: 267–283.

Keller M. (2010). *Managing grapevines to optimise fruit development in a challenging environment: a climate change primer for viticulturists*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 16: 56–69.

Kroes J.G., Van Dam J.C., Groenendijk P., Hendriks R.F.A., Jacobs C.M.J. (2008). *SWAP version 3.2. Theory description and user manual*. Wageningen, Alterra, Alterra Report1649(02) - Swap32 Theory description and user manual.doc, pp. 262.

Kustas W.P., and Norman J.M. (1999). *Evaluation of soil and vegetation heat flux predictions using a simple two-source model with radiometric temperatures for partial canopy cover*. Agricultural and Forest Meteorology, 94:13–29.

Kustas W.P., French A.N., Hatfield J.L., Jackson T.J., Moran M.S., Rango A. (2003) *Remote sensing research in hydrometeorology*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69:613–646.

Lascano R.J., Baumhardt R.L., Lipe W.N. (1992). *Measurement of water flow in young grapevines using the stem heat balance method*. American Journal of Enology and Viticulture, 43: 159–165.

Lee X., Massman W. and Law B.E. (2004). *Handbook of micrometeorology. A guide for surface flux measurement and analysis*. Kluwer Academic Press, Dordrecht, pp. 250

Lewis J.M. (1995). *The Story behind the Bowen Ratio*. Bulletin of the American Meteorological Society, 76: 2433–2443.

Liu Y., Pereira L.S., Fernando R.M. (2006). *Fluxes through the bottom boundary of the root zone in silty soils: parametric approaches to estimate groundwater contribution and percolation*. Agricultural water management, 84: 27–40.

Loveys B.R., Stoll M. and Davies W.J. (2004). *Physiological approaches to enhance water use efficiency in agriculture: exploiting plant signalling in novel irrigation practice*. In: Water use efficiency in plant biology. Eds. M.A. Bacon. Blackwell Publishing, Oxford. pp. 113–141.

Maas E.V. and Hoffman G.J. (1977). *Crop salt tolerance-current assessment*. Journal of Irrigation. and Drainage, ASCE, 103: 115–134.

Massman W.J. and Lee X. (2002). *Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges*. Agricultural and Forest Meteorology, 113: 121–144.

Matthews M.A., Anderson M.M., Schultz H.R. (1987). *Phenologic and growth-responses to early and late season water deficits in Cabernet franc*. Vitis, 26: 147–160.

McCarthy M.G. (2000). *Developmental variation in sensitivity of Vitis vinifera L. (Shiraz) berries to soil water deficit*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 6: 136–140.



