



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PALERMO

**Dottorato di ricerca in “Idronomia Ambientale”**

**XXIV CICLO**

Settore Scientifico Disciplinare AGR/08

**Approfondimenti sulla schematizzazione concettuale tipo  
“Bucket” per la stima dei consumi idrici e dello stress  
idrico di oliveti irrigati a goccia**

**Dottorando**

*Giuseppe Farina*

**Tutor**

*Prof. Giuseppe Provenzano*

**Co-tutor**

*Dott. Giovanni Rallo*

**Coordinatore**

*Prof. Giuseppe Giordano*

---

**A.A 2012-2013**

## Indice

1.	Introduzione alla problematica e obiettivi della ricerca	3
1.1	Modellizzazione degli scambi idrici nel sistema continuo Suolo-Pianta-Atmosfera (SPA): Il modello agro-idrologico FAO 56	5
1.2	Sviluppo dell'apparato radicale delle piante arboree e volume di attingimento	16
1.3	Lo stato idrico del suolo e necessità di posizionare correttamente i sensori udometrici	19
1.4	Lo stato idrico della pianta e metodi speditivi di monitoraggio	30
2.	Materiali e Metodi	54
1.2	Descrizione dell'area di studio e caratteristiche agro-ambientali	54
2.2	Monitoraggio dello stato idrico del suolo	57
2.3	Determinazioni dei parametri biofisici e colturali dell'olivo	58
2.4	Monitoraggio dello stato idrico della pianta e dei flussi evapotraspirativi	61
2.5	Analisi statistica per la validazione del modello	66
3.	Risultati e Discussione	67
3.1	Analisi della gestione irrigua, sviluppo dell'apparato radicale e dimensionamento del volume di prevalente attingimento	67
3.2	Applicazione e validazione del modello di bilancio idrico FAO 56 nella stima dei consumi idrici degli oliveti	81
3.3	Analisi e valutazione dello stato idrico della pianta attraverso misure spettroradiometriche	89
	Conclusioni	97
	Bibliografia	100

## 1. Introduzione alla problematica e obiettivi della ricerca

La riduzione dei consumi idrici in agricoltura nei paesi a clima arido o sub-arido è possibile attraverso l'applicazione di strategie per lo più riguardanti le tecniche irrigue e agronomiche.

Il miglioramento delle tecniche di irrigazione, attuato attraverso il diffondersi degli impianti microirrigui, siano essi superficiali o interrati, ed un sempre più corretto dimensionamento idraulico degli impianti, consentono di raggiungere valori di efficienza d'uso dell'acqua anche superiori al 90%; tali valori possono tuttavia essere ulteriormente incrementati se, in fase di gestione, si forniscono le dosi irrigue strettamente necessarie a sopperire le esigenze fisiologiche della coltura.

Nonostante la buona esperienza degli agricoltori, gli interventi irrigui decisi in conformità a semplici osservazioni della coltura e del terreno portano spesso ad uno spreco di acqua in conseguenza della modesta efficacia delle valutazioni empiriche; diversamente, una precisa valutazione dei volumi da fornire e dell'esatto momento di intervento irriguo può contribuire alla riduzione dei volumi idrici applicati, al fine di incrementare l'efficienza d'uso dell'acqua, e talvolta, migliorare qualitativamente le produzioni.

Le ricerche applicate all'irrigazione hanno individuato nei modelli di bilancio idrico delle colture uno strumento preciso, economico e semplice per valutare, per ciascun tipo di coltura, sia il momento di intervento irriguo che i volumi d'adacquamento da fornire.

Pur se molto affidabili, i modelli di bilancio idrico, soprattutto quelli a fondamento fisico, presentano un limite applicativo conseguente alla laboriosità delle misure necessarie e dell'elaborazione dei dati, cosicché sono spesso utilizzabili solo da operatori specializzati.

Per tale motivo si è diffuso, soprattutto nelle applicazioni via web, l'uso di modelli semplificati del tipo "a serbatoio" o "bucket", che richiedono un modesto numero di dati di input. A questo riguardo, di particolare interesse è l'applicativo IRRISIAS, fornito su piattaforma web, messo a disposizione dal Servizio Informativo Agro-meteorologico Siciliano (SIAS), per assistere agricoltori e tecnici agricoli nella gestione degli interventi irrigui. L'applicazione IRRISIAS si basa sulla stesura del bilancio idrico del suolo che utilizza la procedura del "*dual crop coefficient*" descritta nel quaderno FAO n. 56 (Allen et al., 1998).

L'applicazione dei modelli di bilancio idrico tipo "bucket" richiede ancor oggi alcuni approfondimenti teorico-sperimentali, soprattutto per la gestione dell'irrigazione di colture cosiddette sparse ed irrigate con apporti localizzati. In questi complessi sistemi agricoli si verificano spesso elevati gradienti di contenuto idrico al suolo e di densità radicale che

determinano certamente importanti ripercussioni nei processi di attingimento idrico. I modelli di bilancio agro-idrologico oggi disponibili, ampiamente utilizzati anche nei suddetti sistemi, non approfondiscono il problema della variabilità spaziale degli attingimenti radicali nell'intorno della pianta e pertanto rimane sempre un'alea di incertezza in merito all'attendibilità delle calibrazioni eseguite sulla base delle misure di variabili legate al suolo (contenuto idrico e potenziale matriciale, acqua disponibile, depletion, etc.).

L'approfondimento della tematica può portare a rispondere su due quesiti da sempre trascurati nelle procedure di calibrazione dei modelli di tipo "bucket"; il primo aspetto, di natura scientifica e che condiziona le procedure di calibrazione e validazione, è quello relativo alla scelta del posizionamento dei sensori di umidità del suolo nell'intorno della pianta, in modo che risulti rappresentativo del reale stato idrico medio del sistema. Il secondo aspetto, questa volta di natura tecnico-applicativa, si riferisce invece all'individuazione dell'estensione orizzontale del serbatoio che permette di convertire i volumi di adacquamento espressi per unità di superficie in volumi di irrigazione per pianta.

Con riferimento al comparto "pianta" del sistema "Suolo-Pianta-Atmosfera" (SPA), particolare importanza riveste inoltre la modellizzazione della risposta della coltura a condizioni di deficit idrico. Nei modelli di simulazione agro-idrologica, solitamente, tale risposta è implementata nei processi di attingimento idrico da parte delle radici, importanti per l'ottenimento dei flussi traspirativi effettivi a partire da quelli potenziali. Lo studio di questi processi è di rilevante importanza soprattutto negli ambienti, come quello Mediterraneo, nel quale condizioni deficitarie di umidità del suolo possono perdurare nel corso del ciclo fenologico della coltura. Nasce pertanto la necessità di implementare, all'interno dei modelli di simulazione, nuove schematizzazioni della funzione di stress idrico della pianta che permettano di tenere in conto la sua reale risposta vegeto-produttiva alle condizioni di deficit idrico del suolo.

Obiettivo generale della tesi è quello di approfondire alcuni aspetti della schematizzazione del modello di bilancio agro-idrologico FAO-56 finalizzati alla stima dei consumi idrici della coltura dell'olivo (*Olea europaea* L.) e come un corretto monitoraggio dei contenuti idrici del suolo, possa risultare di fondamentale importanza nella gestione degli interventi irrigui a scala aziendale.

In particolare sono stati affrontati i seguenti obiettivi specifici:

- Analisi dei gradienti di attingimento radicale nell'intorno della pianta attraverso il monitoraggio spazio - temporale dei contenuti idrici del suolo acquisiti con l'ausilio di un

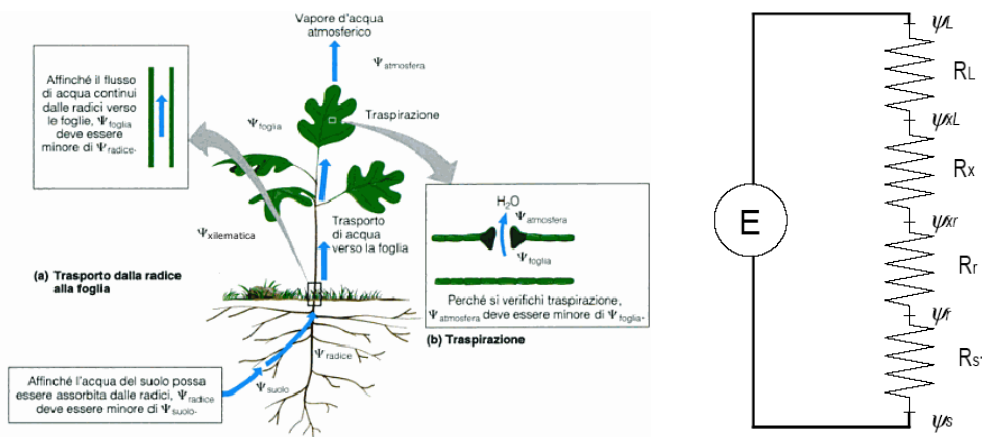
- Valutazione delle dimensioni orizzontali e verticali del serbatoio nel quale si concentrano i processi di attingimento idrico radicale;
- Individuazione delle aree nell'intorno di piante irrigate con metodo microirriguo, nelle quali ubicare i sensori di umidità del suolo, in modo che i dati acquisiti possano essere rappresentativi del reale stato idrico del suolo;
- Validazione della procedura di bilancio idrico proposta nel quaderno FAO n. 56 e modificata per la funzione di stress idrico (Rallo 2010 e Provenzano 2013; Rallo e al., 2013), attraverso misure di contenuto idrico del suolo e di flussi traspirativi della pianta direttamente acquisite in campo nel corso di tre stagioni irrigue, 2009, 2010 e 2011.

La ricerca condotta ha permesso infine di verificare la possibilità d'uso di misure spettroradiometriche speditive, eseguite sia a scala di singola foglia che di canopy, per la valutazione indiretta dello stato idrico della pianta.

### ***1.1 Modellizzazione degli scambi idrici nel sistema continuo Suolo-Pianta-Atmosfera (SPA): Il modello agro-idrologico FAO 56***

L'analisi delle complesse interazioni idriche che avvengono negli ecosistemi agrari, si basa sul concetto di sistema continuo "Suolo-Pianta-Atmosfera" (SPA). Lo studio di tale sistema, che rappresenta l'approccio scientificamente più valido per la descrizione degli scambi idrici tra suolo, pianta ed atmosfera, 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.

All'interno del sistema SPA l'assorbimento di acqua da parte delle radici è influenzato dalla diffusione di questa nell'atmosfera, ma anche dalla velocità con cui l'acqua può muoversi dal suolo alle radici. Così la velocità di traspirazione dipende non solo dall'apertura stomatica e dai fattori atmosferici che influenzano la traspirazione e, nel suo insieme, l'intero processo evapotraspirativo, ma anche dalla velocità con cui l'acqua viene assimilata per via radicale. 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. Per lo studio delle relazioni idriche esistenti tra i componenti del continuo Suolo-Pianta-Atmosfera è utile l'analogia con un circuito elettrico, nel quale il flusso idrico nella pianta può essere descritto attraverso una rete di potenziali, resistenze e capacitance, come illustrato in fig. 1.1.



**Figura 1.1 – Schematizzazione del Continuo-Suolo-Pianta atmosfera (SPA) ed analogia con circuito elettrico ( $\psi_s$  potenziale idrico del suolo =  $-0,01 \div -0,15$  MPa;  $\psi_r$ : potenziale idrico radicale =  $-0,1 \div -0,5$  MPa;  $\psi_{xr}$  potenziale idrico xilematico =  $-0,5 \div -1,0$  MPa;  $\psi_{xl}$  potenziale idrico fogliare =  $-0,2 \div -2,5$  MPa;  $\psi_L$  potenziale idrico dell'aria =  $-50 \div -100$  MPa,  $R_s$ = resistenza idraulica suolo;  $R_r$ = resistenza idraulica radicale;  $R_x$ = resistenza idraulica xilematica;  $R_L$ = resistenza del mesofillo fogliare;  $E$ =ambiente esterno)**

Il movimento dell'acqua nella pianta è governato da regole analoghe a quelle che riguardano il flusso di corrente elettrica, descritto dalla legge di Ohm. Il gradiente di potenziale idrico nel sistema SPA è la “forza” che determina il trasporto attraverso la pianta: l'acqua muove da punti del sistema a maggiore potenziale idrico ad altri, caratterizzati da minori potenziali e così, transitando attraverso la pianta, muove verso l'atmosfera.

La modellizzazione degli scambi idrici nel sistema SPA può seguire diversi approcci, ciascuno dei quali si basa su diverse assunzioni. Secondo una prima classificazione si possono distinguere i modelli fisicamente basati o deterministici ed i modelli sintetici, del tipo “a serbatoio”. I modelli sintetici sono costituiti da equazioni che legano le grandezze in ingresso a quelle in uscita, senza cercare di descrivere fisicamente i processi interni al sistema.

Al contrario, i modelli deterministici cercano di descrivere fisicamente i processi in gioco, prendendo in considerazione parametri fisici, come ad esempio l'umidità del suolo o temperatura, che possono essere stimati per via indiretta o misurati direttamente in campo. Un'altra importante distinzione si ha tra modelli concentrati e modelli distribuiti. Nei modelli concentrati le diverse equazioni descrivono il sistema considerandolo come un'unica cella elementare. Tutti i modelli vengono sviluppati attraverso due fasi fondamentali: la scelta della tipologia di modello e la stima dei parametri. La prima fase consiste sostanzialmente nella scelta delle equazioni in gioco, rappresentate da un sistema di equazioni differenziali che legano gli input agli output del processo. La seconda fase, che permette di stimare i parametri del sistema, rappresenta la fase di calibrazione del modello. Alle due fasi descritte deve seguire la validazione del modello, nella quale il comportamento delle simulazioni deve

essere verificato sulla base di misure di campo differenti da quelle utilizzate per la calibrazione.

Considerando i modelli concentrati che presentano come unità elementare del sistema la pianta sita all'interno di un'unità suolo descritta dalla geometria del sesto, i modelli fisicamente basati (SWAP, ACRUS, ecc.) risolvono in termini numerici ed in modo integrato le complesse espressioni analitiche che descrivono i processi di scambio idrico tra suolo, pianta e bassa atmosfera. Seguendo questa impostazione, è possibile simulare in termini differenziali le componenti del bilancio idrico ed in particolare, attraverso i profili di umidità  $\theta(z)$ , la variazione della riserva idrica del suolo,  $\Delta W$ , in un intervallo temporale,  $\Delta t$ :

$$\Delta W = \int_0^z [\theta(z, t + \Delta t) - \theta(z, t)] dz \quad (1.1)$$

Con riferimento all'impostazione di tipo "bucket" invece, la modellizzazione degli scambi idrici nel sistema SPA è molto semplificata rispetto ai modelli fisici e si basa fondamentalmente su una legge di essiccamento del suolo. In questi modelli, solitamente, il terreno è assimilato ad un serbatoio di assegnata capacità massima,  $TAW$ , definita capacità idrica utilizzabile. Si usano spesso formulazioni semplificate per la stima della traspirazione effettiva della pianta,  $T_a$ , dell'evaporazione effettiva dal suolo,  $E_a$ , che vengono 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. Così nei modelli che seguono questa impostazione, la variazione temporale della riserva idrica nel volume di suolo occupato dall'apparato radicale assume la forma generale:

$$\Delta W = (P_a + I_a - E_a - T_a + \nu)\Delta t \quad (1.2)$$

nella quale viene indicato con  $\Delta W$  la variazione del contenuto d'acqua nel volume di terreno occupato dalle radici, con  $P_a$  ed  $I_a$ , rispettivamente, le aliquote degli apporti idrici naturali ed irrigui che si infiltrano nel suolo nell'unità di tempo (pioggia ad irrigazione efficace), con  $E_a$  il flusso di evaporazione effettiva del suolo, con  $T_a$  il flusso di traspirazione effettiva della coltura e con  $\nu$  il flusso idrico (percolazione profonda) che attraversa il limite inferiore del volume considerato.

Qualunque sia l'approccio seguito per lo studio degli scambi idrici all'interno del sistema SPA è sempre necessario conoscere il termine evapotraspirativo del bilancio idrico, ottenuto dalla combinazione di due processi separati quali l'evaporazione dell'acqua dal suolo e la traspirazione da parte della vegetazione.

La misura diretta dell'evapotraspirazione è possibile solamente con apparecchiature complesse, non sempre facilmente utilizzabili in campo. La forte variabilità spaziale che caratterizza tale grandezza, unitamente alle descritte difficoltà, fa sì che essa venga preferibilmente calcolata a partire da dati climatici, attraverso equazioni che possono essere semiempiriche o ottenute sulla base di un approccio termodinamico. I metodi empirici sono validi quando subordinatamente al verificarsi di specifiche condizioni climatiche e di uso del suolo e non possono dunque essere applicati in modo generalizzato.

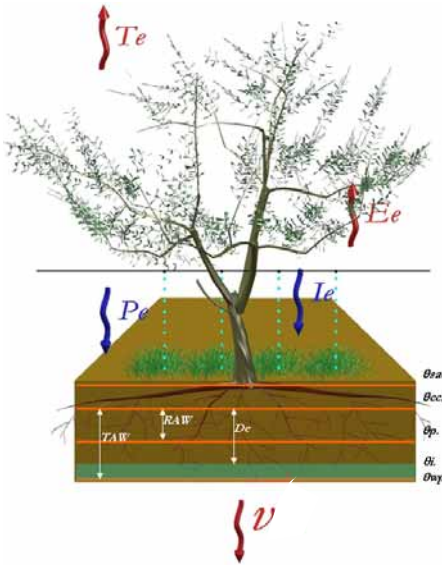
Nel presente lavoro sono state seguite le indicazioni suggerite nella pubblicazione FAO relativa alle linee guida per la valutazione dei consumi idrici (Allen et al. 1998), che consiglia l'applicazione del metodo Penman-Monteith modificato FAO. In particolare ci si riferisce all'evapotraspirazione della 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. Sulla base di tali ipotesi e tenuto conto dell'equazione originale di Penman-Monteith descritta nel quaderno FAO 56, l'evapotraspirazione della coltura di riferimento a scala giornaliera  $ET_{ref}$  [mm giorno<sup>-1</sup>] può essere scritta come segue:

$$ET_{ref} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (1.3)$$

nella quale  $\Delta$  è la pendenza della curva pressione di vapore saturo calcolata alla temperatura  $T_a$  [kPa °C<sup>-1</sup>],  $R_n$  è il flusso di radiazione netta [MJ m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>],  $G$  è il flusso di energia (calore) attraverso il suolo [MJ m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>],  $T_a$  è la temperatura dell'aria rilevata a 2 m dal suolo [°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 [kPa],  $\gamma$  è la costante psicrometrica [kPa °C<sup>-1</sup>] e  $u_2$  è la velocità del vento rilevata a 2 m dal suolo [m s<sup>-1</sup>]. L'insieme minimo di dati necessari per il calcolo di  $ET_{ref}$  è costituito dalla temperatura dell'aria  $T_a$  [°C], dall'umidità relativa  $RH$  [%], dalla velocità del vento  $u_2$  [m s<sup>-1</sup>] e dal flusso della radiazione netta solare  $R_n$  [MJ m<sup>-2</sup> giorno<sup>-1</sup>]. Le altre grandezze, in mancanza di misure dirette, possono essere stimate seguendo le procedure reperibili in bibliografia (Jensen et al., 1990; Brutsaert, 2005).



Il modello di simulazione agro-idrologica considerato nella presente tesi è quello presentato nel quaderno FAO 56 (FAO 56 - *Guidelines for computing crop water requirement*, FAO irrigation and drainage paper 56, Allen et al., 1998).



**Figura 1.2 - Schematizzazione del sistema continuo Suolo Pianta Atmosfera nel modello a serbatoio**

In tale modello, il suolo viene considerato come un serbatoio caratterizzato da una determinata capacità, la cui geometria dipende dalla profondità dell'apparato radicale della coltura e dalle caratteristiche idrauliche del suolo (fig. 1.2). In particolare, l'evoluzione della riserva idrica del volume di suolo interessato dall'apparato radicale è simulata attraverso una funzione di esaurimento.

Tutti i flussi in entrata ed uscita dal serbatoio vengono espressi in mm e la scala temporale di simulazione è, in generale, quella giornaliera. La variazione della riserva e quindi dell'esaurimento della stessa, espressa in termini di deplezione nel giorno  $i$  -

esimo,  $D_{r,i}$  [mm] viene descritta dalla seguente equazione:

$$D_{r,i} = D_{r,i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (1.4)$$

nella quale si è indicato con  $D_{r,i-1}$  l'ammontare della deplezione al giorno precedente [mm], con  $P_i$  [mm] l'altezza di precipitazione, con  $RO_i$  [mm] il deflusso superficiale, con  $I_i$  [mm] l'irrigazione netta (efficace), cioè la quantità di acqua che a seguito di un intervento irriguo si infiltra nel suolo, con  $CR_i$  [mm] l'apporto idrico per risalita capillare da falda sotterranea, con  $ET_{c,i}$  [mm] l'evapotraspirazione colturale effettiva e infine con  $DP_i$  [mm] la perdita di acqua per percolazione.

Il dominio della funzione di deplezione è compreso tra zero, quando il suolo presenta un contenuto idrico corrispondente alla capacità di campo, ed un massimo che corrisponde al totale dell'acqua disponibile per la pianta ( $TAW$ ) dato dalla seguente relazione:

$$TAW = 1000 (\theta_{fc} - \theta_{wp}) Z_r \quad (1.5)$$

avendo indicato con  $\theta_{fc}$  il contenuto idrico alla capacità di campo [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ], con  $\theta_{wp}$  il contenuto idrico al punto di appassimento [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ] e con  $Z_r$  la profondità delle radici [m].

La procedura FAO a doppia componente calcola i termini potenziali di evaporazione e traspirazione che compongono l'evapotraspirazione massima colturale, sulla base della evapotraspirazione della coltura di riferimento,  $ET_{ref}$ , in condizioni standard (ossia in assenza

di stress per la coltura). I valori di  $ET_{ref}$  dipendono solo da fattori climatici e vengono calcolati con l'equazione di Penman-Monteith.

La componente traspirativa potenziale,  $T_p$ , di una coltura viene calcolata come una frazione,  $K_{cb}$ , dell'evapotraspirazione della coltura di riferimento,  $ET_{ref}$ , in condizioni standard:

$$T_p = K_{cb} ET_{ref} \quad (1.6)$$

Nel parametro  $K_{cb}$ , denominato anche coefficiente colturale basale, sono compresi i fattori legati al tipo di copertura del suolo, alle caratteristiche della specie vegetale ed alla resistenza aerodinamica.

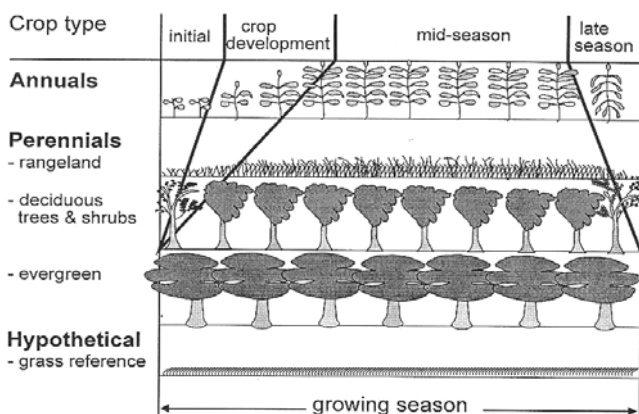
In particolare,  $K_{cb}$  dipende dall'altezza della coltura che influenza la resistenza aerodinamica,  $r_a$ , dall'albedo della superficie suolo-pianta che influenza il valore della radiazione solare assorbita, quindi l'energia disponibile per la traspirazione, dalle proprietà di resistenza al flusso di vapore acqueo della pianta (numero e caratteristiche degli stomi, caratteristiche delle foglie, ecc.), che ne influenzano la resistenza di superficie,  $r_s$ .