- McCarthy M.G., Loveys B.R., Dry P.R., Stoll M. (2002). *Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines*. FAO Water Reports, 22: 79–87.
- McMillen, R.T. (1988). *An eddy correlation technique with extended applicability to non- simple terrain*. Boundary Layer Meteorology, 43: 231-245.
- Meneghetti S., Gardiman M. and Calò A. (2006). *Flower biology of grapevine. A review*. Advances in Horticultural Science, 20: 317–325.
- Meyers T.P., Hollinger S.E. (2004). *An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean*. Agricultural and Forest Meteorology, 125: 105-115.
- Möller M., Alchanatis V., Cohen Y., Meron M., Tsipris J., Naor A., Ostrovsky V., Sprintsin M. and Cohen S. (2007). *Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine*. Journal of Experimental Botany, 58: 827–838.
- Monteith J.L. (1965). *Evaporation and the Environment*. In: G.E. Fogg (ed.), The state and movement of water in living organisms. Cambridge University Press.
- Monteith J.L. and Unsworth M. H. (2008). *Principles of environmental physics*. Academic Press, pp. 418.
- Morlat R., Penavayre M., Jacquet A., Asselin C. and Lemaitre C. (1992). *Influence des terroirs sur le fonctionnement hydrique et al photosynthèse de la vigne en millésime exceptionnellement sec (1990). Conséquence sur la maturation du raisin*. International Journal of Vine and Wine Sciences, 26: 197–218.
- Mualem, Y. (1976). *A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media*. Water Resour. Res., 12: 513-522.
- Mugnai S. (2004). *Elementi di ecofisiologia vegetale*. In Uso razionale delle risorse nel florovivaismo:l'acqua. A cura di Pardossi A., Incrocci L., Marzalletti P. Quaderno ARSIA N°5. Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione nel settore Agricolo-forestale, Firenze.
- Napolitano R., Altobelli A., Feoli A., Bressana A. (2005). *Stima della biomassa verde in diverse tipologie forestali del Friuli Venezia Giulia attraverso il satellite MODIS e misure indirette in campo di LAI*. XV Congresso della società italiana di ecologia. Torino.
- Nobel PS (2005). *Physicochemical and Environmental Plant Physiology 3rd ed*. Elsevier Acad. Press. pp. 106–123.
- Norman, J.M., Kustas, W.P, Humes K. S.(1995). *Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature*. Agricultural and Forest Meteorology, 77: 263-293.
- Norman, J.M., Kustas, W.P, Prueger J. H., Diak G.R. (2000). *Surface flux estimation using radiometric temperature :A dual temperature-different method to minimize measurement errors*. Water Resources Research. 36: 2263-2274.
- Ojeda H., Andary C., Kraeva E., Carbonneau A., Deloire A. (2002). *Influence of pre-and postveraison water deficit on synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of Vitis vinifera cv. Shiraz*. American Journal of Enology and Viticulture, 53: 261–267.
- OIV - *Organisation Internationale de la Vigne et du Vin*. (2007).SITUAZIONE DEL SETTORE VITIVINICOLO MONDIALE NEL 2007. <http://oiv.fnaxy.com/oiv/info/itconjoncture>
- Pàstena B. (1990). *Trattato di Viticoltura italiana*. Edizioni agricole, Bologna. ISBN 88-206-3124-5.
- Peguy C.P. (1970) *Précis de Climatologie*. Masson, Paris. p. 468.
- Penaman H. L. (1948). *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proceedings of the Royal Society A, 193: 120-146.
- Ping L., Urban L., Ping Z.. (2004). *Granier 's Thermal Dissipation Probe ( TDP ) Method for Measuring Sap Flow in Trees : Theory and Practice I Granier Sap Flow Measuring Methodby Review Literature And Arts Of The Americas*. Science China Press, 46:631- 646, ISSN: 16726650.
- Poni S., Bernizzoni F., Civardi S., Gatti M., Porro D. and Comin F. (2009) *Performance and water-use efficiency (singleleaf vs. whole-canopy) of well-watered and half-stressed split-root Lambrusco grapevines grown in Po Valley (Italy)*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 129: 97–106.
- Portoghese I., Fratino U., Vurro M. (2002). *Definizione di un indice climatico per l'analisi dell'interazione clima-suolo-vegetazione*. 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche. Potenza.16-19 settembre 2002.
- Priestley C.H.B. and Taylor R.J. (1972). *On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters*. Monthly Weather Review, 100: 81-92.