I valori di  $K_{cb}$  raccomandati sono riportati nella tab. 17 del quaderno FAO 56. Tali valori sono riferiti a una vasta gamma di colture coltivate in ambiente sub-umido caratterizzato, nel periodo di crescita delle stesse, da un minimo giornaliero di umidità relativa dell'aria,  $RH_{min}$ , del 45% e da una velocità del vento a due metri dal suolo,  $U_2$ , pari a 2 m/sec. Pertanto, qualora si operi in ambienti diversi da quello di riferimento, si deve eseguire una correzione dei valori di  $K_{cb}$  tabulati, attraverso la seguente espressione:

$$K_{cb} = K_{cb(tab.)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \left( \frac{h_{crop}}{3} \right)^{0,3} \quad (1.7)$$

essendo  $K_{cb(tab.)}$  il coefficiente basale tabulato,  $u_2$  la velocità del vento a 2 metri dal suolo,  $RH_{min}$  valore medio dell'umidità minima relativa dell'aria giornaliera durante il periodo di crescita ed  $h_{crop}$  l'altezza della coltura. I valori del coefficiente  $K_{cb}$  variano nel corso del ciclo vegeto-produttivo della coltura considerata, poiché durante tale ciclo si modificano le condizioni di copertura del suolo, di altezza della pianta e di estensione di area fogliare.

Per tale ragione il ciclo vegetativo di una generica coltura può essere suddiviso in quattro periodi, ognuno di ampiezza variabile in funzione delle specie, come mostrato in fig. 1.3.

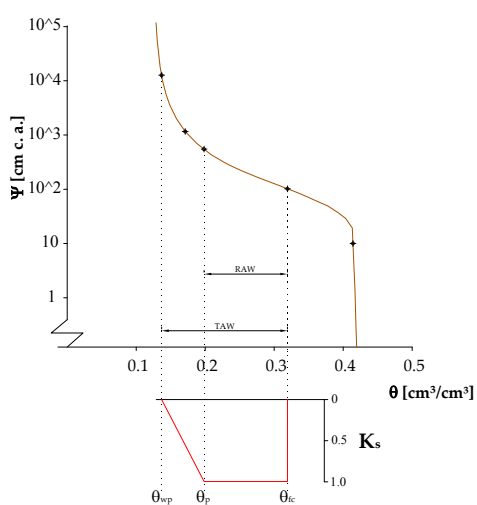


**Figura 1.3 - Ciclo vegeto-produttivo dei diversi tipi di colture e schematizzazione delle fasi di sviluppo (Allen et al., 1998)**

Nel periodo iniziale, quando la copertura vegetale è minore o uguale al 10% della superficie del suolo, la componente evaporativa prevale su quella traspirativa e il valore di  $K_{cb}$  è basso. Nel periodo di sviluppo della coltura aumenta la copertura del suolo, l'evaporazione diminuisce e la traspirazione diviene la componente predominante; il valore di  $K_{cb}$ , pertanto, cresce. Nel periodo intermedio,  $K_{cb}$

raggiunge il suo valore massimo, mentre nel periodo finale, a maturazione avvenuta,  $K_{cb}$  diminuisce progressivamente. Attraverso l'identificazione della durata delle singole fasi di sviluppo della coltura è possibile costruire l'andamento temporale di  $K_{cb}$ . Di conseguenza sulla base delle informazioni suggerite dalla FAO riguardo i valori dei  $K_{cb}$  e le durate delle singole fasi del ciclo di sviluppo per ogni specie di interesse agrario, è possibile, attraverso un processo di linearizzazione, costruire dei diagrammi dove vengono riportati gli andamenti temporali dei coefficienti  $K_{cb}$ , sulla base dei quali è possibile determinare i massimi consumi traspirativi della coltura. Tale procedura può essere tradotta matematicamente dall'equazione:

$$K_{cb,i} = K_{cb\_prev} + \left[ \frac{N_j - \sum(L_{prev})}{L_{stage}} \right] (K_{cb\_next} - K_{cb\_prev}) \quad (1.8)$$



**Figura 1.4 - Coefficiente di riduzione della traspirazione dovuto allo stress idrico,  $K_s$ , in funzione del contenuto idrico e/o del potenziale matriciale**

nella quale  $N_j$  rappresenta il numero di giorni trascorsi dal periodo iniziale,  $K_{cb,i}$  il coefficiente culturale di base al giorno  $i$ -esimo,  $K_{cb\_prev}$  e  $K_{cb\_next}$  indicano i valori dei coefficienti corrispondenti rispettivamente agli stadi precedente e successivo rispetto a quello considerato,  $L_{stage}$  [giorni], la durata dello stadio di sviluppo considerato e  $\sum(L_{prev})$  la sommatoria delle durate di tutti gli stadi precedenti a quello considerato. Notevole importanza assumono gli aggiustamenti che risulta necessario effettuare sulla traspirazione potenziale, al fine di tenere conto delle differenti condizioni ambientali della zona in cui si opera,

rispetto a quelle nelle quali sono stati messi a punto i valori tabulati.

La traspirazione effettiva,  $T_a$ , assume valori minori di quella potenziale in presenza di contenuti idrici del suolo inferiori ad una certa soglia. Numerose osservazioni sperimentali hanno evidenziato come esista un intervallo di valori del contenuto di umidità, all'interno del quale la traspirazione si mantiene prossima al valore potenziale o di poco inferiore, mentre decresce al di fuori di esso. Per esprimere la dipendenza della traspirazione dal contenuto idrico del suolo, il metodo FAO utilizza un coefficiente di stress idrico,  $K_s$ , il cui valore varia linearmente da zero a uno, in funzione del contenuto idrico. La traspirazione effettiva,  $T_a$ , si ottiene semplicemente come prodotto tra la traspirazione potenziale,  $T_p$ , e il coefficiente di stress idrico,  $K_s$ :

$$T_a = K_s T_p \quad (1.9)$$

Il legame tra  $K_s$  e contenuto idrico  $\theta$  è spesso considerato lineare, come mostrato in fig. 1.4, nella quale è pure indicata la relazione tra i valori di  $K_s$  e quelli di potenziale matriciale  $\psi$  ottenuti considerando la curva di ritenzione idrica del suolo.

Numericamente, il calcolo del coefficiente di stress,  $K_s$ , richiede la definizione del cosiddetto fattore di deplezione,  $p$ , ovvero la frazione dell'acqua disponibile totale ( $TAW$ ) che la pianta può assorbire prima che riduca i consumi traspirativi come conseguenza dei fenomeni di stress idrico:

$$K_s = \frac{TAW - D_i}{(1 - p)TAW} \quad (1.10)$$

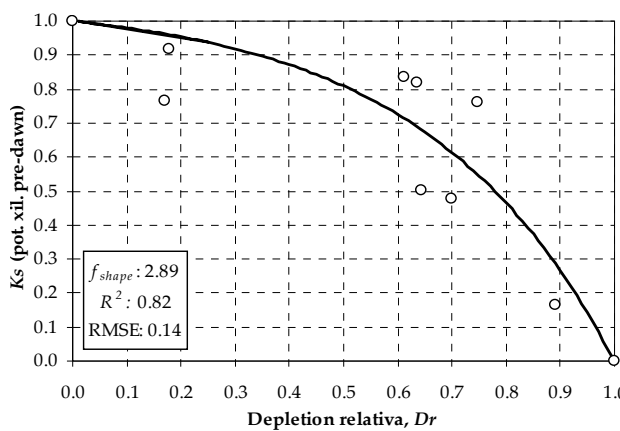
nella quale  $D_i$  [mm] indica l'ammontare della deplezione al giorno  $i$ -esimo. Il parametro  $p$ , tabulato nel quaderno FAO 56, è specifico della coltura considerata e può essere ottenuto empiricamente, osservando la dipendenza degli indici di stress dal contenuto idrico relativo del suolo. Per esempio, considerando come indice di stress il rapporto tra la traspirazione reale e quella potenziale, il valore di umidità,  $\theta_p$ , al di sotto del quale tale rapporto risulta inferiore all'unità, rappresenta quel contenuto idrico di riferimento che consente di valutare il fattore di deplezione,  $p$ . In realtà, la capacità delle radici di estrarre acqua dal terreno non dipende solo dal contenuto di umidità, bensì dall'energia potenziale posseduta dall'acqua presente nel suolo e quindi, in ultima analisi, dalle caratteristiche fisiche del suolo. Per tenere conto di tale circostanza, nel quaderno FAO 56 viene suggerito di ridurre tali coefficienti per i suoli con tessitura fine, e maggiorarli per quelli a tessitura grossolana.

Un'altra correzione che è possibile eseguire sul fattore  $p$  è quella relativa alle diverse condizioni di domanda atmosferica che si verificano in ambienti diversi rispetto a quelli dove

sono stati ottenuti i valori di riferimento. La FAO suggerisce in tal caso relazioni di tipo lineari che legano il fattore  $p$  all'evapotraspirazione potenziale della coltura, oltre che al valore tabellare,  $p_{table}$

$$p = p_{table} + 0.04(5 - ET_c) \quad (1.11)$$

Recentemente con riferimento alla coltura dell'olivo, Rallo et al., (2012; 2013), hanno proposto di modificare la funzione di stress rispetto all'impostazione originaria del modello, in modo da tenere in conto della resistenza della coltura alle condizioni di deficit idrico del suolo.



**Figura 1.5 - Schematizzazione implementata nella procedura di bilancio idrico FAO-56 per simulare la risposta della pianta alle variazioni dello stato idrico del suolo (da Rallo et al., 2012)**

In particolare la funzione di stress,  $K_s$ , è stata schematizzata attraverso una legge non lineare convessa, caratteristica delle piante xerofile, come indicato in fig. 1.5. In questa schematizzazione, lo stato idrico del suolo è espresso in termini di “deplezione relativa”,  $D_{rel}$ , ottenuta normalizzando i valori della deplezione rispetto ad un massimo ed un minimo, corrispondenti rispettivamente ai valori della riserva idrica uguali a  $p_{low}$  TAW e

$p_{upper}$  TAW. Il coefficiente  $p_{low}$ , che individua il valore nullo di deplezione relativa e che segna il passaggio alla condizione di stress idrico, viene calcolato a partire da un valore di contenuto idrico critico  $\theta_p$  ( $\theta_p = 0.16 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) individuato sperimentalmente (Rallo et al., 2012). D'altra parte, il coefficiente di deplezione  $p_{upper}$  individua la massima condizione di stress, che non necessariamente coincide con il valore di contenuto idrico corrispondente al punto di appassimento del terreno. In particolare, il limite inferiore del contenuto idrico del suolo  $\theta_{min}$  corrispondente alla condizione di stress massimo, tiene conto dell'abilità della pianta ad estrarre acqua dal suolo (Ratliff et al., 1983), la quale può essere limitata, oltre che da una risposta fisiologica, anche da una bassa densità radicale (Lacape et al., 1998). Tale valore di solito corrisponde a un potenziale matriciale del terreno superiore a quello solitamente assunto per valutare il punto di appassimento dato che, al di sotto di una certa profondità, la densità delle radici diviene il fattore limitante per l'estrazione dell'acqua dal suolo (Pellegrino et al., 2004). Al contrario, in certi casi, tale valore può risultare inferiore al punto di

appassimento, soprattutto negli strati superficiali come conseguenza della perdita di acqua per evaporazione (Pellegrino et al., 2004). Per la sua determinazione in campo si considera il minimo contenuto idrico del suolo misurato ad ogni profondità durante la stagione di crescita colturale così come suggerito da Pellegrino et al., (2006).

Dal punto di vista analitico, il tratto della funzione che descrive condizioni di stress è del tipo:

$$K_s = 1 - \frac{e^{D_{rel} f_{shape}} - 1}{e^{f_{shape}} - 1} \quad (1.12)$$

nella quale  $f_{shape}$  è un parametro di forma che stabilisce la concavità ( $f_{shape} < 0$ ), convessità ( $f_{shape} > 0$ ) o la linearità ( $f_{shape} = 0$ ) della funzione che descrive lo stress della coltura.

Data la natura empirica dei parametri richiesti dalla funzione di stress, risulta necessaria una preliminare calibrazione sito-specifica in modo da tener conto, oltre che del tipo di pianta, anche delle condizioni climatiche e pedologiche dell'ambiente in cui si opera.

La componente di evaporazione potenziale,  $E_p$ , viene calcolata moltiplicando il coefficiente evaporativo  $K_e$  (determinato in funzione del contenuto idrico dello strato superficiale di suolo) all'evapotraspirazione di riferimento  $ET_{ref}$ :

$$E_p = K_e ET_{ref} \quad (1.13)$$

Il calcolo del coefficiente  $K_e$  può essere effettuato ricercando il minimo delle due seguenti espressioni:

$$K_e = \min \left\{ K_r (K_{c\_max} - K_{cb}); f_{ew} K_{c\_max} \right\} \quad (1.14)$$

Tralasciando la procedura di calcolo, piuttosto articolata e laboriosa, viene riportata soltanto una breve descrizione dei termini che compaiono nell'eq. 1.14. Il termine  $K_{cb}$  rappresenta il coefficiente colturale basale,  $K_{c\_max}$  il valore massimo della somma  $K_{cb} + K_e$  che normalmente segue una pioggia o un adacquamento,  $K_r$  è un coefficiente adimensionale di riduzione, che si pone pari a 1 nei periodi immediatamente successivi ad una pioggia o a un intervento irriguo e decresce fino a zero quando il suolo è secco;  $f_{ew}$  è la frazione di suolo bagnata e non coperta dalla vegetazione, dalla quale proviene la maggior parte dell'evaporazione.

L'uso del modello FAO nella gestione dell'irrigazione richiede di impostare preliminarmente sia il valore del contenuto idrico medio del suolo che identifica il momento di intervento irriguo, che il volume idrico da fornire nel corso di ciascun adacquamento. Il momento d'intervento irriguo viene individuato fissando dei valori soglia relativi ad un

parametro denominato “Management Allowed Depletion”, *MAD* (Merriam, 1966). Il *MAD*, dal punto di vista computazionale simile al fattore di deplezione  $p$ , indica la frazione massima dell’acqua disponibile totale che può essere estratta dal suolo, prima che venga suggerito di irrigare:

$$MAD = \frac{\left( \theta_{fc} - \theta_{lim} \right)}{\left( \theta_{fc} - \theta_{wp} \right)} \quad (1.15)$$

nella quale  $\theta_{lim}$  è il valore del contenuto idrico del suolo in corrispondenza del quale occorre procedere con l’irrigazione. I valori del parametro *MAD* dipendono quindi, oltre che dalle costanti idrologiche del suolo,  $\theta_{fc}$  e  $\theta_{wp}$ , anche da un valore limite inferiore assunto per il contenuto idrico del suolo,  $\theta_{lim}$ . Tale contenuto idrico limite assume valore diverso o uguale al valore critico  $\theta_p$ , in funzione del tipo di gestione dell’irrigazione che si vuole effettuare. In particolare, nel caso in cui  $\theta_{lim} \geq \theta_p$  l’irrigazione consente il mantenimento di un ecosistema umido e la totale assenza di stress idrico, mentre se  $\theta_{lim} < \theta_p$  l’irrigazione è gestita in condizioni di prevalente stress idrico. Pertanto è possibile impostare un valore  $\theta_{lim} > \theta_p$ , quando ci si trova a gestire l’irrigazione in contesti dove vigono vincoli ambientali, ad esempio quello di mantenere un’area naturale umida,  $\theta_{lim} = \theta_p$  quando si vuole intervenire con l’adacquamento prima che la pianta entri nella fase di stress e  $\theta_{lim} < \theta_p$  quando l’irrigazione viene gestita in regime di stress idrico, sia esso controllato o meno. Quest’ultima condizione rientra nei casi più frequenti di gestione irrigua delle colture arboree in ambiente mediterraneo, soprattutto in quei contesti nei quali il momento di intervento irriguo è fissato attraverso una semplice analisi visiva dei primi sintomi di stress della pianta. Il *MAD* pertanto include un significato di tipo economico-gestionale molto variabile da zona a zona, e dipendente in principal modo dal tipo di risultato produttivo che l’agricoltore vuole conseguire, nonché da fattori logistici quali la quantità e la disponibilità di acqua nell’intera stagione irrigua. L’algoritmo proposto nel quaderno FAO 56 (Appendice 8) consente di programmare l’irrigazione prima che la pianta entri nella fase di stress ( $\theta_{lim} = \theta_p$ ). Tali ipotesi non è adatta all’ambiente mediterraneo, per il quale si verificano frequentemente condizioni di carenza idrica, che inducono le colture a condizioni di stress idrico. Per tale ragione, come verrà meglio di seguito specificato, è stata apportata una ulteriore modifica al modello FAO, in modo da permettere la programmazione dell’irrigazione anche quando la coltura si trova in condizioni di stress idrico ( $\theta_{lim} < \theta_p$ ).

Riguardo la quantità d'acqua da somministrare ad ogni irrigazione, è possibile scegliere tra due opzioni, a seconda che si voglia riportare l'umidità del suolo alla capacità di campo, oppure intervenire con un prestabilito volume di adacquamento.

## ***1.2 Sviluppo dell'apparato radicale delle piante arboree e volume di attingimento***

La conoscenza del volume di terreno esplorato dalle radici, nonché della densità e della conformazione dell'apparato radicale, rappresenta il presupposto per una facile scelta sia del metodo di distribuzione dell'acqua irrigua che, in termini applicativi, per una più mirata gestione degli adacquamenti. Inoltre, tali conoscenze sono di fondamentale importanza al fine di utilizzare razionalmente l'acqua ed i fertilizzanti, oltre che per controllare le incipienti condizioni di stress delle piante. Dal volume di terreno esplorato dalle radici dipendono sia la riserva idrica utile (*TAW*) che quella facilmente utilizzabile dalle piante (*RAW*). La densità radicale è un parametro importante per definire l'efficienza dell'apparato "assorbente", sia nei riguardi dell'utilizzazione dell'acqua che degli elementi minerali contenuti nel volume di suolo interessato dalle radici. Dalla densità radicale dipende la resistenza che incontra l'acqua nel suolo e di conseguenza il gradiente di potenziale idrico e di concentrazione dei vari elementi minerali che si forma nel volume radicale. Nell'olivo il rapporto riserva idrica/area fogliare è notevolmente più elevato rispetto ad altre specie arboree da frutto. (Fiorino, 2003) Tale comportamento è dovuto ad un più lento ritmo di crescita dell'area fogliare e alla più rapida esplorazione del volume di suolo dalle radici (Dichio et., 2002). In condizioni di scarsa disponibilità idrica la crescita vegetativa è il primo processo che viene rallentato. In prove effettuate in pieno campo (Dichio et., 2002) per più anni, nelle piante irrigate è stata rilevata una maggiore crescita dell'area fogliare (circa 90%) rispetto alle piante non irrigate, mentre per le radici le differenze sono state meno marcate. La carenza idrica, inoltre, può limitare il volume di suolo esplorato dalle radici, ma tale riduzione non comporta nessuna riduzione della disponibilità idrica per unità di superficie fogliare. Infatti, è stato osservato come piante non irrigate, e pertanto in condizioni di deficit idrico, hanno modificato la ripartizione della sostanza secca a favore delle radici migliorando il rapporto radici/foglie e la disponibilità idrica per unità di superficie fogliare (Dichio et., 2002). La lenta crescita dell'area fogliare e la rapida esplorazione del volume di suolo da parte delle radici permette alla pianta di olivo di avere a disposizione della superficie fogliare molta più acqua rispetto alle altre specie arboree.

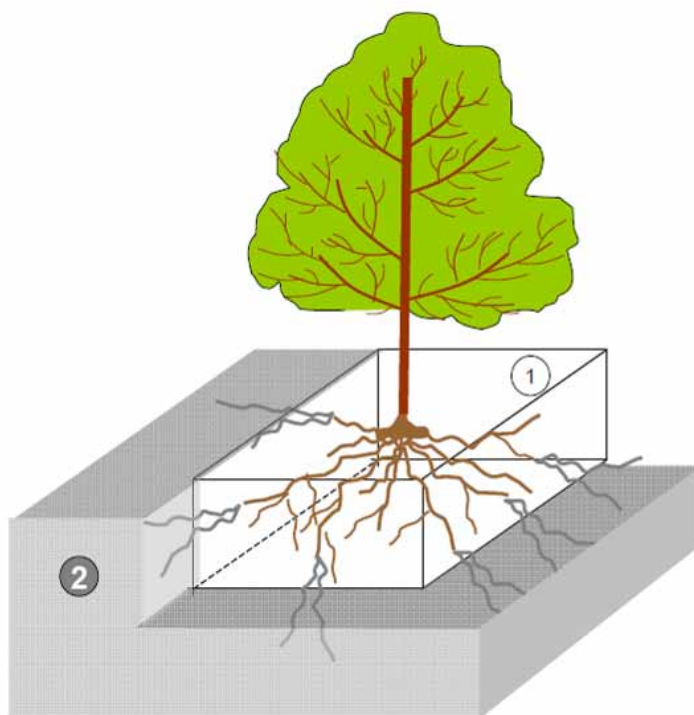
Altre cause che definiscono la variabilità del sistema radicale sono legate al metodo di distribuzione dell'acqua di irrigazione. Quando le piante sono irrigate con metodi per i quali



la sorgente di umettamento è localizzata, il sistema radicale tende a concentrarsi nella parte di suolo maggiormente umettata. La conoscenza sia della distribuzione spaziale dei gradienti di contenuto idrico che dell'apparato radicale all'interno del volume di suolo relativo ad una pianta riveste particolare importanza, soprattutto quando la gestione degli adacquamenti è effettuata attraverso il monitoraggio dei contenuti idrici del suolo. In questo caso, infatti, fondamentale risulta la scelta della migliore posizione dei sensori nell'intorno della pianta, in modo da essere rappresentativa del reale stato idrico medio del sistema. La conoscenza della migliore posizione dei sensori di umidità ha anche ripercussioni in ambito scientifico, quale quella legata alle procedure di calibrazione dei modelli di bilancio idrico. Le procedure di calibrazione, attraverso le quali sono parametrizzati i modelli di bilancio infatti, sono molto influenzate dalla qualità del dato osservato; se il dato misurato di umidità non è rappresentativo dello stato idrico del sistema suolo, i parametri sito-specifici del modello non saranno certamente rappresentativi e pertanto l'output del modello sarà inficiato da tali errori.

Ipotizzando corretta la schematizzazione dei consumi idrici della coltura per unità di superficie effettuata dal modello, l'identificazione del volume di suolo in cui si concentrano maggiormente gli attingimenti radicali può avere il vantaggio di permettere una stima corretta in termini di volume irriguo sull'unità di superficie di suolo da irrigare, parametro questo certamente più familiare per chi gestisce l'irrigazione.

Nelle colture cosiddette sparse inoltre, nelle quali la distribuzione dell'acqua irrigua avviene attraverso sistemi a sorgente puntuale, quali quelli del sistema microirriguo, il volume di suolo esplorato dal sistema radicale può essere ipotizzato suddiviso in due distinti serbatoi, S1 e S2, così come rappresentato in fig. 1.6.



**Figura 1.6** Schematizzazione del volume di suolo esplorato dal sistema radicale di una pianta arborea. Il volume umettato con l'irrigazione localizzata (parallelepipedo trasparente, contenitore n.1) è esplorato solo in parte dal sistema radicale totale (radici marroni), mentre le altre radici (grigio), esplorano un volume di suolo non irrigato (parallelepipedo riempito, contenitore n. 2). (Estratto da Xyloyannis et al. 2012)

In particolare, il serbatoio S1 si assume corrispondente al volume di terreno umettato con l'irrigazione e nel quale è presente la massima densità radicale, mentre il serbatoio S2 è assunto quello corrispondente al volume terreno esplorato dalle radici, ma non umettato dall'acqua di irrigazione. Come si può immaginare, tra i due serbatoi sussistono sostanziali differenze dal punto di vista dimensionale, ma soprattutto per quanto riguarda il regime degli attingimenti radicali. Le differenze sono tanto più accentuate quanto più nel sistema si verificano gradienti di umidità del suolo. Con riferimento a quest'ultimo aspetto, in una coltura irrigata con metodi di distribuzione puntuale dell'acqua, è auspicabile pensare che nel serbatoio S1, si concentrano la maggior parte delle radici in conseguenza alla generalmente più elevata umidità del suolo durante la stagione irrigua, rispetto al serbatoio S2.

Tuttavia, è anche prevedibile che l'entità degli attingimenti radicali risulti maggiore perché più elevata è la densità di radici per unità di volume di suolo.

La conoscenza delle dimensioni e delle caratteristiche idrauliche di tale serbatoio è cruciale per definire con precisione la quantità di acqua che deve essere apportata con l'irrigazione. Ad esempio, l'apporto di volumi irrigui maggiori rispetto a quelli che il volume di suolo nel serbatoio S1 può contenere, potrebbe causare fenomeni di percolazione con conseguente lisciviazione dei nutrienti o di ristagno idrico con conseguenti processi di asfissia.

Il serbatoio S1 può essere schematizzato corrispondente a quello di un volume di forma parallelepipedica nel quale la dimensione verticale può assumersi corrispondente alla profondità, DP80, al di sopra della quale si concentrano l'80% delle radici della pianta. L'estensione orizzontale risulta invece più complessa e può essere assunta quella corrispondente alla superficie bagnata con l'irrigazione. Seguendo tale criterio tuttavia, si rischia di sottostimare molto l'estensione orizzontale del serbatoio poiché non si tiene conto del fatto che in profondità il bulbo umido si estende in maggior misura rispetto a quanto non avvenga nella superficie del suolo. Le dimensioni del serbatoio S2 possono invece essere determinate da una semplice differenza. Il serbatoio S2 non riceve l'acqua di irrigazione, ma esclusivamente le acque di precipitazione. L'acqua di pioggia viene immagazzinata in tale contenitore durante la stagione umida e costituisce una riserva idrica del suolo che la pianta dovrà "gestire" durante la stagione irrigua.

Sulla base di quanto detto, pertanto, occorre segnalare che le dimensioni dei due serbatoi variano reciprocamente al variare di tutte quelle variabili (metodo di distribuzione dell'acqua di irrigazione, caratteristiche idrologiche del terreno che condizionano i processi di infiltrazione e redistribuzione, presenza di strati compatti, etc.) che condizionano, reciprocamente, sia il regime di umidità del suolo che la distribuzione dell'apparato radicale.

### ***1.3 Lo stato idrico del suolo e necessità di posizionare correttamente i sensori udometrici***

La disponibilità di misurazioni dirette delle quantità di acqua disponibili nel suolo è senza dubbio un utile strumento per la gestione dell'irrigazione. La strumentazione per monitorare lo stato idrico del suolo è disponibile da qualche tempo, ma lo sviluppo dell'elettronica ha reso le misurazioni più semplici e meno costose. I vantaggi offerti dai più moderni sensori di misura sono la continuità dell'acquisizione, la possibilità di automatizzare le misure ed elaborare i dati, nonché la possibilità di realizzare reti di monitoraggio e l'applicabilità del sistema a larga scala. Per la gestione degli interventi irrigui ed in particolare per stabilire l'esatto momento con cui intervenire con l'adacquamento, risulta tuttavia necessario definire una soglia di contenuto idrico al di sotto del quale viene previsto l'adacquamento per ristabilire i valori ottimali di umidità.

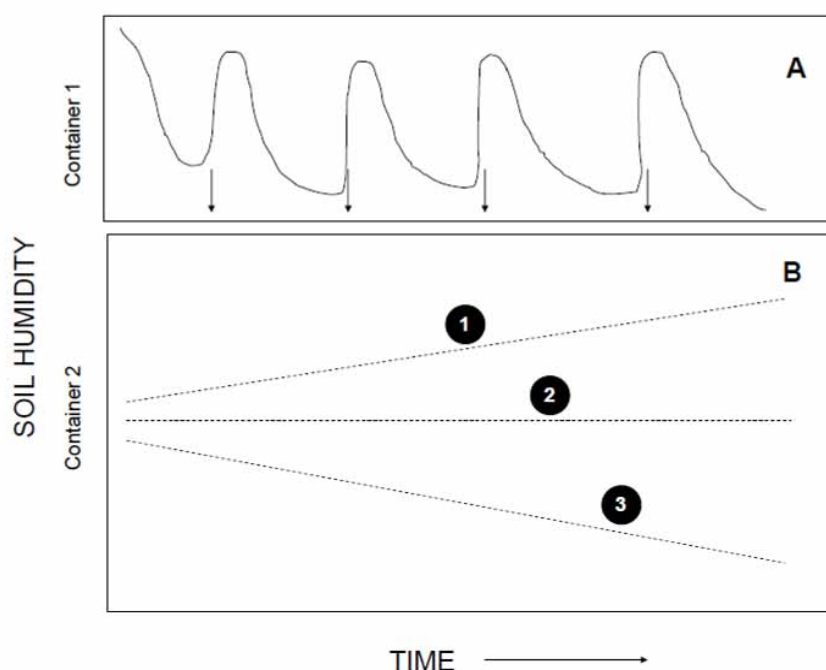
L'utilizzazione dei sensori di misura dei contenuti idrici del terreno può rappresentare di valido ausilio nella gestione dell'irrigazione, a tal fine risulta di indubbia importanza la definizione della corretta collocazione dei sensori rispetto alla pianta, in funzione del metodo

di distribuzione dell'acqua, e la valutazione del numero minimo di sensori da installare in campo.

Per definire l'ubicazione dei sensori, è necessario dapprima identificare i due serbatoi S1 e S2 dai quali la pianta attinge l'acqua e determinare, per ciascuno di essi, il regime di umidità del suolo. In particolare, nel caso di irrigazione localizzata, risulta cruciale il monitoraggio del contenuto idrico nel suolo del serbatoio S1, nel quale si determinano i massimi attingimenti.

La figura 1.7 riporta schematicamente l'andamento dei consumi idrici nel terreno all'interno dei serbatoi S1 e S2. Si evidenzia che in corrispondenza degli apporti irrigui il contenuto idrico medio nel serbatoio S1 aumenta significativamente per ridursi nei periodi successivi agli adacquamenti, con velocità dipendenti dai consumi evapotraspirativi della pianta. D'altra parte invece, il contenuto idrico medio del serbatoio S2 può aumentare (linea 1 di fig. 1.7) o diminuire nel tempo (linea 3), a seconda che i consumi evapotraspirativi della coltura risultino rispettivamente inferiori o superiori agli apporti irrigui.

Nel caso invece in cui gli apporti irrigui nel serbatoio S1 eguagliano i consumi evapotraspirativi, il contenuto idrico medio nel serbatoio S2 rimane costante (linea 2 di fig. 1.7). Pertanto, al fine di preservare i volumi idrici nel serbatoio S2, l'irrigazione dovrebbe essere eseguita quando il contenuto idrico critico viene raggiunto in S1. Se invece l'irrigazione apporta un volume idrico inferiore a quello evapotraspirato, la pianta attinge acqua dagli strati più profondi attraverso l'attivazione delle radici ivi presenti e, di conseguenza, il contenuto di acqua nel terreno nel serbatoio S2 tende a ridursi.



**Figura 1.7** Rappresentazione schematica dei cambiamenti di contenuto idrico del suolo nel serbatoio 1(A) e 2(B). Le frecce rappresentano gli apporti irrigui (da Xyloyannis et al. 2012).

Se invece l'irrigazione apporta un volume idrico inferiore a quello evapotraspirato, la pianta attinge acqua dagli strati più profondi attraverso l'attivazione delle radici ivi presenti e, di conseguenza, il contenuto di acqua nel terreno nel serbatoio S2 tende a ridursi. Viceversa, se i volumi irrigui risultano superiori a quelli evapotraspirati, il contenuto di acqua negli strati più profondi aumenta nel tempo in relazione ai volumi idrici che tendono ad accumularsi nel terreno.

Per monitorare lo stato idrico del suolo, sono disponibili diversi metodi, ma nessuno finora si può considerare ideale; ognuno di essi, nonostante i progressi degli ultimi anni, può dare luogo ad errori di valutazione derivanti sia dalla modalità d'uso del metodo, oltre che dalla variabilità spaziale delle caratteristiche idrologiche del suolo e del suo contenuto idrico.

La determinazione del contenuto d'acqua del suolo può essere eseguita mediante la misura di grandezze direttamente o indirettamente correlate al contenuto idrico. I metodi diretti comportano l'estrazione dell'acqua dal suolo e la determinazione della quantità estratta. I metodi indiretti si basano invece sulla misura di proprietà fisiche o chimiche del mezzo poroso (es., costante dielettrica, conducibilità elettrica, capacità termica, contenuto di atomi di idrogeno), che risultano influenzate dai contenuti idrici nella zona radicale.

Per la misura diretta del contenuto idrico, il metodo gravimetrico rappresenta quello più utilizzato per determinare la percentuale di acqua in percento di peso secco,  $U$  [ $\text{g g}^{-1}$ ] o del volume  $\theta$  [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ] del terreno. In quest'ultimo caso, come è noto, è necessario tenere conto della massa volumica apparente del terreno:

$$\theta = U \frac{\rho_a}{\rho_w} \quad (1.16)$$

nella quale  $\rho_a$  [ $\text{g cm}^{-3}$ ] e  $\rho_w$  [ $\text{g cm}^{-3}$ ] rappresentano rispettivamente la massa volumica apparente del terreno e dell'acqua.

Tra i metodi indiretti la Riflettometria nel Dominio del Tempo (TDR) e della frequenza (FDR) risultano quelli più utilizzati, che permettono una misura in continuo dei contenuti idrici del suolo (Robinson et al., 2003).

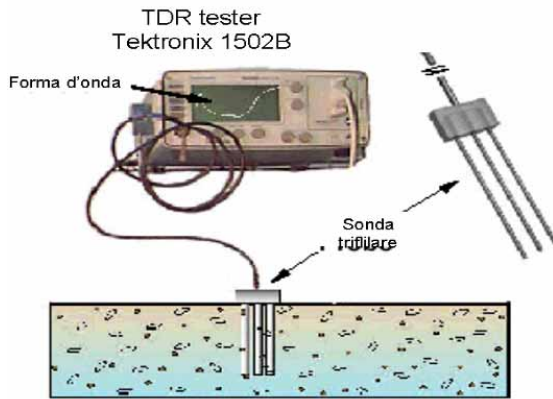


Figura 1.8 Sistema TDR per la misura dei contenuti idrici del suolo

Con la tecnica TDR un segnale elettromagnetico viene inviato da un generatore di impulsi elettrici ad una sonda interrata costituita, nella configurazione più usuale, da due o più conduttori metallici paralleli, come mostrato in fig. 1.8 (Ferré e Topp, 2002).

La velocità di propagazione dell'onda elettromagnetica,  $v$ , è legata alle proprietà dielettriche del suolo secondo la relazione:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1.17)$$

nella quale  $c$  [ $\text{m s}^{-1}$ ] è la velocità di propagazione della luce nel vuoto ( $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ) e  $\epsilon$  [-] è la permittività dielettrica relativa o costante dielettrica, cioè il rapporto tra la permittività,  $\epsilon_n$ , nel mezzo considerato e quella nel vuoto,  $\epsilon_0$  ( $\epsilon = \epsilon_n \epsilon_0^{-1}$  con  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ ). Considerato il suolo come un sistema in cui coesistono una fase solida (particelle di suolo), una liquida ed una gassosa, le sue proprietà dielettriche dipendono dalla combinazione delle proprietà delle singole fasi costituenti. Tuttavia, a causa della natura dipolare delle sue molecole, l'acqua presenta valori della costante dielettrica notevolmente maggiori ( $\epsilon \approx 80$  a  $20^\circ \text{ C}$ ) rispetto all'aria ( $\epsilon = 1$ ) e alla fase solida del suolo ( $\epsilon = 3 \div 7$ ). Il valore misurato della costante dielettrica del sistema trifasico prende il nome di costante dielettrica apparente,  $\epsilon_b$ , e consente di determinare indirettamente il contenuto idrico del suolo in termini volumetrici.

L'impulso di tensione inviato dal generatore TDR, una volta entrato nella sonda interrata nel suolo, subisce ripetute riflessioni ed attenuazioni, per cui la forma d'onda, restituita sul un display, assume l'andamento caratteristico mostrato in fig. 1.9

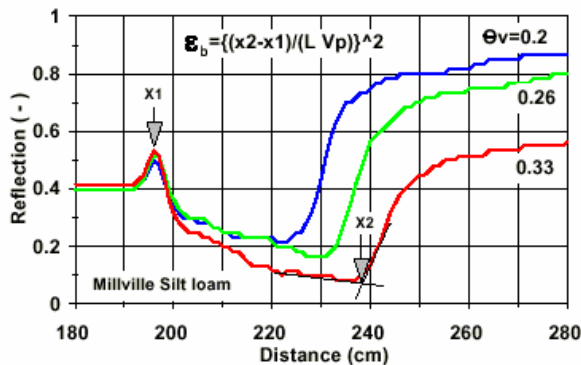


Figura 1.9 Esempio di Forme d'onda TDR misurate a tre diversi contenuti idrici usando un Tektronix 1502B e una sonda trifilare di 10 cm di lunghezza

Le caratteristiche della forma d'onda sono rappresentate da due riflessioni che corrispondono alle variazioni di impedenza che si verificano all'ingresso del segnale nel suolo ( $x_1$ ) e alla fine della sonda ( $x_2$ ). Nota la lunghezza,  $L$  [m], della sonda, la velocità di propagazione del segnale,  $v$ , è data da:

$$v = \frac{2L}{\Delta t} \quad (1.18)$$

dove  $\Delta t$  è la differenza tra i tempi che il segnale emesso dallo strumento impiega per percorrere, in andata e ritorno, la linea dall'estremità iniziale ( $x_1$ ) a quella terminale ( $x_2$ ) della sonda. Sostituendo la (3.2) nella (3.3) si ricava la seguente relazione per la determinazione della costante dielettrica apparente del terreno:

$$\varepsilon_b = \left( \frac{c\Delta t}{2L} \right)^2 \quad (1.19)$$

Amato e Ritchie (1995), basandosi sulle distanze assolute dei due punti di riflessione, hanno proposto la seguente forma:

$$\varepsilon_b = \left( \frac{x_2 - x_1}{Lv_p} \right)^2 \quad (1.20)$$

nella quale  $x_1$  e  $x_2$ , rappresentano rispettivamente il primo e il secondo punto di riflessione del segnale,  $L$  è la lunghezza della sonda infissa nel suolo e  $v_p$  è una frazione della velocità di propagazione, posta pari a 0.66 nel caso si utilizzi come generatore di impulsi il Tektronix 1502B e pari a 1 per il TDR 100 della Campbell.

Conoscendo  $\varepsilon_b$  è possibile risalire al contenuto idrico mediante un approccio puramente empirico attraverso l'uso di modelli concettuali (Roth et al., 1990).

Un'espressione empirica molto conosciuta in ambito idrologico è quella proposta da Topp et al. (1980) che, utilizzando suoli di differente tessitura (da franco-sabbiosa ad argillosa), ha individuato un'equazione di calibrazione, definita "universale", che lega la costante dielettrica apparente,  $\varepsilon_b$ , al contenuto idrico volumetrico del suolo:

$$\theta = -5.3 \cdot 10^{-2} + 2.92 \cdot 10^{-2} \varepsilon_b - 5.5 \cdot 10^{-4} \varepsilon_b^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \varepsilon_b^3 \quad (1.21)$$

Nello stesso studio è inoltre stata verificata l'indipendenza di  $\varepsilon_b$  dalla temperatura, nel range, 10-36 °C, per valori di massa volumica apparente, compresi tra 1,14 a 1,44 g cm<sup>-3</sup>.

La buona performance dell'equazione universale di Topp è stata ampiamente confermata da indagini condotte su suoli di differente tessitura (Roth et al., 1990; Nadler et al., 1991; Topp et al., 1982; Dasberg e Hopmans, 1992). Altre ricerche hanno però evidenziato che la suddetta relazione tende a sovrastimare il contenuto idrico nei suoli organici (Roth et al., 1990; Herkelrath et al., 1991) e a sottostimarli in quelli con un elevato contenuto d'argilla (Dasberg e Hopmans, 1992; Dirksen e Dasberg, 1993).

L'architettura delle sonde TDR è un argomento aperto in letteratura (Robinson et al., 2003). I requisiti maggiormente richiesti per una sonda TDR sono rappresentati dalla capacità delle stesse di minimizzare le attenuazioni del segnale e, nel contempo, di garantire un

contatto completo tra le guide metalliche e le particelle di suolo al momento dell'infissione. La presenza di sacche d'aria a diretto contatto con la linea, oltre a creare delle vie di flusso preferenziale per l'acqua e soluti, riducono artificialmente il valore di  $\varepsilon_b$  (Baker e Lascano, 1989). Per tali motivi, le sonde di tipo bifilare o trifilare sono di gran lunga le più utilizzate.

Oltre che dalla configurazione geometrica, la precisione delle misure dipende anche dalla lunghezza della sonda. Sonde di lunghezza inferiore a 0.10 m, specie in suoli molto secchi, possono condurre ad errori rilevanti nella stima del contenuto idrico ( $\pm 0.037 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) a causa dell'incertezza nella determinazione dei punti di riflessione e quindi di  $\Delta t$  (Heimovaara, 1993). La lunghezza massima della sonda dipende dall'entità di attenuazione del segnale che può rendere difficile la determinazione della seconda riflessione, soprattutto nei suoli argillosi e/o caratterizzati da elevata salinità. In pratica, la sonda dovrebbe comunque garantire un'ampiezza del segnale riflesso pari almeno al 10% di quella del segnale incidente (Dalton e van Genuchten, 1986). In ogni modo, l'esperienza conduce a ritenere più indicate, per le applicazioni di campo, sonde di lunghezza compresa fra 15 e 30 cm.

Per quanto invece concerne la spaziatura tra le linee conduttrici, si deve tenere in conto che all'aumentare di tale distanza aumenta il volume di suolo esplorato, ma di contro si determina una perdita di risoluzione del segnale TDR (Topp e Davis, 1980). Inoltre, il campo elettrico tende a concentrarsi in corrispondenza delle guide metalliche. Le misure di  $\varepsilon_b$  possono, in tal caso, risentire di disuniformità locali dovute a sacche di aria o acqua a contatto con le guide ("effetto pelle"). Per ridurre la concentrazione di energia elettromagnetica nelle vicinanze delle guide metalliche e, quindi, esplorare volumi di suolo maggiori, il diametro dei conduttori dovrebbe essere non inferiore a 1/10 della loro spaziatura (Knight, 1992). In termini generali, per misure di campo si possono utilizzare barrette metalliche di 4-6 mm di diametro, poste ad una distanza di 0.04-0.06 m. Per misure di laboratorio, in condizioni di maggiore omogeneità del mezzo poroso, le dimensioni delle guide possono essere ridotte, ma in ogni caso è opportuno che il loro diametro sia una decina di volte maggiore della dimensione media delle particelle che costituiscono il suolo (Santini, 1997).

Il volume di suolo effettivamente esplorato dal segnale elettromagnetico è di forma tanto più complessa quanto più eterogeneo è il suolo nel quale sono infisse le guide. Tuttavia, il volume di misura tende ad essere più confinato con le sonde trifilari che con quelle bifilari (Zegelin et al, 1989). Topp e Davis (1985) hanno suggerito che il volume di suolo campionato da una sonda bifilare corrisponde all'incirca ad un cilindro di diametro pari a 1.4 volte l'interdistanza tra i conduttori e di altezza pari alla loro lunghezza. Successivamente, Baker e Lascano (1989) hanno verificato in laboratorio che la zona di influenza "effettiva" è



approssimativamente di forma ellittica o rettangolare. In particolare, è stato osservato che una sonda con interdistanza dei conduttori di 50 mm esplora, nella direzione trasversale, una superficie pari a circa  $20 \times 65 \text{ mm}^2$ .

Il sistema di misura della costante dielettrica apparente nel mezzo poroso,  $\epsilon_b$  risulta costituito da un generatore di impulsi e al quale si collega una o più sonde. In commercio esistono diversi sistemi TDR utilizzabili per la determinazione del contenuto idrico del suolo e di altri mezzi porosi, alcuni dei quali rappresentati in fig. 1.10.



**Figura 1.10** *Apparecchi TDR. a) Tektronix 1502C (Tektronix Inc.), TRASE System I (Soil Moisture equipment Corp.), c) Field Scout TDR300 (Spectrum Tec., Inc), d) TDR100 (Campbell Scientific Inc.)*

Per automatizzare il sistema di misura e per poter effettuare misure contemporanee con più di una sonda è possibile accoppiare un multiplexer e un datalogger (fig. 1.11). Il multiplexer ha la funzione di gestire l'acquisizione simultanea dei segnali provenienti da più sonde su altrettanti canali, mentre il datalogger gestisce la permutazione di ciascun canale e provvede al trasferimento dei dati al computer.

Nelle installazioni di campo le sonde possono essere infisse in posizione verticale, orizzontale o obliqua rispetto al piano di campagna.



**Figura 1.11** *a) Multiplexer per la gestione di più sonde TDR e Dataloggers b) Campbell CR10X c) Cr1000 per la permutazione e l'immagazzinamento dei dati*

Nel caso di installazioni permanenti, soprattutto in suoli argillosi, bisogna tener conto che l'infissione verticale può favorire la formazione di crepacciature che possono determinare vie preferenziali per il bagnamento e l'essiccamento degli strati sottostanti, nonché per la crescita delle radici. In generale, modeste deviazioni rispetto al parallelismo delle barrette metalliche non influiscono sull'accuratezza della misura (Noborio, 2001). Tuttavia, specie in suoli con elevata coesione, è consigliabile utilizzare delle maschere che consentano di mantenere equidistanti le barrette durante l'infissione.

Un'altra tecnica di misura indiretta del contenuto idrico del suolo che utilizza le proprietà dielettriche del sistema trifase è la Frequency Domain Reflectometry (FDR). Il suolo è

considerato parte di un capacitore, in cui i dipoli nel mezzo dielettrico si allineano sotto l'azione di un campo elettrico, diventando polarizzati.

Le sonde capacitive permettono di determinare la costante dielettrica apparente del suolo ( $\varepsilon_b$ ) che, come detto, è fortemente dipendente dal contenuto idrico. Più alto è il contenuto idrico del suolo, maggiore è il valore della costante dielettrica e minore è la frequenza misurata dal sensore (Williams et al., 2003). In altri termini, le sonde capacitive usano la parte di suolo che circonda gli elettrodi come il dielettrico di un condensatore in cui i dipoli elettrici, costituiti dalle molecole dell'acqua contenuta nel suolo, si polarizzano in risposta al campo elettrico imposto. Fissata la frequenza e la configurazione dell'elettrodo, la relazione tra la costante dielettrica  $\varepsilon_b$  e la capacità totale,  $C$ , è data da:

$$C = g_f \varepsilon_b \quad (1.22)$$

in cui  $g_f$  è una costante geometrica legata alla configurazione dell'elettrodo (dimensione, forma, e distanza tra gli elettrodi).