- Prueger J.H., Hatfield J.L., Kustas W.P., Hipps L.E., Macpherson J.I., Neale C., Eichinger W.E., Cooper D.I., Parkin T.B. (2005). *Tower and aircraft eddy covariance measurements of water vapor, energy, and carbon dioxide fluxes during SMACEX*. Journal Hydrometeorology, 6: 954–960.
- Ragab R., Prudhomme C. (2002). *Climate change and water resources management in arid and semi-arid regions: prospective and challenges for the 21st century*. Biosystems Engineering, 81: 3–34.
- Raupach, MR, Finnigan, JJ. 1997. *The influence of topography on meteorological variables and surface-atmosphere interactions*. Journal of Hydrology, 190:182-213.
- Rebmann, C., Göckede, M., Foken, T., Aubinet, M., Aurela, M., Berbigier, P., Bernhofer, C. (2005). *Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modeling*. Theoretical and Applied Climatology.
- Reynolds A.G. and Wardle D.A. (1989) *Influence of fruit microclimate on monoterpene levels of Gewürztraminer*. American Journal of Enology and Viticulture, 40: 149–154.
- Ripoche A., Metay A., Celette F., Gary C. (2011). *Changing the soil surface management in vineyards: immediate and delayed effects on the growth and yield of grapevine*. Plant Soil, 339:259–271.
- Ritchie J.T. (1972). *A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover*. Water Resources Research., 8: 1204-1213.
- Robinson,(1966). *Solar Radiation*. Elsevier, Amsterdam.
- Romano N.(2004). *Appunti del corso Gestione delle risorse idriche*. Università degli studi di Napoli Federico II, Facoltà di Agraria.
- Rosenzweig C., Hillel D. (1998). *Climate change and the global harvest: potential impacts of the greenhouse effect on agriculture*. Oxford University Press.
- Rosset M., Riedo M., Grub A., Geissmann, M. and Fuhrer J., (1997). *Seasonal Variations in radiation and energy balances of permanent pastures at different altitudes*. Agricultural and Forest Meteorology, 86: 245-258.
- Roth K., Schulin R., Flüher H. and Attinger W. (1990). *Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach*. Water Resources Research 26: 2267–2273, doi:10.1029/WR026i010p02267.
- Saltini A. (2010). *Gusto del vino e pratiche di cantina tra tradizione italiana e innovazione francese*. Nuova Terra Antica Firenze. ISBN 978-88-96459-08-9.
- Santini A. (1992). *Modelling water dynamics in the soil-plant-atmosphere system for irrigation problems*. Milano. Excerpta, 6: 133-166.
- Schaap M.G. (2004). *Accuracy and uncertainty in PTF predictions. Development of pedotransfer functions in soil hydrology*. Eds. Ya. Pachepsky e W.J. Rawls, Developments in soil science, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 30: 33-43.
- Schultz H.R. (1995). *Grape canopy structure, light microclimate and photosynthesis. I. A two-dimensional model of spatial distribution of surface area densities and leaf ages in two canopy systems*. Vitis, 34: 211–215.
- Schultz H.R. (1996). *Water relations and photosynthetic responses of two grapevine cultivars of different geographical origin during water stress*. Acta Horticulturae, 427: 251–266.
- Schultz H.R. and Jones G.V. (2008) *Sozio-ökonomische Aspekte des Klimawandels: Gewinner und Verlierer. Veränderungen in der Landwirtschaft am Beispiel des Weinbaus*. In: Warnsignal Klima. Eds. J.L. Lozán, H. Graßl, G. Jendritzky, L. Karbe, K. Reise. GEO Wissenschaftliche Abhandlungen: Hamburg. pp. 268–273.
- Schultz H.R. and Stoll M. (2010). *Some critical issues in environmental physiology of grapevines: future challenges and current limitations*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 16: 4–24.
- Shani U., Waisel Y., Eshel A., Xue S. and Ziv G. (1993) *Responses to salinity of grapevine plants with split root systems*. New Phytologist, 124: 695–701.
- Šimůnek J., Huang K. and van Genuchten M. T. (1998). *The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0*. Research Report No. 144, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, pp. 164.
- Singh V.P., Frevert D.K. (2002). *Mathematical Modeling of Large Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Littleton, Colorado, pp. 891.