La frequenza di oscillazione del campo elettrico,  $F$ , per fissato valore dell'induttanza  $L$  del circuito, dipende soltanto dalla capacità del condensatore formato dal sistema elettrodi-suolo:

$$F = (2\pi\sqrt{L C})^{-1} \quad (1.23)$$

Misurato  $F$  è possibile ricavare  $\theta$ , nota che sia la specifica relazione di calibrazione, valida per ciascun tipo di suolo:

$$F = f(\theta) \quad (1.24)$$

La frequenza di oscillazione è proporzionale solo al rapporto di aria e acqua contenuti nel suolo. Questa frequenza, così misurata, viene registrata nel datalogger, come *count*. I *counts* vengono poi elaborati mediante un'equazione di normalizzazione per ottenere una frequenza scalata. La procedura di normalizzazione mette in relazione le frequenze lette nel suolo con quelle lette in aria e in acqua, consentendo così di ottenere la frequenza scalata ( $SF$ ):

$$SF = \frac{Fa - Fs}{Fa - Fw} \quad (1.25)$$

dove  $Fa$  è la frequenza misurata dal sensore in aria,  $F_s$  quella misurata al suolo e  $F_w$  quella misurata in acqua.

La normalizzazione è importante perché ogni sensore risponde in modo diverso in aria e in acqua. Inoltre, questa operazione permette di installare il sensore in campo in diverse posizioni senza perdere la continuità dei dati, ed è importante quando le misure sono

effettuate per un lungo periodo, quando vengono utilizzate due o più sonde nello stesso suolo ovvero quando due o più sensori sono collegati ad uno stesso datalogger.

Il valore di  $SF$  è poi convertito in contenuto idrico,  $\theta$ , usando un'equazione di calibrazione rappresentata da un legame funzionale  $\theta(SF)$ .

In base al disegno della sonda, si può operare a frequenze che variano da 38 a 150 MHz. Gardner *et al.* (1991) hanno concluso che l'influenza, sulla misura, indotta da acidità o salinità dell'acqua nel suolo è ridotta operando a frequenze più alte di almeno 30 MHz, come anche gli effetti della conduttività del suolo che sono inversamente proporzionali alla frequenza. Gli Autori hanno mostrato che alle frequenze comprese tra 100 e 150 MHz, gli effetti descritti sono sufficientemente ridotti e non è necessario operare a frequenze ancora più alte, che rendono molto più difficile la realizzazione del circuito.

Paltineau e Starr (1997) hanno ricavato sperimentalmente in laboratorio una equazione di calibrazione della sonda capacitiva a sensori multipli "Sentek Enviroscan". Dalle prove effettuate, gli Autori hanno dedotto che la precisione della calibrazione è in primo luogo dipendente dagli errori connessi al prelevamento dei campioni per le misure, segnalando quindi la necessità di procedere con accuratezza nel prelievo in prossimità della zona di influenza del sensore.

Per quanto riguarda la sensibilità alle variazioni di temperatura delle sonde capacitive Diviner 2000 ed Enviroscan, rispetto alla sonda a neutroni ed al TDR, prove sperimentali condotte hanno evidenziato che variazioni di temperatura non superiori a 10 °C, non influenzano significativamente i contenuti idrici del terreno, come invece succede per i valori misurati con la sonda a neutroni e con il TDR.

Baumhardt *et al.*, (2000) hanno condotto una ricerca che ha messo in evidenza gli effetti della salinità sulle misure ottenute con le sonde capacitive, rispetto a quelle effettuate con sonde TDR. Inoltre, l'incremento del contenuto idrico in seguito all'aggiunta di acqua con elevato contenuto di sali è stato messo in relazione agli effetti che la salinità ha sulla permittività del suolo.

Dalle ricerche condotte si può evidenziare che l'accuratezza delle misure varia in funzione di diversi fattori, quali il tipo di suolo e, in misura minore, la temperatura del suolo e la salinità.

L'uso della sonda capacitiva comporta tuttavia alcuni problemi ancora non risolti, quali le condizioni climatiche, non controllate, all'interno del tubo di accesso della sonda, l'influenza di cambiamenti nell'orientamento del sensore all'interno del tubo di accesso, nonché i vuoti d'aria tra la sonda e il tubo di accesso, che possono modificare la densità apparente del suolo,

$\rho_b$ , lungo il profilo investigato. Queste limitazioni sono state in parte superate con le sonde capacitivo multisensore o a sensore singolo, che possono essere localizzate fino a 500 m dal datalogger.

Il sensore capacitivo, rispetto alle tradizionali tecniche utilizzate dalle sonde a neutroni, presenta il vantaggio di essere più leggero, di consentire letture rapide e nessun rischio di emissioni radioattive per gli operatori.



**Figura 1.12 - Sensore Diviner-2000**

Tra i sensori che utilizzano la tecnica FDR per la stima dei contenuti idrici del suolo, il Diviner 2000, mostrato in fig. 1.12, rappresenta il pioniere dei sistemi portatili. Esso consiste di un'unità display e di una sonda portatile. L'unità display costituisce l'interfaccia della sonda e permette anche l'acquisizione e la memorizzazione dei dati misurati. La sonda consiste in un'asta metallica, di

lunghezza variabile tra 1 e 2m, che si collega alla porta di connessione dell'unità display e che all'estremità inferiore contiene il sensore singolo capacitivo ad anelli cilindrici.

La scala graduata sull'asta mostra la profondità alla quale la sonda è inserita rispetto al piano di campagna.

Il sensore, costituito da un anello metallico separato da anelli di plastica, è racchiuso all'interno di un supporto in materiale plastico. Tale configurazione permette di misurare il contenuto idrico del suolo in situ e a diverse profondità.

La zona di influenza del sensore ad anello cilindrico si distingue nelle due componenti: assiale e radiale. La componente assiale si estende verticalmente per circa 10 cm dal baricentro di due anelli di misura, mentre la componente radiale, perpendicolare all'asse del tubo, si estende per circa 5-10 cm dalla parete esterna del tubo di accesso. Le sonde ad anelli metallici richiedono la preliminare installazione di tubi di accesso in PVC, infissi nel suolo e la cui accurata installazione è fondamentale per garantire l'attendibilità delle misure. L'operazione richiede molta attenzione e cura a causa della sensibilità che gli elettrodi mostrano nei confronti delle sacche d'aria che possono formarsi in fase di installazione intorno ai tubi d'accesso. Infatti, la presenza d'aria può alterare il valore della costante dielettrica apparente, risultando la costante dielettrica dell'aria circa due ordini di grandezza inferiore a quella dell'acqua. Altri problemi sono da imputare all'eventuale alterazione della struttura e della densità del suolo che porta a sua volta alla modificazione del moto dell'acqua nel terreno.

Per l'installazione dei tubi, in fig. 1.13, viene fornito un kit d'installazione comprendente un treppiedi provvisto di livella, 4 aste metalliche di ancoraggio, delle spugne e spazzole per la pulizia della parte interna del tubo, una trivella, dei tappi ad espansione a chiusura ermetica e degli anelli metallici a bordo tagliente.



**Figura 1.13 - Installazione del tubo di accesso del sensore Diviner 2000 della Sentek**

La casa costruttrice dello strumento (Sentek Enviromental Technologies), fornisce un'equazione di calibrazione standard di tipo potenza che permette di ricavare il valore di contenuto idrico del suolo,  $\theta$ , a partire dai valori di frequenza di oscillazione misurata dal sensore. L'equazione standard fornita dalla casa costruttrice è la seguente:

$$SF = a\theta^b + c \quad (1.26)$$

che, esplicitando rispetto a  $\theta$  risulta,

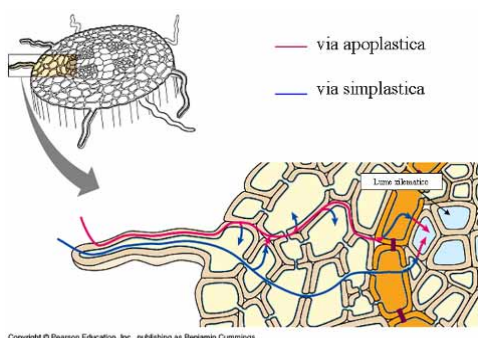
$$\theta = \left( \frac{SF - c}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (1.27)$$

in cui  $a$ ,  $b$  e  $c$  sono i coefficienti di calibrazione proposti dal costruttore e pari rispettivamente a 0.2746, 0.3314 e 0. Questa equazione, messa a punto sulla base di dati rilevati in Australia su diversi campioni di suolo sabbioso, franco sabbioso e di substrati organici, è caratterizzata da un valore di  $R^2$  pari a 0.9985. La casa costruttrice, consiglia tuttavia la determinazione di un'equazione di calibrazione sito-specifica per il tipo di suolo considerato, in modo da ottenere valori di umidità più attendibili e che tengono conto di condizioni locali, visto che l'equazione standard non riesce sempre a rappresentare la grande eterogeneità di suoli presenti in natura.

Per effettuare la calibrazione del sensore Diviner può essere seguita la procedura descritta da Paltineau e Starr (1997), che fa riferimento al contenuto idrico ottenuto con il metodo termo-gravimetrico, ottenuto utilizzando campioni rimaneggiati di suolo prelevati in prossimità dei pozzetti di misura, ma senza alterare la zona d'influenza del sensore. Gli Autori consigliano inoltre di effettuare quest'operazione in laboratorio, poiché la calibrazione in campo è più laboriosa e richiede tempi maggiori. Le misure di contenuto idrico volumetrico effettuate con la sonda sui campioni di suolo vengono quindi confrontate con quelle ottenute utilizzando il metodo termogravimetrico. La relazione tra il contenuto volumetrico e la frequenza scalata ottenuta attraverso procedura di normalizzazione, è descritta da un'equazione matematica che corrisponde all'equazione di calibrazione, valida per il suolo considerato.

#### **1.4 Lo stato idrico della pianta e metodi speditivi di monitoraggio**

Per la descrizione dello stato idrico all'interno della pianta, occorre tenere in conto le due diverse vie di passaggio dell'acqua, quella che avviene attraverso l'apoplasto e quella che utilizza il simplasto. Si intende per apoplasto l'insieme dei tessuti composti da cellule non viventi, nonché le pareti cellulari, gli spazi intercellulari, i lumi xilematici e tutte quelle strutture che si trovano all'esterno del plasmalemma (membrana che regola gli equilibri elettrochimici tra il contenuto cellulare, protoplasto, e l'ambiente esterno). Per simplasto invece ci si riferisce all'insieme del materiale vivente (protoplasto) delle cellule, fra loro connesse da particolari connessioni denominati plasmodesmi.

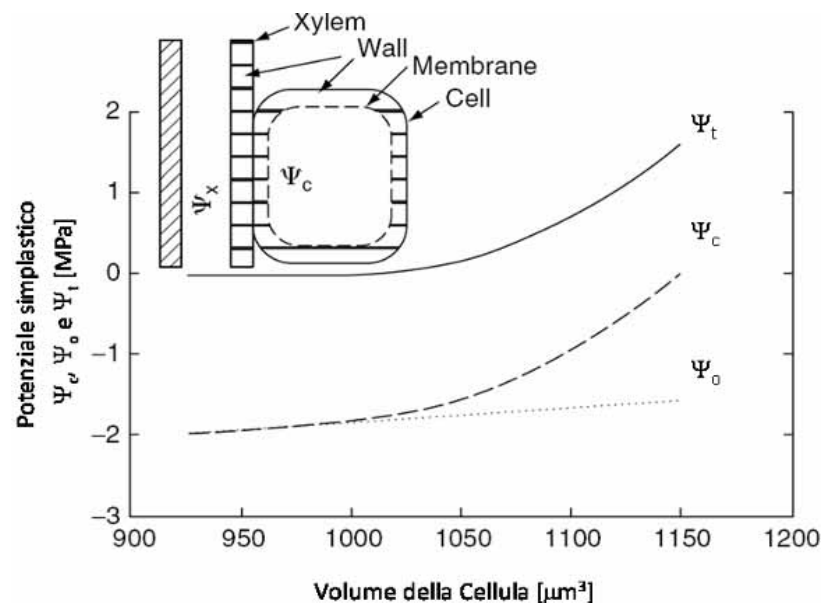


**Figura 1.14 – Rappresentazione delle vie di trasporto dell'acqua all'interno della pianta**

La fig. 1.14 raffigura una sezione di radice in cui sono evidenziate le due vie di trasporto dell'acqua. Pertanto lo stato energetico dell'acqua, assume significato ed entità diversi in funzione del fatto che l'acqua si trovi nell'apoplasto o nel simplasto. Nell'apoplasto particolare importanza riveste il potenziale dell'acqua all'interno del sistema conduttivo xilematico,  $\Psi_x$ . Con riferimento a piante di piccola taglia, il potenziale idrico xilematico è la somma algebrica di tre componenti: un potenziale di pressione,  $\Psi_p$ , descrivibile attraverso le leggi dell'idrostatica, un potenziale matriciale,  $\Psi_{mx}$ , legato alla forze di adesione con le pareti cellulari, e un potenziale osmotico,  $\Psi_{ox}$ , legato alla presenza di ioni disciolti nel flusso linfatico xilematico. Il potenziale di pressione nell'apoplasto assume valori bassi, prossimi

alla pressione atmosferica, mentre il potenziale matriciale all'interno dipende molto dalla natura delle pareti cellulari. La concentrazione ionica all'interno del flusso linfatico xilematico risulta più bassa rispetto a quella simplastica e, pertanto, il potenziale osmotico,  $\Psi_{ox}$ , contribuisce poco alla determinazione del potenziale xilematico,  $\Psi_x$ .

All'interno del simplasto, ovvero dentro una cellula vivente, il potenziale dell'acqua,  $\Psi_c$ , viene dato dalla somma algebrica di due componenti, il potenziale osmotico,  $\Psi_o$ , dovuto alla presenza dei soluti protoplasmatici e il potenziale di turgore,  $\Psi_t$ , legato alla pressione esercitata dalla parete cellulare verso l'interno della cellula. Il potenziale di turgore all'interno del simplasto è positivo, mentre il potenziale osmotico risulta negativo, poiché la presenza di ioni disciolti nel protoplasma rende il potenziale idrico sempre inferiore a quello dell'acqua pura. Il passaggio di acqua dall'interno all'esterno della cellula, e quindi verso il lume xilematico, avviene quando si genera un gradiente di potenziale idrico tra l'interno della cellula ed il lume stesso. In particolare la cellula assorbe acqua quando il suo potenziale risulta inferiore rispetto a quello xilematico. Questa condizione viene garantita grazie alla componente osmotica del potenziale simplastico,  $\Psi_o$ , che risulta sempre negativa. L'assorbimento di acqua da parte della cellula cesserà quando questa avrà raggiunto il pieno turgore e quindi quando la componente di turgore, eguaglia il differenziale  $\Psi_x - \Psi_c$ . In altre parole, l'incremento di  $\Psi_t$  fa aumentare  $\Psi_c$ , fin quando questo eguaglia  $\Psi_x$ .



**Figura 1.15 - Diagramma di Hofler in cui si riportano le variazioni delle componenti del potenziale simplastico**

La relazione tra il potenziale idrico cellulare,  $\Psi_c$ , ed i suoi componenti, durante un processo di scambio idrico con lo xilema, viene studiata attraverso il diagramma di Hofler

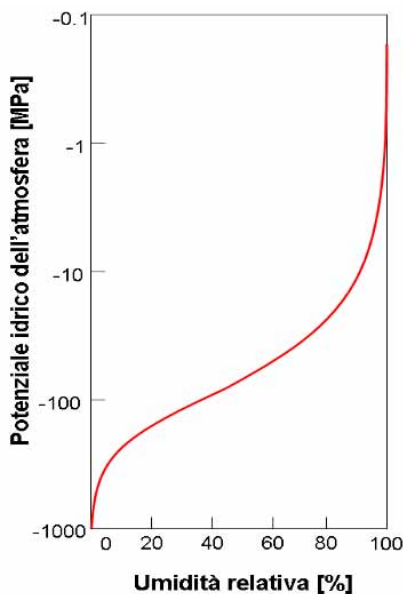
riportato in fig. 1.15. Esso descrive la variazione del potenziale idrico, del potenziale di turgore e del potenziale osmotico al variare del volume cellulare, assumendo che il sistema si espanda solo per assorbimento di acqua e che non vi sia nessun trasferimento di soluti. Secondo Hofler quando l'acqua entra nella cellula si hanno due effetti combinati: la diluizione del succo cellulare e quindi l'abbassamento del potenziale osmotico nonché l'incremento della pressione di turgore indotta dalla parete cellulare.

Nel comparto atmosfera il potenziale dell'acqua presente sotto forma di vapore, che si trova all'interno delle camere ipostomatiche e nell'interfaccia tra la superficie fogliare e l'atmosfera,  $\Psi_a$ , è rappresentato dal potenziale chimico delle molecole di vapor d'acqua più il contributo gravitazionale che risulta, in termini analitici, pari a:

$$\psi_a = \frac{RT}{V_w} \ln \frac{UR}{100} \quad (1.28)$$

Nella porzione atmosferica limitrofa alla foglia sostituendo ad  $R$  (costante universale dei gas) ed a  $V_w$  (volume molare dell'acqua) i rispettivi valori  $R=0.0831 \text{ l bar mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ] e  $V_w=18 \text{ ml mol}^{-1}$  a  $25^\circ\text{C}$ , il potenziale dell'acqua nell'atmosfera risulta linearmente variabile con la temperatura e con il logaritmo dell'umidità relativa, secondo la relazione:

$$\psi_a = 4.61 T \ln \frac{UR}{100} \quad (1.29)$$



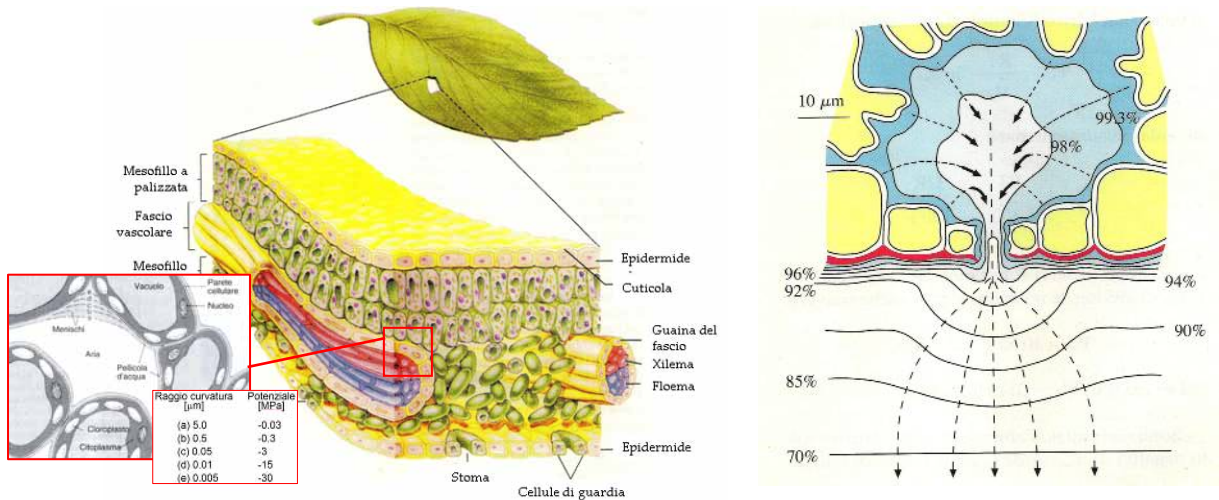
**Figura 1.16 – Relazione tra il potenziale idrico atmosferico (a  $20^\circ\text{C}$ ) e l'umidità relativa**

A  $20^\circ\text{C}$  e con il 99% di  $UR$ , il valore di  $\Psi_a$  è pari a  $-1360 \text{ kPa}$ , mentre in un giornata secca con  $UR=50\%$ , il potenziale atmosferico arriva a  $-311.6 \text{ MPa}$  (fig. 1.16).

Il processo biofisico che innesca i gradienti di potenziale all'interno del sistema SPA è la traspirazione. L'acqua che evapora dalle foglie crea un gradiente di pressione che si instaura tra l'interno delle camere sottostomatiche e l'atmosfera, come illustrato in fig. 1.17. In particolare, si crea nelle pareti una perdita di acqua che fa abbassare il potenziale idrico; ciò richiamerà acqua dal vacuolo delle cellule del mesofillo fogliare, causando anche in queste una diminuzione del potenziale idrico. Man mano che l'acqua evapora dalla pellicola superficiale della foglia, essa si ritira negli interstizi della parete cellulare, portando alla formazione di menischi sempre più curvi e a potenziali idrici sempre più bassi; in questo



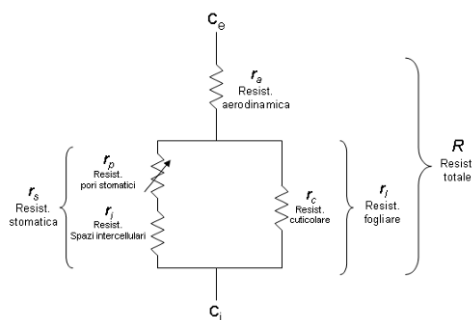
modo la forza motrice per il trasporto xilematico viene generata nell'interfaccia aria-acqua all'interno della foglia.



**Figura 1.17 - Sezione foglia con indicate la disposizione interna dei tessuti (sinistra) e i possibili menischi che si formano man mano che il potenziale idrico si riduce. Possibili linee di isoconcentrazione di vapore acqueo nel percorso di diffusione verso l'esterno dello stoma (destra)**

Altra acqua viene quindi attirata dalle cellule vicine che, per lo stesso principio, ne richiameranno da altre cellule, fino a coinvolgere quelle poste nelle immediate vicinanze dello xilema. Da qui, rapidamente viene superato il potenziale gravitazionale e si determina un gradiente di suzione che a sua volta provoca l'assorbimento dell'acqua nel suolo da parte delle radici.

Anche se parte dell'acqua che fluisce attraverso lo xilema viene trattenuta nelle cellule delle foglie o passa nel floema, la maggior parte di essa evapora negli spazi intercellulari e fuoriesce come vapore nell'atmosfera attraverso gli stomi, quando questi sono aperti. Questo processo è noto come traspirazione. In termini fisici la traspirazione può essere descritta come



**Figura 1.18 - Diagramma che mostra la rete di resistenze alla diffusione del vapore acqueo dalla foglia all'atmosfera. La freccia su  $r_p$  sta ad indicare la forte dipendenza di questa resistenza dalle condizioni ambientali (da Jones, 1992)**

un processo di evaporazione la cui velocità dipende, infatti, dalla disponibilità di energia necessaria per il passaggio di stato e quindi dalla temperatura, dal gradiente di tensione di vapore tra interno ed esterno delle camere sottostomatiche, nonché dalle resistenze che si oppongono alla diffusione del vapore acqueo. In termini analitici per quantificare il flusso di traspirazione (flusso di volume,  $dV/dt$ ) attraverso una superficie fogliare  $A$ , si può scrivere:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{A}{R} (C_i - C_e) = -\frac{A}{R_e} \Delta C$$

$$(1.30)$$

nella quale si è indicato con  $C_i$  la concentrazione di vapore acqueo negli spazi intercellulari della foglia, con  $C_e$  la concentrazione di vapore acqueo nell'aria esterna e con  $R_e$  l'insieme delle resistenze che si oppongono al flusso.

L'analisi delle resistenze al processo traspirativo evidenzia sostanzialmente due gruppi di resistenze poste in serie tra di loro: la resistenza fogliare e la resistenza aerodinamica, così come riportato in fig. 1.18.

La resistenza fogliare,  $r_l$ , risulta composta dalla resistenza cuticolare,  $r_c$ , e da quella stomatica,  $r_s$ , la quale a sua volta si compone della resistenza che si oppone al flusso di vapore quando questo muove tra gli spazi intercellulari,  $r_i$ , e di quella legata al diametro dei pori stomatici,  $r_p$ . La resistenza cuticolare assume valori variabili con la specie e assume valori elevati nelle foglie delle piante arido resistenti come l'olivo.

I componenti della resistenza stomatica sono disposti in serie e possono essere descritti mediante la loro somma:

$$r_s = r_p + r_i \quad (1.31)$$

La resistenza stomatica varia con le diverse specie e, all'interno della stessa specie, in funzione di variabili ambientali, quali soprattutto la domanda evapotraspirativa dell'ambiente e lo stato idrico del suolo.

Le due componenti principali della resistenza fogliare risultano disposte in parallelo e pertanto vale la relazione:

$$\frac{1}{r_l} = \frac{1}{r_c} + \frac{1}{r_s} \quad (1.32)$$

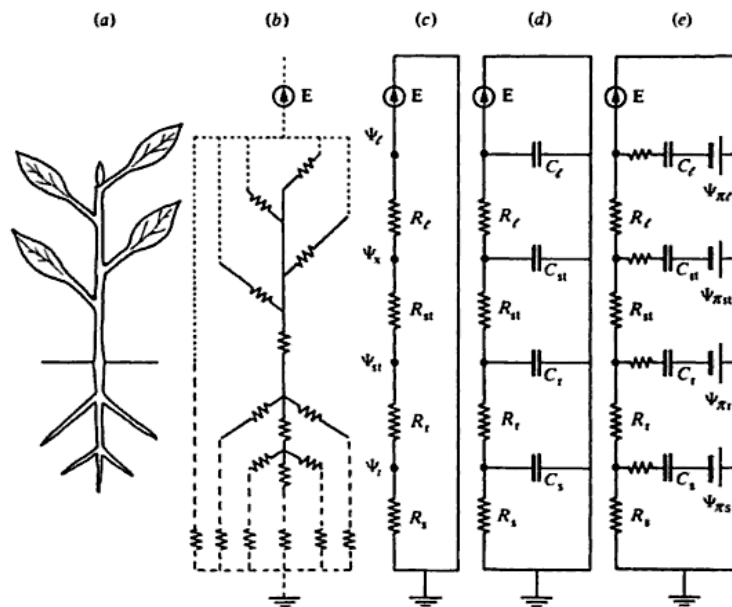
La resistenza aerodinamica,  $r_a$ , è dovuta alla presenza di un sottile strato d'aria che si forma inizialmente al disopra della superficie fogliare. Tale strato, detto "strato limite", si forma in ogni condizione di fluido in moto su una superficie. All'interno dello strato limite la temperatura e la densità di vapore presentano caratteristiche fisiche diverse rispetto a quelle dell'aria sovrastante. Per una data differenza di temperatura o di concentrazione di vapore acqueo tra la foglia,  $C_i$ , e l'aria,  $C_e$ , che è al di là dello strato limite, cioè per una data forza motrice, il trasferimento convettivo di vapore acqueo è più rapido se lo strato limite è più sottile (gradiente ripido). Il fattore ambientale più influente sullo spessore dello strato limite è la velocità del vento, con una relazione d'inversa proporzionalità. Come riportato in precedenza, il movimento dell'acqua nella pianta è governato da regole analoghe a quelle che riguardano il flusso di corrente elettrica, come descritto dalla legge di Ohm. Il gradiente di

potenziale idrico nel sistema SPA è la “forza motrice” che determina il trasporto attraverso la pianta: l’acqua muove da un punto del sistema a maggiore potenziale idrico ad un altro punto a minore potenziale verso l’atmosfera, passando attraverso la pianta.

La performance della schematizzazione adottata per la descrizione dei flussi idrici all’interno del sistema SPA è legata alla sua complessità, intesa come tipo e quantità degli elementi elettrici che costituiscono il circuito (fig. 1.19). Qualunque sia la schematizzazione adottata, il generatore di tensione ( $E$ ) è rappresentato dal processo traspirativo. Nelle schematizzazioni più semplici (fig. 1.19c) le resistenze che il flusso incontra nell’attraversare il suolo,  $R_s$ , le radici,  $R_r$ , gli elementi assili (tronco, branche e rami),  $R_{st}$  e la foglia,  $R_l$ , sono disposte in serie. Nelle schematizzazioni più complesse viene inclusa la componente capacitanza legata al suolo,  $C_s$ , alle radici,  $C_r$ , agli elementi assili,  $C_l$  ed alle foglie. La capacitanza  $C_i$  [ $m^3 MPa^{-1}$ ] è una caratteristica di ogni organo vegetale (tronco, ramo, branca o singola foglia), rappresentandone l’attitudine a cedere acqua a seguito di una variazione di potenziale idrico  $d\psi$ :

$$C_i = \frac{dW}{d\psi} \tag{1.33}$$

in cui  $dW$  rappresenta la variazione infinitesima di volume idrico. L’effetto capacitivo è maggiore per gli organi di dimensioni maggiori.



**Figura 1.19a-e – Schematizzazione elettrica del comparto pianta del sistema continuo Suolo-Pianta-Atmosfera (da Jones, 1992)**

Un’ulteriore complessità del processo traspirativo può essere indotta dalla presenza di altre resistenze, disposte in parallelo tra loro, e che si oppongono al flusso diretto o che

proviene al/dai capacitori. Inoltre si possono allocare ulteriori generatori di tensione legati per esempio alla capacità di alcune piante di aggiustare la componente osmotica,  $\Psi_o$ , del potenziale idrico totale all'interno della pianta.

Seguendo la schematizzazione semplice indicata in fig. 1.19c, all'equilibrio tra efflusso (acqua traspirata dalla pianta) ed influsso (acqua assorbita dalla pianta) di acqua, il sistema è in uno stato stazionario, nel quale la portata è costante in ogni comparto:

$$Q = \frac{\psi_s - \psi_{rad.}}{R_s} = \frac{\psi_{rad.} - \psi_x}{R_{rad.}} = \frac{\psi_x - \psi_l}{R_x + R_l} = \frac{\psi_l - \psi_a}{R_l + R_a} \quad (1.34)$$

Secondo questa equazione, la portata complessiva, all'equilibrio, risulta pari alla differenza di potenziale dell'acqua tra due punti divisa per la resistenza interposta o per la somma di più resistenze poste in serie. Nella realtà sperimentale, questa equazione rappresenta un'eccessiva semplificazione per i seguenti motivi:

- l'equazione presuppone condizioni di equilibrio tra influsso ed efflusso (stazionarietà) che solo raramente si verificano nella realtà;
- il modello assume l'esistenza di resistenze costanti. In realtà la resistenza interposta può variare istante per istante: basti pensare agli stomi o anche alle radici, la cui resistenza al flusso varia al variare del flusso stesso;
- parti importanti della pianta (midollo, xilema secondario) possono comportarsi da capacitori: esse possono cioè porre in riserva acqua e metterla a disposizione nei momenti di carenza;
- l'acqua si muove nel suolo e nella pianta allo stato liquido, ma passa allo stato di vapore a livello della foglia: la determinazione di  $\psi_a$ , basata com'è su determinazioni di umidità relativa, è imprecisa e può condurre a errori grossolani.

Dall'eq. 1.16 è possibile mettere anche in evidenza come non esista una relazione univoca tra potenziale fogliare ( $\psi_l$ ) e potenziale del terreno ( $\psi_s$ ):

$$Q = \frac{\psi_s - \psi_l}{R_s + R_l} \quad (1.35)$$

Risolviendo per  $\psi_l$  otteniamo:

$$\psi_l = \psi_s - Q(R_s + R_l) \quad (1.36)$$

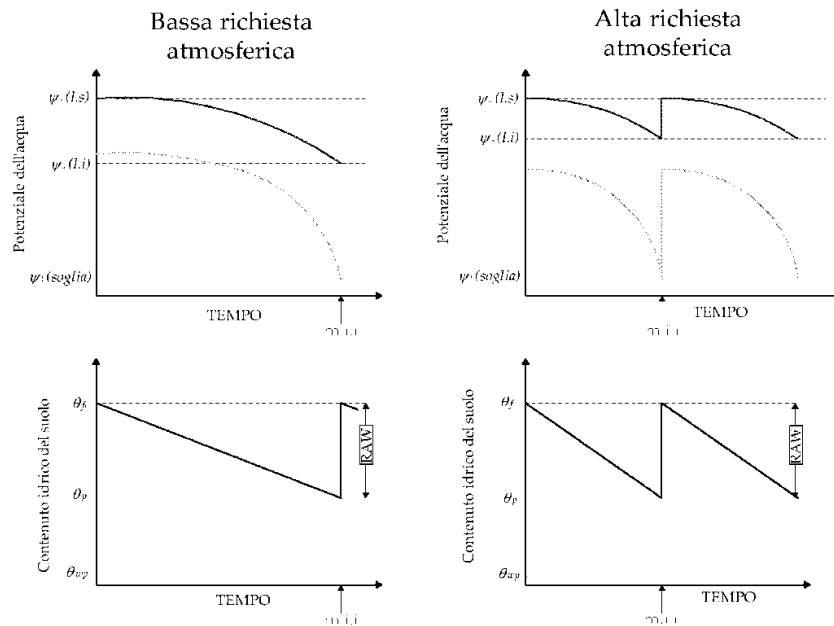
da cui emerge chiaramente che per un determinato valore di  $\psi_s$ , il potenziale fogliare,  $\psi_l$ , diminuisce all'aumentare della traspirazione e delle resistenze idrauliche.

Valori molto bassi di  $\psi_l$  possono pertanto essere causati sia da deficit idrico nel suolo (bassi  $\psi_s$ ), sia da traspirazione molto alta, sia da resistenze terreno-pianta elevate, oltre ovviamente che dalla concomitanza di queste condizioni. Finché il suolo è sufficientemente umido ( $R_s$  non limitante), il potenziale fogliare diminuisce inizialmente in parallelo con la diminuzione del potenziale del suolo. Man mano che il suolo si essicca, il potenziale idrico del terreno e di conseguenza la conducibilità idraulica del suolo si abbassano fino ad un livello in cui  $R_s$  diventa rilevante. Di conseguenza, il potenziale fogliare si riduce ulteriormente (a parità di potenziale del suolo) per sostenere la traspirazione in condizioni di  $R_s$  elevati. Il processo traspirativo si interrompe quando il  $\psi_l$  si abbassa al valore di soglia per l'apertura stomatica. L'entità della domanda evapotraspirativa influenza pertanto il valore minimo di potenziale del suolo che può essere raggiunto prima di procedere nell'intervento irriguo. La fig. 1.20 permette di rendere più esplicito come, in condizione di bassa domanda evapotraspirativa, il minore gradiente di potenziale idrico tra suolo e foglia richiesto allo scopo, riduce il valore del potenziale idrico del suolo corrispondente alla soglia d'intervento irriguo.

Le metodologie per misurare lo stato idrico della pianta possono essere raggruppate in tre categorie. La prima, utilizzata soprattutto nelle applicazioni biochimiche, si basa sull'attitudine delle cellule vegetali a rilasciare/atingere acqua, se immerse in una soluzione osmoticamente attiva.

La seconda categoria permette di esprimere direttamente il contenuto idrico di un tessuto vegetale come percentuale rispetto al peso secco dello stesso o come quantità di acqua che il tessuto vegetale contiene rispetto al massimo, corrispondente alle condizioni di pieno turgore.

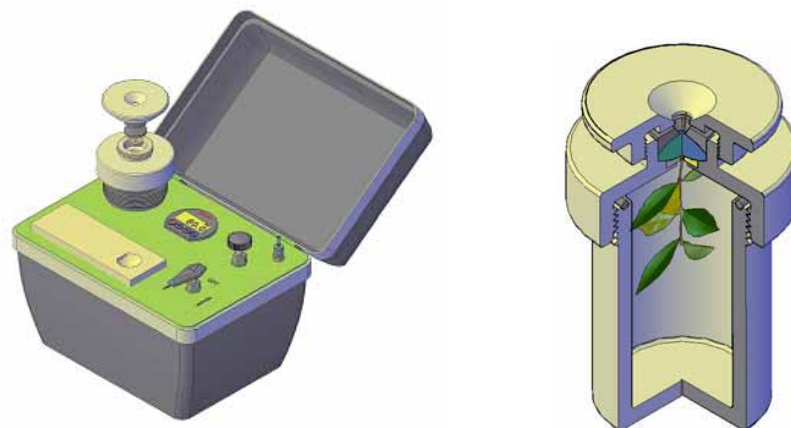
La terza categoria ha una base termodinamica e permette di risalire allo stato idrico attraverso la misura del potenziale chimico dell'acqua all'interno di un tessuto. I metodi della terza categoria rappresentano quelli più utilizzati in ambito eco-fisiologico, in quanto la misura del potenziale dell'acqua rappresenta l'espressione termodinamicamente più corretta per rappresentare lo stato idrico della pianta e per esplicitare i complessi processi di scambio idrico che avvengono all'interno della pianta o tra questa e l'ambiente esterno.



**Figura 1.20.** Rappresentazione schematica dell'influenza della domanda evapotraspirativa (bassa ET e alta ET) sulla relazione tra potenziale idrico del terreno e della foglia (grafici in alto) e tra i corrispondenti contenuti idrici (grafici in basso) nel tempo. La differenza in ET cambia le relazioni tra le variabili irrigue (RAW: riserva idrica del suolo facilmente utilizzabile ed il momento di intervento irriguo, m.i.i.) in modo non lineare.  $\Psi_s$ : potenziale matriciale del suolo; Ls: limite superiore del potenziale matriciale del suolo;  $\Psi(soglia)$ : potenziale fogliare minimo in cui la foglia tende a chiudere gli stomi.  $\theta_c$ : contenuto idrico alla capacità di campo;  $\theta_{wp}$ : contenuto idrico al punto di appassimento

Per la misura dei potenziali idrici nella pianta viene utilizzata la camera pressiometrica di Scholander (fig. 1.21) che consiste in un contenitore di metallo, a pareti spesse, connesso con un manometro e una bombola erogante un gas inerte (azoto).

Il materiale vegetale utilizzato per la misura è rappresentato da foglie che hanno raggiunto le dimensioni finali oppure, come nel caso dell'olivo, da rametti di un anno. L'insacchettamento delle foglie per un periodo di tempo maggiore di circa 20 minuti permette invece di determinare il potenziale idrico dell'elemento assile (potenziale dell'asse), rappresentato dal germoglio, su cui è attaccata la foglia oggetto della misura.



**Figura 1.21 - Camera di Scholander per la misura del potenziale idrico xilematico**

Le foglie vengono fissate a tenuta all'interno della camera, con la superficie di taglio sporgente all'esterno che viene osservata costantemente attraverso una lente di ingrandimento. Aumentando la pressione interna della camera questa si trasmette, attraverso gli spazi intercellulari, alle cellule dell'organo vegetale. Tali cellule vengono compresse dall'incremento del potenziale di turgore ( $\Psi_p$ ), che è la pressione esercitata dalla parete verso l'interno della cellula. Ignorando il potenziale di matrice ( $\Psi_m$ ), o meglio assimilandolo al termine del potenziale osmotico ( $\Psi_o$ ), il potenziale netto risulta:

$$\Psi_{tot} = \Psi_p - \Psi_o + P \quad (1.37)$$

dove  $P$  è la pressione applicata all'interno della camera, che si aggiunge al potenziale di turgore ( $\Psi_p$ ). L'aumento graduale di pressione fa ad un certo punto apparire la linfa dalla superficie di taglio dei vasi xilematici recisi. La pressione alla quale appare la linfa dai vasi recisi viene definita pressione di equilibrio perché controbilancia esattamente la tendenza dell'acqua a entrare (ed a rimanere) all'interno delle cellule viventi limitrofe ai fasci. Poiché la tendenza delle cellule ad assorbire acqua è funzione della differenza tra il loro potenziale dell'acqua e quello (assai prossimo a zero) della linfa grezza, alla pressione di equilibrio, il potenziale medio dell'acqua delle cellule vive della foglia è zero.

Considerando pertanto

$$\Psi_{tot} = \Psi_p - \Psi_o + P = 0 \quad (1.38)$$

ed esplicitando rispetto a  $P$  si ha:

$$P = -\Psi_p + \Psi_o \quad (1.39)$$

che rappresenta il potenziale medio dell'acqua cambiato di segno.

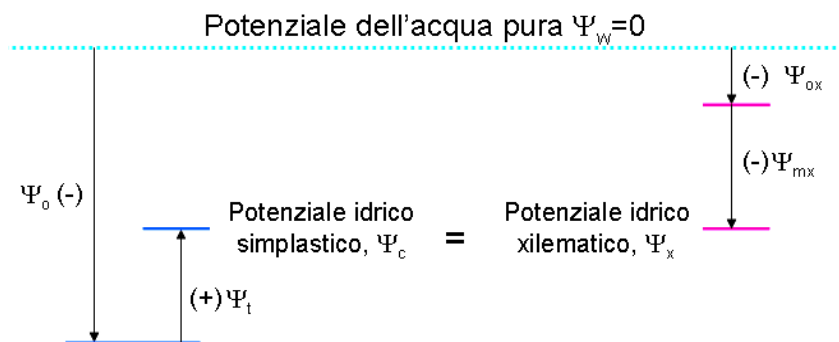
I potenziali idrici della pianta presentano una dinamica giornaliera, in quanto variano con le ore del giorno e quindi con la richiesta traspirativa dell'ambiente. All'interno di questo ciclo circadiano è possibile individuare due punti cardinali che aiutano a sintetizzare lo stato idrico giornaliero della pianta, permettendo al contempo di individuare un indicatore dello stato di stress che può essere considerato nella programmazione irrigua.

I valori utilizzati nella stima dell'entità dello stress dovuto alla carenza idrica sono quelli assunti in momenti particolari dell'arco diurno e precisamente, nell'istante immediatamente precedente l'alba, "pre-dawn" ( $\Psi_{pd}$ ), e nell'istante in cui il sole è allo zenit, midday ( $\Psi_{md}$ ). Il potenziale misurato nelle ore più calde della giornata rappresenta il livello minimo di stato idrico che la pianta raggiunge durante il giorno.

La riduzione massima diurna di potenziale dell'acqua della foglia è rappresentata dalla differenza  $\Delta\Psi = \Psi_{pd} - \Psi_{md}$ . Il potenziale all'alba ( $\Psi_{pd}$ ) viene generalmente misurato allo scopo di ottenere una stima del potenziale dell'acqua del suolo ( $\Psi_s$ ), e quindi della quantità d'acqua disponibile per la pianta. Il presupposto dal quale si parte è che la traspirazione si riduce “praticamente a zero” durante le ore notturne, cosicché il potenziale idrico xilematico pre-dawn traduce una condizione di equilibrio tra il potenziale fogliare ed il potenziale dell'acqua del suolo ( $\Psi_s$ ). Esso può essere anche inteso come il grado di recupero dello stato idrico massimo della pianta durante la notte (Fernandez et al., 1999) e valori minori di -0.5 MPa rappresentano una condizione di stress idrico (Dettori, 1987).

La misura dello stato idrico della pianta si rivela molto utile per la programmazione dell'irrigazione; la ragione risiede nel fatto che lo stato idrico della pianta è legato a quello del suolo, al clima e allo stato fenologico della pianta stessa (Remorini e Massai, 2003). Allo stato attuale delle conoscenze, l'applicabilità di questo indicatore nella programmazione degli interventi irrigui risulta abbastanza consolidata, poiché permette l'individuazione dell'esatto momento di intervento irriguo. L'uso di tale metodologia consente quindi di effettuare la cosiddetta irrigazione di precisione, che rappresenta una modalità di gestione dell'irrigazione pianificata e razionale effettuata con l'obiettivo di ottimizzare l'uso dell'acqua in termini d'efficienza e di costi. La misura del potenziale xilematico si basa sull'equilibrio tra il potenziale apoplastico (xilematico) e quello simplastico che si instaura in un elemento vegetale isolato dal resto della pianta. All'equilibrio, il potenziale apoplastico, quale può essere quello xilematico,  $\psi_x$ , risulta controbilanciato da quello simplastico,  $\psi_c$ , all'interno della cellula.

La schematizzazione di Boyer (1967), mostrata in fig. 1.22, evidenzia come all'equilibrio la differenza di potenziale osmotico tra simplasto e apoplasto, è controbilanciata dalla somma algebrica del potenziale di turgore cellulare  $\psi_t$  e del potenziale matriciale xilematico,  $\psi_x$ .



**Figura 1.22 – Schematizzazione dell'equilibrio tra il potenziale simplastico e quello apoplastico**



Analiticamente l'uguaglianza tra i potenziali si esprime:

$$\psi_x = \psi_c \quad (1.40)$$

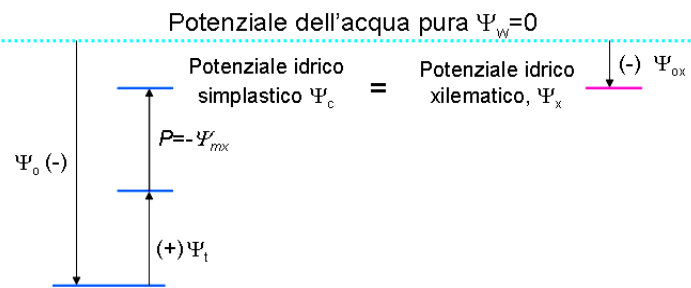
ovvero

$$\psi_{ox} + \psi_{mx} = \psi_o + \psi_t \quad (1.41)$$

Pertanto, l'aumento di pressione all'interno della camera tende a comprimere le cellule vegetali, determinando quindi un incremento del potenziale di turgore ( $\psi_t$ ). L'aumento della pressione farà apparire la linfa dalla superficie di taglio dei vasi xilematici recisi.

La pressione alla quale tale circostanza si verifica viene definita pressione di equilibrio, perché controbilancia esattamente la tendenza dell'acqua a entrare (e a rimanere) all'interno delle cellule viventi limitrofe ai fasci. In questa condizione si viene a creare un nuovo equilibrio (fig. 1.23) e il valore della pressione letto al manometro,  $P$ , eguaglia in modulo il potenziale matriciale xilematico  $\psi_{mx}$ , ovvero:

$$P = -\psi_{mx} \quad (1.42)$$



**Figura 1.23 - Schematizzazione dell'equilibrio tra il potenziale simplastico e quello apoplastico dopo l'aumento artificiale del potenziale di turgore**

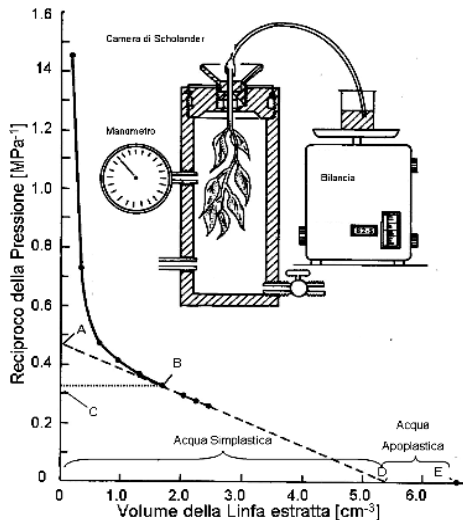
La nuova condizione di equilibrio può essere quindi scritta nella forma:

$$\psi_{ox} - P = \psi_c \quad (1.43)$$

da cui, risolvendo rispetto a  $P$  si ottiene:

$$P = -\psi_{ox} + \psi_c \quad (1.44)$$

che altro non è che il potenziale medio dell'acqua presente nel tessuto vegetale analizzato cambiato di segno. Attraverso la costruzione della curva pressione-volume è possibile determinare la componente osmotica e, per differenza, la componente di turgore. A tale scopo viene utilizzata la curva caratteristica pressione-volume che descrive la relazione tra il reciproco della pressione di bilanciamento,  $1/P$  e il volume di linfa estratta,  $V$ , da un tessuto vegetale precedentemente idratato fino a pieno turgore, come evidenziato in fig. 1.24.