- Smith M. (1992). *CROPWAT, a computer program for irrigation planning and management*. FAO Irrigation and Drainage, Paper 46. Rome, Italy.
- Soar C.J., Speirs J., Maffei S.M., Penrose A.B., McCarthy M.G. and Loveys B.R. (2006). *Grape vine varieties Shiraz and Grenache differ in their stomatal response to VPD: apparent links with ABA physiology and gene expression in leaf tissue*. Australian Journal of Grape and Wine Research, 12: 2–12.
- Spano D., Duce P., Snyder R.L., Paw U.K.T., Ferriera M.I. (2000). *Estimating tree and vine evapotranspiration with emphasis on surface renewal*. Acta Horticulturae, 537:37-43.
- Stevens R.M. and Walker, R.R. (2002) *Response of grapevines to irrigation-induced saline-sodic soil conditions*. Australian Journal of Experimental Agriculture, 42: 323–331.
- Stoll M. and Jones, H.G. (2007) *Thermal imaging as a viable tool for monitoring plant stress*. Journal International de Sciences de la Vigne et du Vin, 41: 77–84.
- Sudar, R.A., Saxton, K.E., Spomer, R.G., 1981. *A predictive model of water stress in corn and soybeans*. Trans. ASAE 24, 97–102.
- Swinbank, WC, (1951). *The measurement of vertical transfer of heat and water vapour by eddies in the lower atmosphere*. Journal of Meteorology, 8: 135-145.
- Taylor S.A. and Ascroft G.M. (1972). *Physical Edaphology*. San Francisco.
- Tonietto J. and Carbonneau A. (2004) *A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide*. Agricultural and Forest Meteorology, 124: 81–97.
- Topp G.C., Davis J.L. and Annan A.P. (1980). *Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines*. Water Resources Research, 16: 574–582. Doi:10.1029/WR016i003p00574.
- Troufleau D., Lhomme J.P., Monteny B., Vidala A. (1997). *Sensible heat flux and radiometric surface temperature over sparse Sahelian vegetation*. I. An experimental analysis of the kB-1 parameter. Journal of Hydrology, 188-189: 815-838
- Twine, T.E. et al. (2000). *Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland*. Agricultural and Forest Meteorology, 103: 279-300.
- Valenti L., Donna P., Carletti F., Mattivi F. (2004). *Effetti del livello irriguo sui mosti e sui profili sensoriali dei vini*. L'informatore Agrario, 28: 45-50.
- Valentini, R., D. Baldocchi, et al. (1999). *FLUXNET: a challenge that is becoming reality*. Global Change News Letter, 37: 15-17.
- Van Genuchten M.Th. (1980). *A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils*. Soil Science Society of America Journal, 44: 892-898.
- Van Genuchten M.Th., Leij F.J. and Yates S.R. (1991). *The RETC code for quantifying the hydraulic functions for unsaturated soils*. U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California.
- Van Leeuwen C. and Seguin G. (1994). *Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée per l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin*. Journal of Vine and Wine Sciences, 28: 81–110.
- Van Zyl J.L., Weber H.W. (1981). *The effect of various supplementary irrigation treatments on plant and soil moisture relationships in a vineyard (Vitis vinifera var. Chenin Blanc)*. South African journal of enology and viticulture, 2: 83-99.
- Wample R.L., Smthymn R. (2002). *Regulated deficit irrigation as a water management strategy in Vitis vinifera L. production*. In "Deficit irrigation practices" – FAO. da vedere il riferimento
- Williams L.E. (1996). *Grape*. In: Zamski, E. (Ed.), *Photoassimilate Distribution in Plants and Crops: Source-Sink Relationships*. Marcel Dekker, New York. pp. 851–881.
- Williams L.E. and Matthews M.A. (1990). *Grapevine*. In: Irrigation of Agricultural Crops-Agronomy. Monograph nor. 30, ASA-CSSA-SSSA.
- Wilson K., Goldstein A., Falge E., Aubinet M., Baldocchi D., Berbigier P., Bernhofer C., Ceulemans R., Dolman H., Field C., Grelle A., Ibrom A., Law B.E., Kowalski A., Meyers T., Moncrieff J., Monson R., Oechel W., Tenhunen J., Valentini R., Verma S. (2002). *Energy balance closure at FLUXNET sites*, Agricultural and Forest Meteorology, 113: 223–243.

Wyngaard , J.C. (1990). *Scalar fluxes in the planetary boundary layer-theory, modeling and measurement*. Boundary Layer Meteorology, 50: 49-75.

Xiloyannis C., Montanaro G., Sofo A., Dichio B. (2004). *Irrigazione sostenibile delle specie arboree da frutto in ambiente mediterraneo*. In “Irrigazione sostenibile-la buona pratica irrigua”. Progetto editoriale PANDA, vol. No. 5. Edizioni L’informatore Agrario.

## **Ringraziamenti**

Gli avvenimenti che si sono susseguiti in questi ultimi tre anni, sia in positivo che in negativo, mi hanno resa una persona migliore, ma non lo sarei diventata se vicino a me non fossero state presenti delle persone ad incoraggiarmi e sostenermi. Si tratta di poche parole, ma veramente sentite.

GRAZIE: al Prof. (D'Urso, ovviamente), che con gioia mi ha accolta e guidata in un nuovo percorso; a tutto il gruppo siciliano, che ha permesso la raccolta dei numerosi dati di questo progetto; a Francesco V., per il suo sostegno tecnico a distanza; a Mario P. e Sasà junior, con cui ho condiviso parte di questo lavoro; a Kikka, sei indispensabile!; a mio padre, che nonostante la mia età "avanzata" ancora viene a prendermi alla stazione; a mio fratello Giovanni, per le interminabili ore di attesa all'aeroporto e a cui chiedo scusa per aver occupato abusivamente la sua stanza (ti prometto che finita la tesi te la libero e non farò appello all'usucapione, hehehe); a tutto il gruppo di Ariespace, che mi ha sopportata nelle mie crisi un po' isteriche; a te...Circumvesuviana!...causa del 90% delle mie crisi isteriche!...e a me, che PRENDO PRANA E DO PRANA, hehehe (per chi non conoscesse questo mantra indiano consiglio di seguire Annamaria Chiarito che a Zelig Off spiega come affrontare lo stress quotidiano).