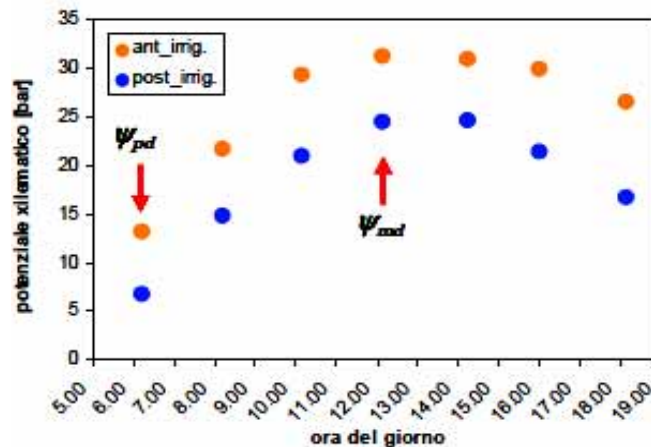
**Figura 1.24 - Curva pressione-volume per la determinazione delle componenti del potenziale idrico di tessuti vegetali**

La relazione è fortemente non lineare per valori di pressione inferiori a quello corrispondente al punto di flesso (B), denominato punto di perdita di turgore. Il valore di pressione in B corrisponde al potenziale osmotico delle cellule a zero turgore (C). Per valori di pressione superiori a quelle corrispondenti al punto B, la relazione diventa lineare. Estrapolando il tratto lineare fino ad intersecare l'asse delle ordinate ( punto A), si ottiene il reciproco del potenziale osmotico della cellula del tessuto

idratato originale, nella condizione di pieno turgore. Estrapolando ancora fino al punto (D) si ottiene il volume di liquido originariamente presente nelle cellule (acqua simplastica). L'acqua residua che resta nel campione può essere misurata pesando il campione prima e dopo averlo essiccato in stufa (E). Si assume che la quantità eccedente il punto (D) sia acqua legata, cioè fortemente attratta dalle superfici idrofile, anche se può essere costituita da acqua presente nell'apoplasto.

I valori cardinali dei potenziali idrici della pianta, generalmente utilizzati nella stima dell'entità dello stress dovuto alla carenza idrica sono, per quanto detto, quelli assunti in momenti particolari dell'arco diurno e precisamente, nell'istante immediatamente precedente l'alba, "pre-dawn" ( $\psi_{pd}$ ), e nell'istante in cui il sole è allo zenit, midday ( $\psi_{md}$ ).

La fig. 1.25 mostra l'andamento circadiano dei potenziali xilematici misurati nel corso di due giornate, precedente e successiva ad un adacquamento.



**Figura 1.25 - Andamento circadiano dei potenziali xilematici misurati nel corso di due giornate rispettivamente precedente e successiva ad un adacquamento**

Studi recenti hanno però messo in dubbio la validità dell'utilizzo di  $\psi_{pd}$  come indicatore dello stato d'acqua nelle piante. In alcuni casi, infatti, tale parametro non risulta correlato con il potenziale dell'acqua del suolo, soprattutto in ambienti aridi (Ameglio et al., 1997; Donovan et al., 1999). Se il suolo si essicca in modo significativo, si può formare un'interfaccia d'aria tra le radici e il suolo che tende a sottostimare il potenziale idrico del suolo  $\psi_s$  (Stirzaker e Passioura, 1996). In altri casi, soprattutto quando si è in presenza di suoli umidi, le piante possono perdere notevoli quantità di acqua per traspirazione anche durante le ore notturne (Benyon, 1999) e quindi non sono più in grado di equilibrare il loro potenziale idrico con quello del suolo. Stimare  $\psi_s$  sulla base di  $\psi_{pd}$  in modo affidabile è possibile se si tiene conto che  $\psi_{pd}$  rappresenta il massimo (meno negativo) potenziale idrico che la pianta può raggiungere in determinate condizioni (Nardini et al., 2003). Vi sono, infatti, suoli caratterizzati da forti processi di contrazione che portano le radici a perdere il contatto col suolo. Si viene in questo modo ad interporre una camera d'aria che funziona da resistenza al flusso di acqua dal suolo alle radici (Nobel, 2010). Misurare direttamente il potenziale di un campione di suolo può quindi fornire false indicazioni sul potenziale idrico della pianta.

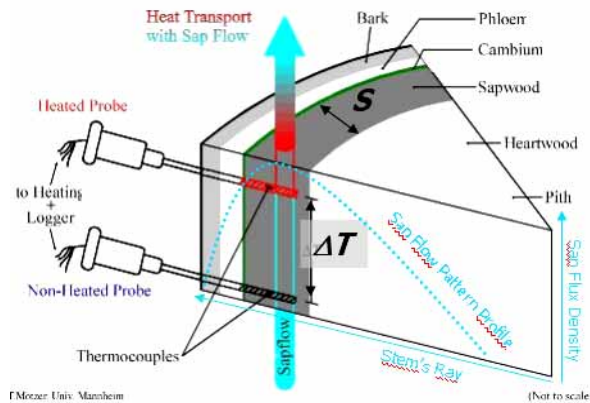
La misura diretta dei flussi traspirativi di una pianta può essere effettuata, utilizzando tecnologie per la stima del flusso linfatico a partire dalla conoscenza di grandezze fisiche collegate al fenomeno. Con queste tecniche viene fornita una stima realistica e diretta delle perdite di acqua della pianta o di un germoglio, senza perturbare l'equilibrio della pianta stessa (Jones, 2004). La misura dei flussi linfatici è strettamente correlata all'attività traspiratoria della pianta e, conseguentemente, alla conduttanza stomatica.

La portata della linfa nei vasi capillari dei fusti può essere generalmente misurata secondo tre modalità: bilancio termico, velocità degli impulsi di calore, dissipazione termica (Smith et al., 1996). L'iniezione di energia termica nel fusto può essere continua o impulsiva; la stima della portata può inoltre essere fatta direttamente su tutta una sezione di fusto oppure interpolando dati provenienti da limitati tratti di sezione.

Il metodo basato sulla dissipazione termica (TDP, Granier, 1985) utilizza sensori, costituiti da una coppia di aghi, ciascuno contenente una termocoppia e avvolti con un rivestimento resistivo, come schematizzato in fig. 1.26. La differenza di temperatura,  $\Delta T$ , che si genera tra il sensore superiore (costantemente riscaldato) e quello inferiore (che registra la temperatura del legno) rappresenta un indice dell'attività traspirativa della pianta, espressa come variazione della densità di flusso,  $v$  [ $\text{ml cm}^{-2} \text{min}^{-1}$ ], secondo l'equazione di Granier (1987):

$$v = 0.714 \left( \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T} - 1 \right)^{1.231} \quad (1.45)$$

nella quale  $\Delta T_{max}$  [°C] rappresenta il valore massimo giornaliero raggiunto dal differenziale termico e coincidente con la condizione di assenza di flusso. La determinazione del termine  $\Delta T_{max}$  risulta aleatoria in virtù della sua variabilità conseguente alle modificazioni delle



**Figura 1.26 - Schematizzazione del sistema di Granier per la misura del flusso di linfa**

proprietà fisiche della matrice nella quale il flusso si propaga. Solitamente la condizione di assenza di flusso viene raggiunta durante le ore notturne. Tuttavia alcuni studi hanno messo in evidenza come anche durante le ore notturne esiste attività traspirativa, come conseguenza dei processi di redistribuzione (Sakuratani et al., 1999; Burgess et al., 2000) e di immagazzinamento dell'acqua all'interno degli organi della pianta (Lu et al., 2004; Goldstein et al., 1998). Questa attività

traspirativa notturna è ampiamente diffusa in molte specie e la quantità di acqua persa può variare dal 5 al 30% dell'ammontare giornaliero (Snyder et al. 2003, Ford et al., 2004, Ludwig et al., 2006). La necessità di determinare il valore di  $\Delta T_{max}$  ad ogni applicazione delle tecniche di misura dei flussi linfatici a base termica, nasce anche dalla forte dipendenza con il cosiddetto effetto di contatto sonda-legno, dipendente a sua volta sia dalle caratteristiche strutturali della sonda che dalle proprietà del legno, quali la conduttività termica e quindi il contenuto idrico. Molti autori si sono dedicati alla messa a punto di procedure per la determinazione della condizione di assenza di flusso. Green et al. (2003) hanno individuato tale condizione attraverso la media su sette giorni dei valori misurati subito prima dell'alba. Con riferimento al metodo Granier, in Lu et al. (2004), la condizione di assenza di flusso viene individuata attraverso analisi di regressione di una serie di dati di  $\Delta T_{max}$  misurati su 10 giorni.

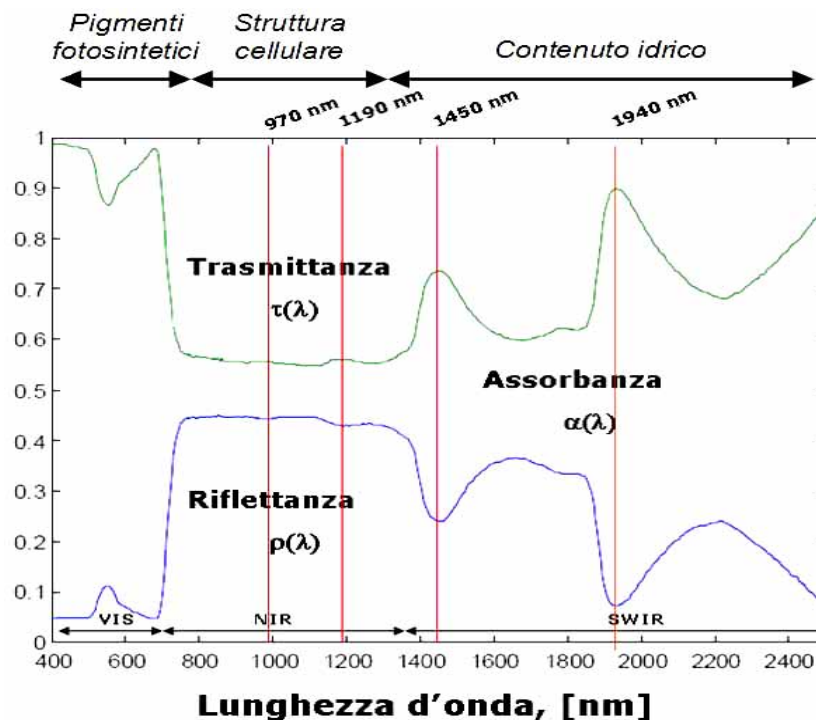
I flussi traspirativi,  $Q_r$  [ml min<sup>-1</sup>] della pianta si ottengono moltiplicando la densità di flusso,  $v$ , per la superficie conduttiva  $S$  [cm<sup>2</sup>], che è funzione dello spessore del sapwood e del diametro del fusto della pianta.



*Figura 1.27 - Metodo diretto per la misura dello spessore del sapwood*

Essa può essere determinata in diversi modi: un metodo diretto ampiamente usato, consiste nell'analizzare per via colorimetrica una carota di legno estratta dal tronco con l'ausilio del succhiello di Pressler, come mostrato in fig. 1.27. La misura dello spessore del sapwood è quindi effettuata mediante un calibro.

Anche dalla conoscenza delle proprietà ottiche della vegetazione, come la variazione delle risposte di assorbanza,  $\alpha$ , trasmittanza,  $\tau$ , e riflettanza,  $\rho$ , della radiazione luminosa nei domini del visibile (VIS), dell'infrarosso vicino (NIR), medio e termico (SWIR) dello spettro elettromagnetico, schematizzato in fig. 1.28, è possibile risalire ad alcuni parametri eco-fisiologici dipendenti dallo stato idrico della vegetazione.



*Figura 1.28 - Risposta spettrale in riflettanza, assorbanza e trasmittanza della vegetazione con individuazione delle bande di assorbimento dell'acqua*

Pertanto, l'alterazione della riflettanza in questa regione dipende essenzialmente dalla sensibilità della clorofilla a condizioni di stress di varia origine, quali la diminuzione della disponibilità di nutrienti, l'eccesso di salinità nel suolo, gli attacchi di insetti e la

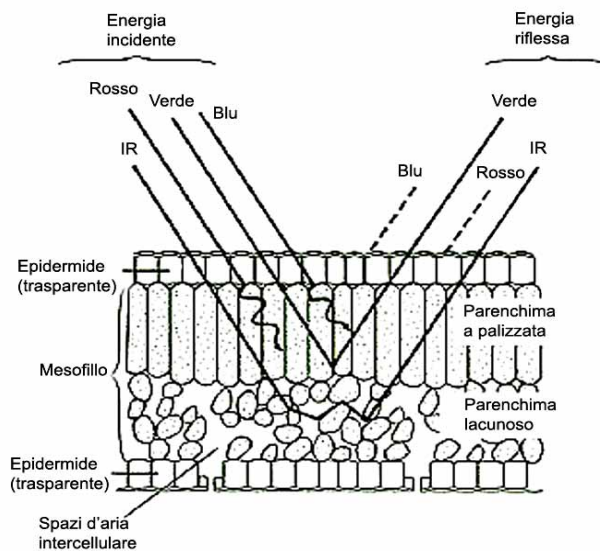
competizione tra le piante. La regione del vicino infrarosso (NIR), compresa tra 750 nm e 1350 nm, è caratterizzata da un'alta riflettanza (40-60%) dovuta esclusivamente alle caratteristiche morfo-anatomiche della lamina fogliare (Boyer, 1988).

Con riferimento alla forma d'onda della sola componente radiativa riflessa da una superficie vegetata, è possibile individuare diverse regioni spettrali il cui andamento risulta legato direttamente o indirettamente allo stato idrico della vegetazione. Nella regione dell'ultravioletto ( $\lambda < 400\text{nm}$ ), la maggior parte della radiazione viene assorbita oppure riflessa dalle sostanze cerose presenti sulla superficie cuticolare. Nella regione del visibile o PAR (radiazione fotosinteticamente attiva) compresa tra 400 nm e 750 nm, circa il 90% della radiazione viene assorbita specialmente dalla clorofilla, nelle bande del blu (445 nm), del rosso (645 nm), e dagli altri pigmenti (antociani, carotenoidi e xantofille), producendo bassa riflettanza.

In questa regione ricadono due bande di assorbimento dell'acqua centrate vicino a 970 e 1200 nm (Jacquemoud and Ustin, 2003). La regione dell'infrarosso termico (SWIR) risulta caratterizzata da picchi caratteristici di assorbimento dell'acqua che si localizzano a 1450, 1940 e 2200 nm. Le bande di assorbimento della vegetazione secca si trovano invece centrate a 1720-1780 nm e sono dovute a composti chimici come cellulosa, lignina e amido (Curran, 1992).

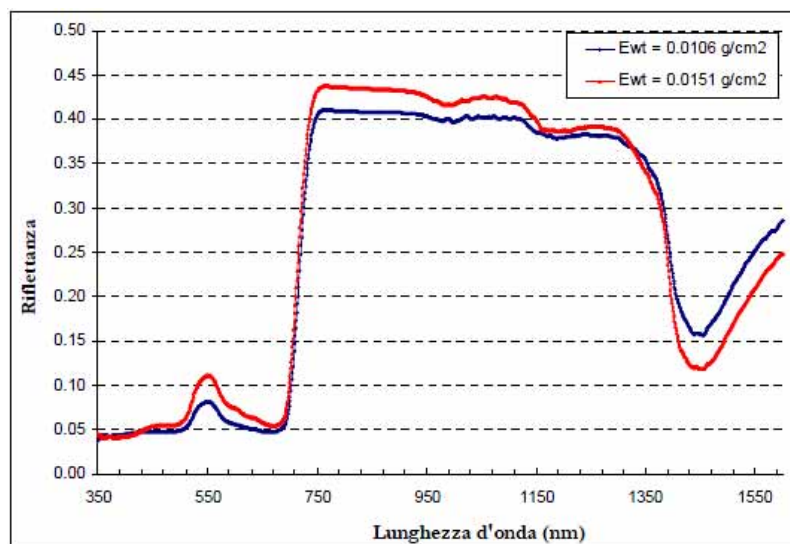
Il comportamento spettrale è il risultato delle interazioni della radiazione con la struttura cellulare, i pigmenti fotosintetici e il contenuto d'acqua

La struttura della foglia si compone di una lamina di cellule contenente i cloroplasti, circondata da uno strato epidermico protettivo perforato da fori (stomi) e collegato al fusto dal picciolo fogliare (dove passa la nervatura). La lamina fogliare fotosintetica consiste di diversi strati del mesofillo, con uno o più strati di cellule a palizzata e uno più lacunoso in prossimità degli stomi. La clorofilla e i pigmenti risiedono nei cloroplasti (organuli all'interno della cellula). In questa porzione viene assorbita la luce blu e rossa (fig. 1.29). La luce verde viene riflessa dalle cellule a palizzata.



**Figura 1.29 - Penetrazione dell'energia luminosa all'interno della struttura fogliare**

Nelle piante verdi, le clorofille sono responsabili dell'assorbimento della radiazione visibile, anche se esistono altri pigmenti, come i carotenoidi, le xantofille e le antocianine, che possono contribuire all'assorbimento della radiazione visibile. Nel vicino infrarosso le foglie assorbono poco, a causa della struttura del mesofillo fogliare, che provoca un "multiple scattering" della radiazione nei siti di discontinuità. Nella regione del medio infrarosso la riflettanza e la trasmittanza risultano più basse rispetto ai valori visti per il NIR. Questa parte dello spettro è caratterizzata da peculiari picchi di assorbimento dell'acqua centrati intorno a 1450, 1940 e 2200 nm: un aumento della riflettanza è pertanto il risultato della diminuzione del contenuto d'acqua fogliare. La fig. 1.30, limitatamente al range di lunghezze d'onda compresa tra 350 e 1600 nm, riporta l'andamento della riflettanza ottenuta su foglie caratterizzate da alto e basso contenuto idrico fogliare. Come si vede dalla figura, differenze nelle proprietà ottiche dovute al diverso contenuto d'acqua sono evidenti nel picco di assorbimento dell'acqua posto intorno ai 1400 nm.



**Figura 1.30 - Riflettanza di due foglie, con alto (rosso) e con basso( blu) contenuto idrico fogliare nell'intervallo spettrale 350-1600 nm**

Se invece della singola foglia si considera l'intera *canopy*, aumenta la complessità nella descrizione del trasferimento della radiazione nella vegetazione.

I fattori che influenzano la riflettività della *canopy* sono il grado di copertura e quantità di biomassa verde, la proporzione verde/non verde, l'architettura degli elementi fogliari (geometria, distribuzione, aggregazione), la fenologia ed i fattori esterni (morfologia dell'area, angolo di vista, geometria illuminazione, condizioni atmosferiche).

Le regioni centrate vicino a 1450 e 1950 nm sono le maggiori bande di assorbimento dell'acqua; altre due bande minori sono invece centrate in prossimità delle lunghezze d'onda di 970 e 1200 nm.

Le bande di assorbimento della vegetazione secca si trovano invece centrate a 1720-1780 nm e sono dovute a composti chimici come cellulosa, lignina e amido (Curran, 1992) e per tale motivo in questo range non si determinano assorbimenti da parte dell'acqua.

Le caratteristiche di assorbimento sono il risultato di transizioni vibrazionali che includono varie connotazioni e combinazioni delle tre fondamentali transizioni vibrazionali della molecola dell'acqua che può avvenire con transizione vibrazionale tipo V1 con allungamento simmetrico H-O-H, di tipo V2 (modo di transizione curvato H-O-H) e V3 (modo di transizione con allungamento asimmetrico H-O-H). Alla banda di assorbimento centrata vicino a 970 nm è attribuita una combinazione 2V1+V3, a quella vicino a 1200 nm una combinazione V1+V2+V3, a quella vicino a 1450 nm una combinazione V1+V3, mentre a quella centrata vicino a 1950 nm una combinazione V2+V3.



L'acquisizione delle firme spettrali avviene attraverso l'ausilio di spettroradiometri quali quelli mostrati in fig. 1.31, utilizzati in molte applicazioni per le quali si richiede la conoscenza quali-quantitativa della radiazione assorbita, trasmessa e/o emessa da un corpo.

In commercio esistono spettroradiometri che operano nell'intervallo di lunghezza d'onda compreso da 350 a 2500 nm, quindi dal campo UV a quello termico, SWIR.

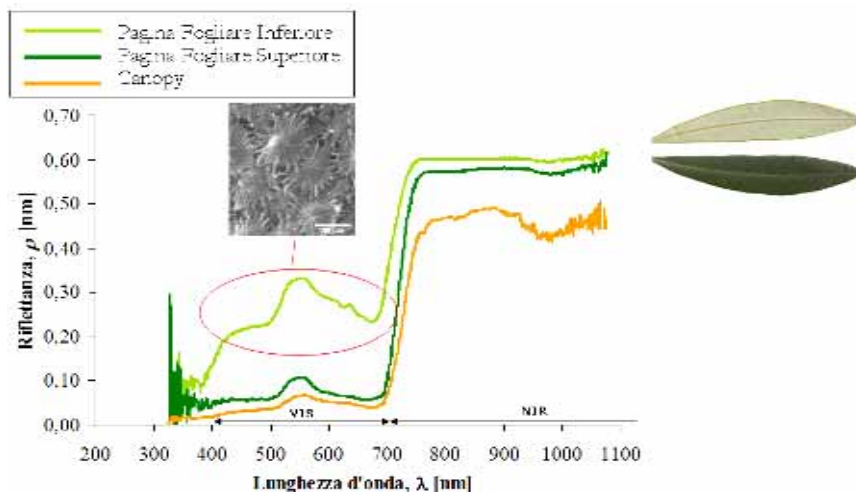


*Figura 1.31 - Spettroradiometri della casa costruttrice ASD (Analytical Spectral Devices, Inc.)*

Quando si opera in riflettanza, lo strumento deve essere riferito alle condizioni radiative reali. Questa fase permette l'ottimizzazione delle misure e consiste nell'acquisire una forma d'onda in radianza o direttamente la firma in riflettanza emessa da una superficie di riferimento costituita da una resina termoplastica (Spectralon) che, riflettendo diffusamente quasi il 100% della radiazione incidente, presenta un comportamento ottico di tipo lambertiano. Eseguita la fase di ottimizzazione è possibile puntare lo strumento sulla superficie vegetale oggetto di studio ed acquisire la firma spettrale in riflettanza da cui estrarre le informazioni.

Con riferimento alla coltura dell'olivo, la firma spettrale in riflettanza acquisita a scala di singola foglia differisce da quella di canopy, essendo quest'ultima legata alla composizione del target di acquisizione (proporzione verde/non verde), all'architettura degli elementi fogliari (geometria, distribuzione degli angoli, aggregazione), alla tipologia del background (suolo), allo stadio fenologico della coltura, nonché a diversi fattori esterni quali l'angolo di osservazione strumentale, la geometria di illuminazione e le condizioni atmosferiche. Più in generale per uno stesso tipo di vegetazione, anche a scala di foglia si può osservare un dimorfismo nella risposta spettrale a seconda che se ne consideri la superficie adassiale o abassiale; il dimorfismo particolarmente evidente nell'olivo, è causato dal particolare adattamento xerofitico delle strutture fogliari. In particolare, la bassa concentrazione di clorofilla che caratterizza la superficie abassiale della foglia, dovuta essenzialmente alla presenza del feltro di tricomi pluricellulari, spiega i più alti valori di riflettanza in

corrispondenza della lunghezza d'onda del rosso (680 nm) come mostrato in fig. 1.32. Nella regione del vicino infrarosso, invece, si possono osservare massimi di riflettanza anche del 60% come causa del ridotto volume degli spazi intercellulari sia nel mesofillo a palizzata che in quello spugnoso, che amplificano in questo modo i fenomeni di “multiple scattering” della radiazione nei siti di discontinuità. A scala di canopy, la risposta in riflettanza nel dominio NIR risulta più bassa a causa delle interferenze di background, quale ad esempio l'effetto del suolo.



**Figura 1.32 - Risposta spettrale in riflettanza acquisita alla scala di canopy e alla scala di singola foglia in foglie di olivo, per la pagina inferiore (abassiale) e superiore (adassiale). All'interno del grafico è riportato un particolare del feltro di tricoli che caratterizza la superficie abassiale**

L'informazione spettrale caratteristica della vegetazione può essere estratta sinteticamente attraverso degli indici che, in funzione della capacità di rilevare direttamente o meno la variazione dello stato idrico, possono essere distinti in diretti ed indiretti. Gli indici che permettono di determinare direttamente lo stato idrico della foglia/canopy e sfruttano la variazione degli effetti primari delle proprietà radiative dell'acqua per monitorare i cosiddetti stress idrici acuti, mentre gli indici indiretti tengono conto della variazione di altri parametri biochimici, quali la quantità della clorofilla e caratteri morfo-anatomici della vegetazione, come la quantità di sostanza secca. Questi ultimi permettono di risalire ai cosiddetti stress idrici cronici che si sviluppano in modo più lento a seguito per esempio, della degradazione della clorofilla o della perdita di sostanza secca (Rodriguez-Perez et al., 2007).

Per risalire direttamente alla variazione dello stato idrico della foglia/canopy, Peñuelas et al., (1993) hanno proposto un'analisi della buca di assorbimento dell'acqua nel NIR. La zona con debole assorbimento dall'acqua, posta intorno a 950-970 nm è stata utilizzata per proporre un indice spettrale in cui si rapporta l'intensità della fossa (assorbimento) ad una riflettanza di riferimento. Pertanto si usa una banda che non presenta assorbimento di acqua e

in cui i fattori strutturali agiscono nello stesso identico modo. L'indice utilizzato dagli autori è il “*Floating Water Index*”  $fWI$ , in cui il calcolo del minimo di riflettanza è ricercato nell'intervallo di lunghezza d'onda tra 930 e 980 nm:

$$fWI = \frac{\min(\rho_{930-980})}{\rho_{900}} \quad (1.46)$$

Una limitazione all'uso del  $fWI$  è quella che l'indice fornisce dati solo per avanzati stati di variazione del contenuto idrico fogliare, precludendone l'utilizzo per l'individuazione di stress idrico blando.

La tecnica del “Continuum Removal” (Pu et al., 2003), permette di definire un indice più sensibile alle variazioni di contenuto idrico fogliare. L'indice impiegato, definito “Absorption Index”  $AI$ , si ottiene applicando un processo di integrazione nell'intervallo di lunghezze d'onda  $[\lambda_1, \lambda_2]$  e rapportando l'area così ottenuta a quella delimitata dal continuum costituito dal segmento che unisce i due punti di massimo dello spettro,  $\rho_{max-1}$  e  $\rho_{max-2}$  corrispondenti rispettivamente alle lunghezze d'onda  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , che sovrastano la buca di assorbimento:

$$AI = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_i \partial \lambda}{(\rho_{max-1} + \rho_{max-2}) \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)}{2}} \quad (1.47)$$

Sia il Floating Water Index,  $fWI$ , che l'Absorption Index,  $AI$ , assumono valori compresi tra 0 e 1, in corrispondenza del minimo e del massimo stato idrico della pianta.

Ceccato (2001) ha definito il *Moisture Stress Index*,  $MSI$ , sulla base del rapporto:

$$MSI = \frac{\rho_{1600}}{\rho_{820}} \quad (1.48)$$

Tale indice risulta molto sensibile al contenuto idrico della vegetazione, al crescere del quale infatti, aumenta l'assorbimento intorno alla lunghezza d'onda 1600 nm. Essendo nullo l'assorbimento a 820 nm, questa banda viene utilizzata come riferimento. Il range di variazione di questo indice, correlato negativamente con il contenuto idrico della vegetazione, varia tra 0 e 3. Per la vegetazione verde, il range di variazione è 0.4-2.

Pu et al. (2003) hanno studiato le variazioni del contenuto idrico relativo nelle regioni di assorbimento dell'acque centrate a 975, 1200 e 1750 nm ed hanno proposto due nuovi indici che operano nelle bande di assorbimento dell'acqua a 975 e 1200 nm:

$$RATIO_{975} = \frac{2\rho_{960-990}}{\rho_{920-940} + \rho_{1090-1100}} \quad (1.49)$$

$$RATIO_{1200} = \frac{2\rho_{1180-1220}}{\rho_{1090-1110} + \rho_{1265-1285}} \quad (1.50)$$

Il *Normalized Difference Infrared Index* (NDII, Hardinsky et al., 1983) è un semplice rapporto che cresce al crescere dello stato idrico della pianta. Esso varia tra -1 ed 1 e viene calcolato con la seguente espressione:

$$NDII = \frac{\rho_{820} - \rho_{1649}}{\rho_{820} + \rho_{1649}} \quad (1.51)$$

Per la vegetazione, l'indice NDII assume comunemente valori nel range 0.02-0.6. Rollin and Milton (1998) hanno definito il *Relative Depth Index* (RDI) che lavora nella banda di assorbimento dell'acqua posta a 1150 nm. La funzionalità di questo indice è quella di normalizzare nell'insieme il livello di riflettanza, il quale è fortemente influenzato dagli altri fattori della canopy. Il Relative Depth Index (RDI) è stato calcolato nel seguente modo:

$$RDI = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{\rho_{\max}} \quad (1.52)$$

dove  $\rho_{\max}$  è il valore di riflettanza a 1116 nm e  $\rho_{\min}$  è il valore minimo di riflettanza nell'intervallo tra i 1120 e i 1250 nm.

Tra gli indici basati sulle variazioni delle caratteristiche biochimiche e morfo-anatomiche della vegetazione, quello più comunemente utilizzato è l'*NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index, Rouse et al., 1974):

$$NDVI = \frac{\rho_{860} - \rho_{640}}{\rho_{860} + \rho_{640}} \quad (1.53)$$

La riflettanza corrispondente alla lunghezza d'onda del rosso,  $\rho_{640}$ , è correlata con l'assorbimento della luce da parte della clorofilla, mentre quella relativa alla lunghezza d'onda dell'infrarosso vicino,  $\rho_{860}$ , è legata alle modificazioni della struttura interna delle foglie. Una specie vegetale in condizioni di stress idrico produce meno clorofilla e quindi riflette maggiormente nel rosso, apparendo clorotica rispetto ad una specie ricca di clorofilla che risulta particolarmente riflettente nella regione del verde, centrata nell'intorno di 500 nm.

L'*NDVI* per la vegetazione assume valori sempre maggiori di zero e, per le piante stressate, risulta minore rispetto a quello ottenibile da piante in condizioni di buono stato idrico.

Gao (1996) ha definito un nuovo indice, il *Normalized Difference Water Index* (NDWI), che si correla molto bene con il contenuto d'acqua:

$$NDWI = \frac{(\rho_{858} - \rho_{1240})}{(\rho_{858} + \rho_{1240})} \quad (1.54)$$

L'assorbimento del contenuto idrico della vegetazione vicino agli 860 nm è trascurabile, mentre vi è un piccolo assorbimento a 1240 nm. Come risultato, *NDWI* è sensibile a cambiamenti di contenuto idrico della vegetazione. Gli effetti di scattering dovuti agli aerosol presenti in atmosfera nella regione tra 860 e 1240 nm sono deboli. In confronto con l'indice *NDVI* è quindi corretto affermare che *NDWI* è ancora meno sensibile agli effetti dell'atmosfera. Quest'ultimo indice varia tra -1 ed 1 e comunemente i valori rilevati rientrano nel range compreso tra 0.1 e 0.4.

## 2. Materiali e Metodi

### 1.2 Descrizione dell'area di studio e caratteristiche agro-ambientali

Le attività sperimentali sono state condotte presso l'azienda agricola "Tenuta Rocchetta" nel territorio di Castelvetro, individuata geograficamente dalle coordinate UTM (EST 310600; NORD 4168500); con un'estensione di circa 30 ha ed un'altitudine media di 123 m s.l.m., l'azienda presenta una morfologia piuttosto pianeggiante.

Si trova all'interno del comprensorio irriguo Garcia-Arancio, gestito dal Consorzio di Bonifica Agrigento 3, su un territorio vocato alla coltivazione dell'olivo. Anche il sito sperimentale rispetta tale vocazione; l'olivo risulta infatti la coltura prevalente, occupando circa il 90% della superficie totale. L'azienda Tenuta Rocchetta è molto interessata alle attività sperimentali, come pure alla divulgazione scientifica dei risultati. In prossimità del sito sperimentale è installata una stazione di monitoraggio dei flussi di vapore acqueo e CO<sub>2</sub> della rete di rilevazione del S.I.A.S. (Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano). In fig. 2.1, su immagine a colori acquisita attraverso Google Earth, sono evidenziati i confini aziendali e i singoli settori irrigui nei quali è suddivisa.



*Figura 2.1 - Localizzazione geografica e delimitazione dell'azienda sperimentale "Tenute Rocchetta"*

La tab. 2.1 riporta alcune caratteristiche (superficie, sesto di impianto) del settore irriguo nel quale è stata condotta la sperimentazione.

*Tabella 2.1 – Caratteristiche del settore irriguo oggetto di studio*

Metodo Irriguo	Goccia superficiale
Superficie [ha]	2.5
Distanza tra piante [m]	5
Distanza tra filari [m]	8
Area del sesto [m <sup>2</sup> ]	40
Diametro area bagnata gocciolatore [m]	1.50
Frazione Bagnata [-]	0.31
Numero erogatori per pianta	4

La porzione di azienda dove sono stati eseguiti i rilievi sperimentali ha una estensione di 2.5 ha ed un numero di piante pari a 625. Per l'irrigazione è utilizzato un impianto microirriguo, costituito da ali erogatrici con gocciolatori on-line, in numero di 4 per pianta con interdistanza di 1 m (due a monte e due a valle), aventi portata nominale di 8 l/h.

La caratterizzazione agro-climatica dell'area di studio è stata condotta utilizzando i dati climatici registrati dalla Stazione n° 302 della rete SIAS, sita in prossimità dell'azienda. La stazione acquisisce, con scansione oraria, la direzione e la velocità del vento a 2 e 10 m, la precipitazione, la radiazione solare, la temperatura media e l'umidità relativa dell'aria.

Una prima e generale caratterizzazione climatica del sito è stata eseguita utilizzando i dati meteorologici relativi alla serie storica 2002-2011.

La fig. 2.2a riporta il climogramma di Peguy che, utilizzando esclusivamente i dati medi mensili di temperatura e precipitazione, riassume sinteticamente le condizioni termo-pluviometriche della località considerata. Un altro diagramma che si presta a caratterizzare l'ambiente in esame è quello ombrotermico di Bagnolus e Gaussens (fig. 2.2b) nel quale viene definito il "periodo secco" quello durante il quale la precipitazione media mensile (P), espressa in mm, risulta non maggiore del doppio della temperatura media mensile (T) espressa in gradi centigradi ( $P < 2T$ ). Tale diagramma si costruisce riportando sull'ordinata di sinistra la precipitazione in scala doppia rispetto alla temperatura rappresentata dall'ordinata di destra; sulle ascisse vengono indicati i mesi dell'anno.

Il periodo secco viene identificato tracciando, a partire dai punti di incrocio tra le due curve, le perpendicolari all'asse temporale. Dall'esame del climogramma di Peguy si evince che il clima è temperato dal mese di settembre al mese di aprile ed è arido da aprile a settembre. Dal diagramma di Bagnolus e Gaussens, invece, si rileva che le precipitazioni medie annue sono concentrate nel periodo autunno-vernino (in particolare nei mesi di dicembre e gennaio) e che la durata del periodo secco è di circa 5 mesi, dalla seconda metà di aprile alla seconda metà di settembre.

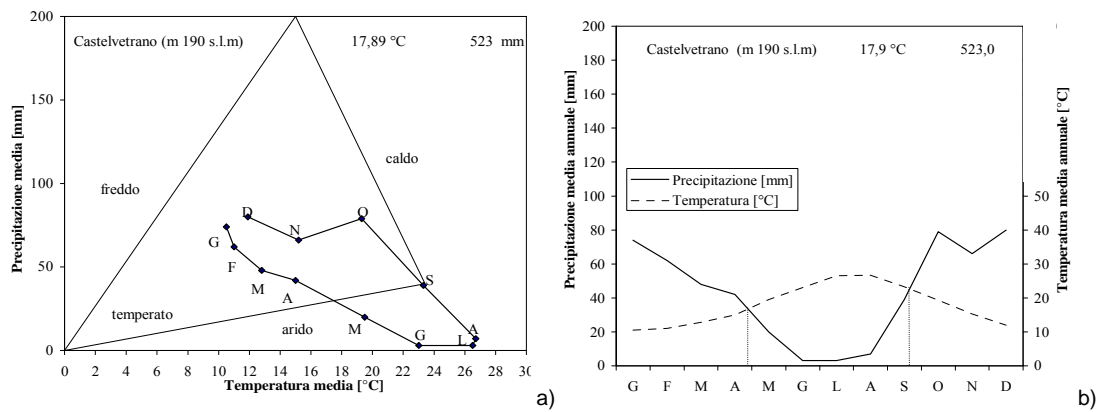


Figura 2.2 - Climogramma di Peguy a) e diagramma ombrotermico di Bagnolus e Gausson b)

La caratterizzazione fisica ed idraulica dei suoli è stata eseguita in precedenza ed ha riguardato quattro strati di suolo posti a 0, 30, 60 e 100 cm dalla superficie (Rallo, 2010). Dall'analisi è risultata una composizione granulometrica media del profilo costituita dal 31.2% di argilla, 18.6% di limo e 50.2% di sabbia, e pertanto il suolo ricade nella classe tessiturale Sabbioso-Argilloso-Franco (USDA). La fig. 2.3a,d sono riportate le curve di ritenzione  $\psi(\theta)$  ottenute in laboratorio sui campioni prelevati alle quattro profondità; in particolare sono riportati i punti ottenuti sperimentalmente e le curve interpolari, rappresentate secondo il modello di van Genuchten, i cui parametri sono indicati in tab. 2.2.

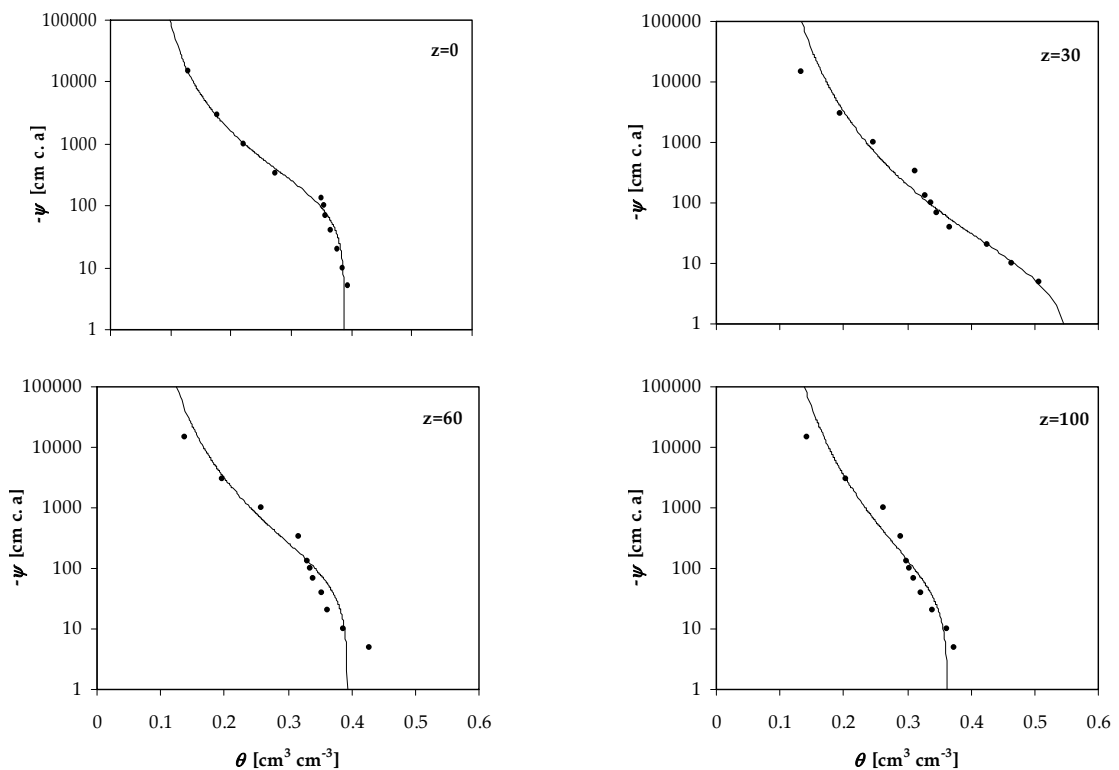


Figura 2.3 - Curve di ritenzione  $\psi(\theta)$  negli strati di suolo investigati (da Rallo, 2010)



La tabella riporta altresì la media geometrica (GM) e il coefficiente di variazione (CV) dei valori di conducibilità idraulica insatura  $K(\psi)$ , corrispondenti ad alcuni valori del potenziale matriciale espressi in cm.

La conoscenza delle proprietà idrauliche del suolo ha permesso di determinare i valori di contenuto idrico corrispondenti alla capacità di campo ed al punto di appassimento per il suolo esaminato.

**Tabella 2.2 – Parametri del modello di van Genuchten e valori della media geometrica, GM, e del coefficiente di variazione (CV) della conducibilità idraulica a tre valori del potenziale matriciale**

Z [cm]	Parametri curva di ritenzione					Conducibilità idraulica [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]					
	$\theta$ [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]	$\theta_s$ [cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]	$\alpha$ [cm <sup>-1</sup> ]	$n$ [-]	$m$ [-]	$K_{-120}$		$K_{-60}$		$K_{-30}$	
						GM	CV	GM	CV	GM	CV
0	0.05	0.39	0.0080	1.3171	0.2407	2.22	28.50	5.88	23.40	19.03	14.30
30	0.05	0.56	0.0147	1.1855	0.1565	8.91	50.00	25.49	60.70	68.06	34.00
60	0.06	0.39	0.0138	1.2264	0.1846	4.82	8.70	11.92	6.60	39.94	48.70
100	0.06	0.36	0.0223	1.1797	0.1523	-	-	-	-	-	-

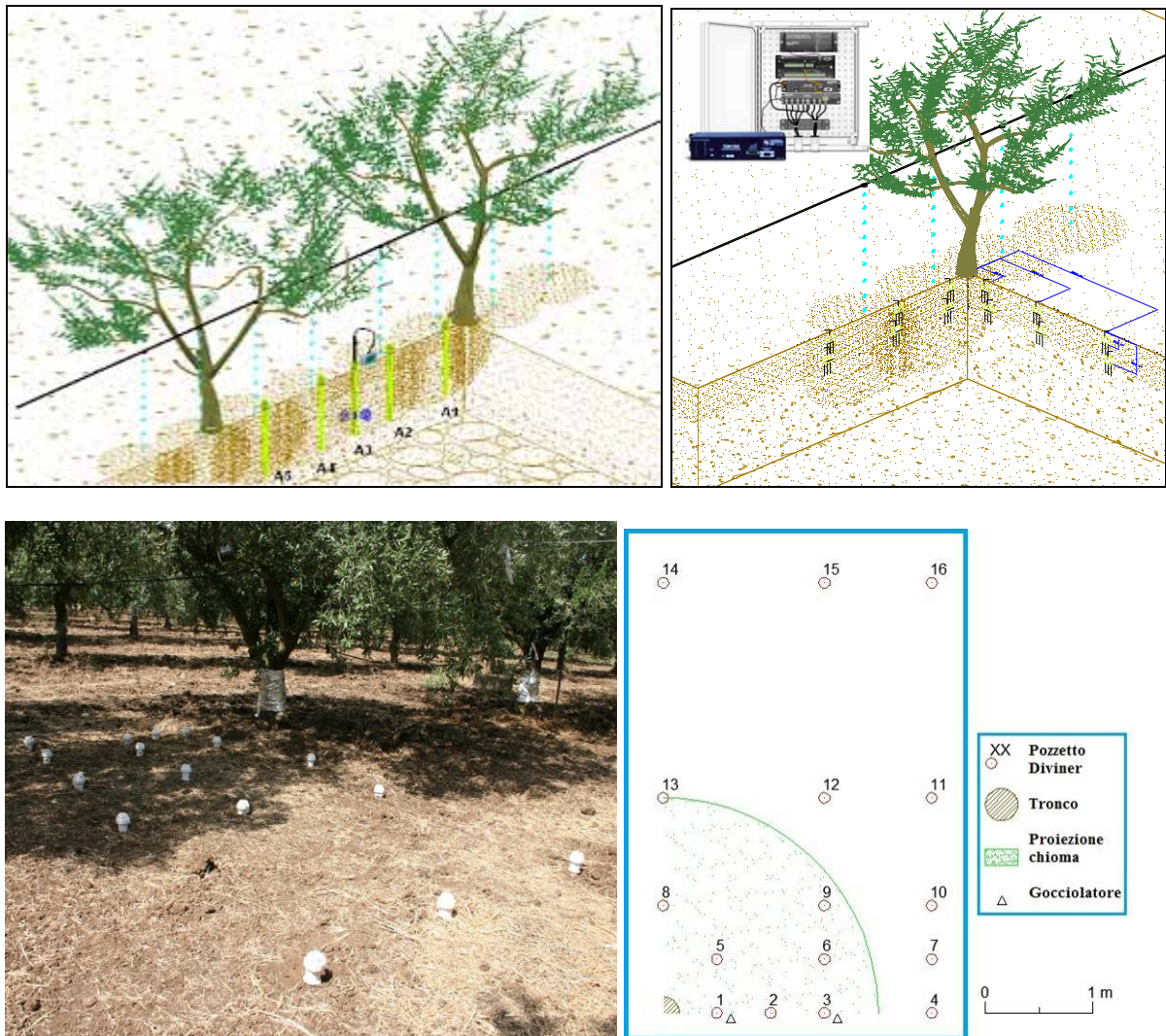
## 2.2 Monitoraggio dello stato idrico del suolo

L'andamento temporale del contenuto idrico del suolo durante il periodo di indagine è stato monitorato utilizzando le tecniche FDR (Frequency Domain Reflectometry) e TDR (Time Domain Reflectometry).

Nel primo caso è stato in particolare utilizzato il sensore Diviner 2000 della Sentek, il cui uso richiede l'installazione di appositi pozzetti di misura nel suolo. Con tale tecnica è stato possibile acquisire misurazioni a diverse profondità in corrispondenza dell'apparato radicale di singole piante, ottenendo così i profili di umidità del suolo. Nel secondo caso è stata utilizzata un'installazione tipo Campbell, che comprende un TDR100 e due multiplexer, collegati ad un datalogger CR1000.

L'installazione è stata realizzata nel 2009 e successivamente implementata. Nel corso del primo anno di acquisizione (2009) sono stati installati n.5 pozzetti di misura FDR e n. 15 sonde TDR, in modo da monitorare la variabilità dei contenuti idrici che si determinano nell'intorno dei punti di erogazione. Al fine di affinare l'indagine e per valutare il volume di suolo umettato con l'irrigazione, nel 2011 sono stati installati, in corrispondenza del quarto di una pianta, 16 pozzetti di misura, distribuiti secondo lo schema di fig. 2.4; in questo modo è

stato possibile disporre di un maggior numero di misure nel volume di suolo esplorato dall'apparato radicale della pianta.

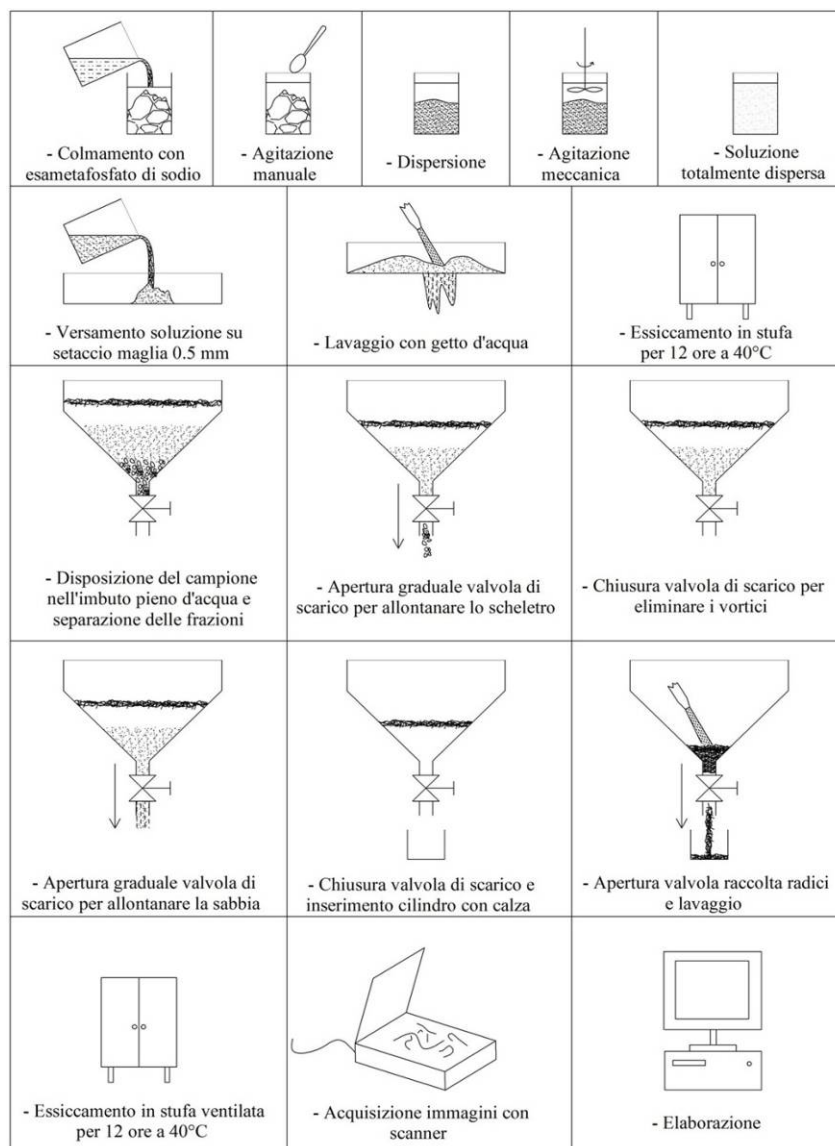


**Figura 2.4 – Schema dell’installazione FDR e TDR per gli anni 2009 e 2010 (in alto) e vista dell’installazione dei pozzetti FDR realizzata nel 2011(in basso)**

### **2.3 Determinazioni dei parametri biofisici e colturali dell’olivo**

Per comprendere la distribuzione spaziale dell’apparato radicale sulla stessa griglia di campionamento dei contenuti idrici, nel corso dell’installazione dei pozzetti di misura sono stati prelevati campioni di suolo, dai quali sono state estratte le radici delle piante. Lungo ciascun profilo sono stati prelevati campioni cilindrici del diametro di 5 cm ed altezza 15 cm. Il campionamento ha interessato pertanto gli strati 0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm, 45-60 cm, 60-75 cm, 75-90 cm e 90-105 cm, per un numero totale di campioni estratti pari a 112. Dopo il prelievo i campioni sono stati conservati alla temperatura di 4°C, per evitare il deterioramento delle radici, fino a quando, attraverso una procedura standard di lavaggio e

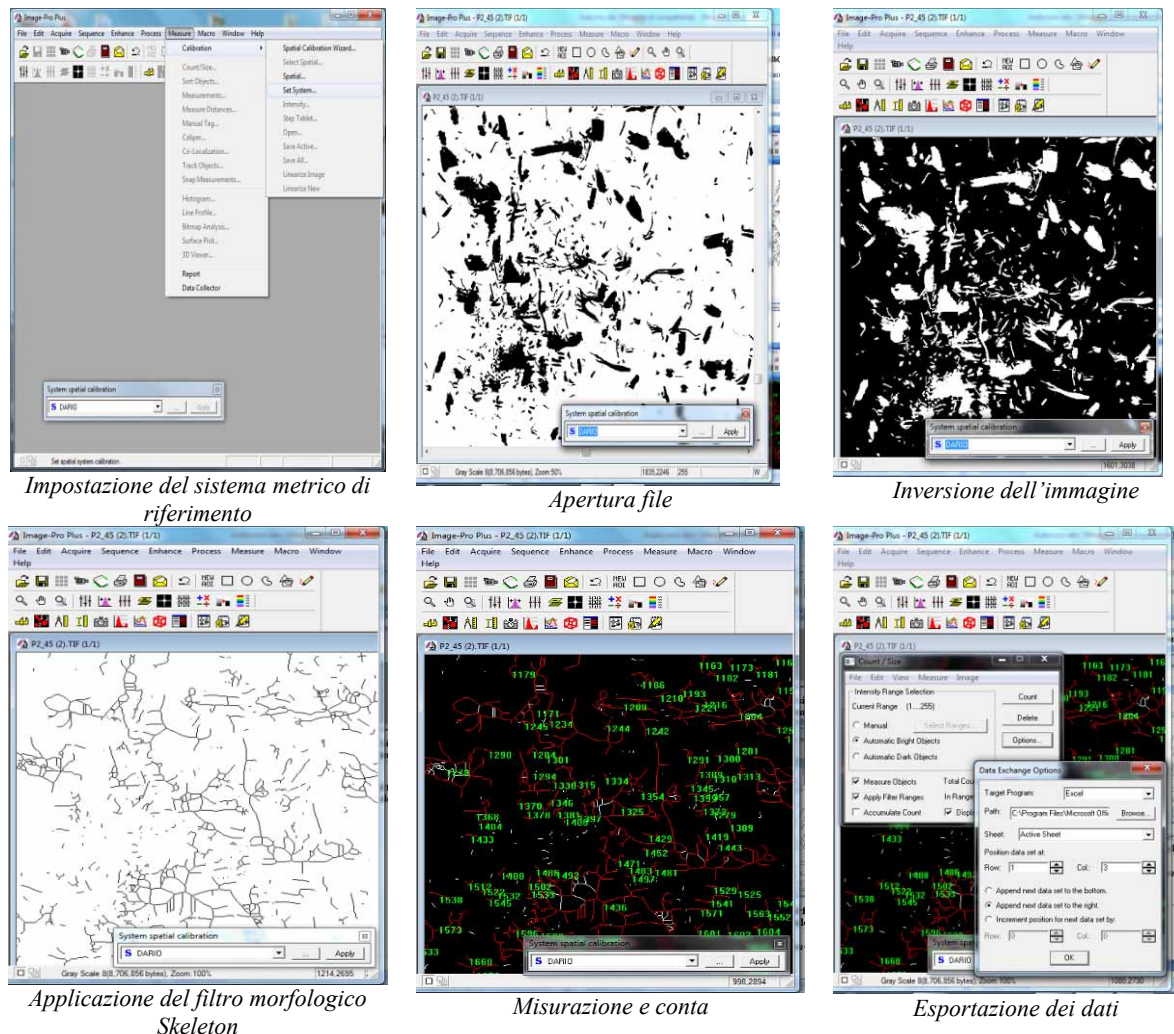
filtrazione, si è proceduto all'estrazione delle radici (Newman, 1966) così come schematicamente indicato in fig 2.5.



**Figura 2.5 Procedura utilizzata per la determinazione della densità radicale**

Ciascun campione è stato riversato all'interno di un setaccio a maglia quadrata di 0.5 mm e lavato con acqua corrente in modo da allontanare le frazioni fini di suolo. La parte rimanente sullo staccio è stata sottoposta a essiccazione in stufa a ventilazione forzata ad una temperatura di 40°C per 12 ore. Il campione, costituito da radici scheletro e sabbia, è stato infine sottoposto a un processo di "floating" in acqua in modo da separare le radici (parte galleggiante) dalla parte più pesante (suolo e scheletro). Le radici campionate sono state quindi essiccate in stufa a ventilazione forzata a una temperatura di 40°C per ulteriori 12 ore e poste su uno scanner, in modo da acquisire le relative immagini digitali. Le immagini acquisite sono state elaborate mediante il software Image-Pro Plus 6.0 che ha permesso di

determinare il numero e la lunghezza delle singole radici presenti in ciascun campione. La fig. 2.6 schematizza la procedura seguita per l'analisi delle immagini.



**Figura 2.6 - Procedura utilizzata per l'analisi dell'immagine delle radici selezionate su singoli campioni di suolo con il software ImagePro-Plus**

E' stato inizialmente impostato il sistema metrico di riferimento, mediante l'uso di un righello, la cui immagine è stata acquisita insieme a quella delle radici. L'immagine è stata successivamente modificata al fine di fare apparire le radici in bianco su sfondo nero. L'uso del software ha permesso, attraverso l'applicazione di un filtro morfologico (skeleton), di "scheletrizzare" le radici, in modo da trasformare la superficie di proiezione di ciascuna radice in una linea corrispondente all'asse.

Al fine di verificare l'accuratezza della metodologia, con riferimento alle radici estratte da uno dei campioni di suolo, è stata ripetuta la stessa procedura dieci volte, dopo avere modificato la posizione delle singole radici sul piano dell'immagine.

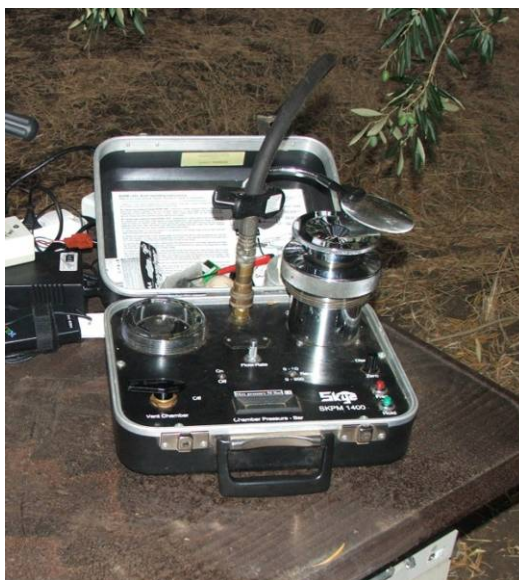
I dati acquisiti hanno permesso di determinare il parametro di densità di lunghezza radicale (RLD), che rappresenta la lunghezza delle radici fini (<2mm) per unità di volume di suolo;

tale parametro è stato ottenuto dividendo la somma delle lunghezze relative ad elementi di lunghezza maggiore a 2 mm per il volume di suolo campionato.

#### ***2.4 Monitoraggio dello stato idrico della pianta e dei flussi evapotraspirativi***

Il monitoraggio dello stato idrico della pianta è stato effettuato attraverso l'ausilio di indicatori eco-fisiologici quali il potenziale idrico xilematico, il potenziale idrico dell'asse ed i flussi traspirativi. Ancora, l'informazione spettrale acquisita sia a livello di foglia che di canopy ha permesso di valutare le performances di alcuni indici sintetici nella stima indiretta e speditiva dello stato idrico della pianta.

La fig. 2.7 mostra la camera pressiométrica di Scholander utilizzata per la misura dei potenziali idrici xilematici degli organi vegetali esaminati.



***Figura 2.7 - Camera di Scholander per la misura dei potenziali idrici della pianta***

Sono stati in particolare utilizzati rametti di un anno per la misura del potenziale xilematico e rametti di un anno, insacchettati, per la misura del potenziale dell'asse. Al momento della misura, la pressione interna alla camera, sommata alla componente di turgore (cioè la pressione esercitata dalle pareti verso l'interno della cellula vegetale) del potenziale totale, determina la fuoriuscita della linfa dai fasci xilematici; in tale istante la pressione, letta al manometro (pressione di equilibrio) risulta pari al potenziale dell'acqua all'interno dell'organo (rametto o foglia). L'utilizzo di differente materiale vegetale ha permesso di valutare lo stato idrico della pianta secondo le teorie più accreditate in letteratura. In particolare la misura del potenziale xilematico, quando è effettuata subito prima dell'alba, rappresenta lo stato idrico della pianta in una condizione di equilibrio per l'intero sistema continuo SPA. L'elemento vegetale insacchettato, invece, permette di seguire lo stato idrico

dell'elemento assile più vicino e rappresenta quello più correlato allo stato idrico del suolo; quest'ultima misura è comunque meno influenzata da variazioni repentine delle condizioni ambientali (passaggio di nuvole, raffiche di vento, ecc.), che possono verificarsi durante la giornata.

Il monitoraggio dei potenziali fogliari è stato effettuato nel corso della stagione irrigua 2011 con cadenza settimanale. A livello giornaliero le misure di potenziale sono state effettuate immediatamente prima dell'alba e successivamente, sulle stesse piante, alle ore 10:00 e alle ore 14:00.

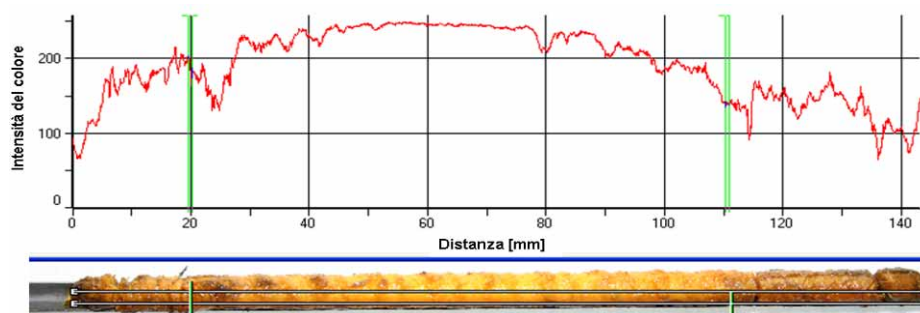
La determinazione dei consumi traspirativi è stata effettuata monitorando i flussi linfatici della pianta attraverso una tecnica termoelettrica (Granier, 1985). Le misure di flusso linfatico, eseguite durante la stagione 2011, hanno permesso una stima reale e diretta della perdita di acqua da parte della piante, senza disturbare le condizioni del microclima fogliare. Nello studio condotto è stato utilizzato il sistema TDP (Thermal Dissipation Probe; Granier, 1985) applicato sul fusto delle piante (fig. 2.8). Al fine di evitare fenomeni di embolia, è stato necessario eseguire l'installazione, con la perforazione del fusto per circa 4 cm, durante le ore notturne in corrispondenza della minima attività traspirativa da parte della pianta. I sensori, costituiti da una coppia di aghi, ciascuno contenente una termocoppia e avvolti con un rivestimento resistivo, sono stati inseriti radialmente nel tronco ad una distanza verticale di circa 10 cm uno dall'altro e protetti dalle escursioni termiche esterne mediante fogli isolanti in termoflex.



**Figura 2.8 – Stazione per la misura dei flussi linfatici e particolare dell’installazione dei sensori**

I sensori sono stati collegati ad un datalogger Campbell CR1000 (Campbell Scientific Inc., Logan, Utah) ed il segnale è stato acquisito ogni 15 minuti in modo che, con l’aggregazione di quattro misure, si potessero ottenere i valori orari del flusso linfatico. La determinazione dell’area conduttiva del tronco (sapwood), necessaria per la stima della traspirazione, è stata eseguita, per via colorimetrica, su carote di legno estratte da più punti del tronco delle piante di olivo investigate, grazie all’ausilio del succhiello di Pressler.

Le carote estratte sono state immerse all’interno di un liquido colorante (metil-arancio) che, reagendo con la linfa mette in risalto la parte conduttiva. La carota di legno colorata è stata quindi acquisita come immagine e, attraverso una procedura di analisi eseguita col software Image-Pro, sono stati costruiti i profili di variazione di intensità di colore. La fig. 2.9 mostra una carota di legno e il diagramma colorimetrico corrispondente, usato per la determinazione degli estremi del sapwood.




**Figura 2.9 – Carota di legno con diagramma colorimetrico usato per la determinazione del sapwood**

La misura dello spessore del sapwood è stata eseguita sulle otto carote estratte in corrispondenza delle sonde installate su 4 piante.

Le misure spettroradiometriche, finalizzate ad acquisire le firme spettrali in diversi istanti della giornata, sia a scala di canopy (top canopy), che sul materiale vegetale (rametto di un anno e foglie mediane) scelto per la misura del potenziale, hanno permesso un ulteriore approfondimento dello stato idrico della pianta. All’interno dell’azienda sono stati identificati due alberi rappresentativi, sui quali è stato eseguito il monitoraggio dei potenziali idrici e delle firme spettrali sia a scala di canopy che di foglia. Le firme spettrali in riflettanza sono state acquisite con uno spettroradiometro da campo ASD FieldSpec Pro (ASD, Analytical Spectral Devices, Inc.) le cui caratteristiche sono riportate in tab. 2.3. Lo spettroradiometro è accoppiato attraverso un cavo a fibra ottica con una sonda a contatto, (plant probe), che permette l’acquisizione dell’informazione spettrale a scala di foglia. La fig. 2.10 riporta il set up sperimentale per la misura della risposta spettrale dell’olivo.

**Tabella 2.3 - Caratteristiche tecniche dello spettroradiometro ASD FieldSpec Pro**

	Spectral Range	350-2500 nm
	Spectral Resolution	3 nm at 700 nm 10 nm at 1400 nm and 2100 nm
	Bandwidth	1.4 nm (350 - 1050nm) 2 nm (1000 - 2500)
	Field of View (FOV)	25°



**Figura 2.10 – Sistema per l’acquisizione, su singole foglie, delle firme spettrali e dei relativi potenziali idrici**

L’acquisizione delle firme spettrali in riflettanza di una determinata superficie, sia essa canopy o singola foglia, ha richiesto una misura della riflettanza di “riferimento”, eseguita su una superficie in resina termoplastica (Spectralon) che riproduce un comportamento ottico di tipo lambertiano, riflettendo in forma diffusa quasi il 100% della radiazione incidente.

Per la misura a scala di foglia, un sistema a pinza ha permesso di intercambiare, molto semplicemente, il background di misura (fig. 2.10). In particolare, con la superficie di riferimento in spectralon è stata normalizzata la condizione luminosa, mentre attraverso il background nero, che assorbe in tutto lo spettro, è stata rilevata la firma spettrale emessa dalla foglia.



Per l'acquisizione delle firme spettrali a scala di canopy, sono stati allestiti due castelletti in prossimità delle piante investigate. Per ogni pianta sono state acquisite 4 firme spettrali puntando lo strumento su punti diversi della canopy. La distanza canopy-sensore è stata stabilita pari a 1,50 m che, con un angolo di vista (FOV) strumentale pari a 25°, ha permesso l'integrazione all'interno di un target di 3500 cm<sup>2</sup>. La prima misura giornaliera a scala di canopy è stata eseguita alle 10:00 del mattino e, con cadenza bioraria, si è proseguito fino alle ore 18:00. A livello di foglia le misure sono state eseguite in parallelo con quelle di potenziale xilematico utilizzando la sonda a contatto collegata, mediante fibra ottica, allo strumento.

Le firme spettrali acquisite con scansione temporale settimanale sono state successivamente filtrate al fine di ridurre il rumore, presente soprattutto alle lunghezze d'onda estreme dello spettro. Il procedimento di filtraggio si è basato sulle funzioni di convoluzione e sulle procedure dei minimi quadrati descritte da Savitzky e Golay (1964); per la scelta del grado del polinomio e della dimensione della finestra di smoothing si è fatto riferimento al lavoro di Rollin e Milton (1998), nel quale sono stati esaminati gli effetti delle diverse convoluzioni sui risultati ottenuti in termini di spostamento delle lunghezze d'onda nei punti di massimo assorbimento, nonché gli effetti dell'ampiezza della finestra di smoothing sulle correlazioni tra il contenuto idrico e sugli indici calcolati sulla base delle firme spettrali grezze e di quelle filtrate attraverso l'uso di un numero di punti di interpolazione pari a 5, 9, e 17.

I dati acquisiti hanno quindi permesso di effettuare un'analisi delle relazioni regressive tra le misure di potenziale idrico xilematico e l'informazione spettrale estratta attraverso indici sintetici quali: il *Floating Water Index (fWI)*, l'*Absorption Index (AI)*, il *Moisture Stress Index (MSI)*, il *RATIO<sub>975</sub>*, il *RATIO<sub>1200</sub>*, il *Normalized Difference Infrared Index (NDII)*, il *Relative Depth Index (RDI)*, il *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* e il *Normalized Difference Water Index (NDWI)*.

La significatività dei coefficienti angolari delle rette di regressione tra gli indici spettrali ed il potenziale idrico, è stata accertata attraverso il test di Fisher. Infine, seguendo alcuni studi presenti in bibliografia (Smith et al., 2002; Eitel et al., 2006), è stata valutata, per gli indici esaminati, la sensibilità alle variazioni dello stato idrico sia a scala di foglia che di canopy. In particolare, sulla base del valore del coefficiente di determinazione,  $R^2$ , un indice spettrale è stato definito non sensibile se  $R^2 \leq 0.2$ , a sensibilità molto bassa se  $0.2 < R^2 \leq 0.3$ , a sensibilità bassa se  $0.3 < R^2 \leq 0.6$ , a sensibilità moderata se  $0.6 < R^2 \leq 0.8$  ed a sensibilità alta se  $R^2 > 0.8$ .

## 2.5 *Analisi statistica per la validazione del modello*

Le performance del modello FAO-56 è stato sulla base del Root Mean Square Error (RMSE), e del Mean Bias Error (MBE), definiti come:

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i^2\right)} \quad (2.1)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_i \quad (2.2)$$

dove  $N$  è il numero di osservazioni e  $d_i$  è la differenza tra il valore simulato e quello misurato. In aggiunta, il test statistico  $t$  di Student, applicato utilizzando l'approccio proposto da Kennedy and Neville (1986), ha permesso di valutare la significatività delle differenze tra i valori simulati e misurati delle variabili considerate, con un livello di significatività  $\alpha$  pari a 0.05:

$$t = \sqrt{\frac{(N-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (2.3)$$

In particolare, le differenze tra i valori simulati e misurati sono state considerate non significative quando il valore di  $t$ , valutato con l'eq. (2.3) è risultato inferiore ad un valore critico,  $t_{crit}$ , ottenuto considerando  $N-1$  gradi di libertà ed  $\alpha = 0.05$ .

### 3. Risultati e Discussione

La sperimentazione condotta ha permesso di ottenere un database di misure relative allo stato idrico del suolo e della pianta, ai flussi traspirativi ed alle proprietà spettrali della vegetazione.

I dati acquisiti nelle campagne di misura condotte nel 2010 e 2011 hanno permesso un approfondimento delle relazioni idriche suolo-pianta, l'analisi di dettaglio dei gradienti di attingimento radicale nell'intorno della pianta e la determinazione del volume di suolo nel quale si concentrano i processi di attingimento idrico radicale.

In particolare, la validazione del modello FAO-56, è stata effettuata utilizzando sia il database di misure acquisite che i dati rilevati nel corso della stagione irrigua 2009.

Le misure sulle proprietà spettrali della vegetazione come pure del potenziale idrico xilematico, hanno infine permesso di sviluppare dei protocolli speditivi per una stima indiretta dello stato idrico della pianta.

#### 3.1 *Analisi della gestione irrigua, sviluppo dell'apparato radicale e dimensionamento del volume di prevalente attingimento*

La gestione dell'irrigazione è avvenuta secondo le scelte effettuate dall'agricoltore che può usufruire dell'acqua alla domanda; la fornitura idrica è eseguita dal Consorzio di Bonifica "Agrigento 3", con durate giornaliere degli adacquamenti non superiori a 12 ore.

L'indagine è stata effettuata utilizzando il database di misure acquisite nel 2011, durante il quale si disponeva di misure dettagliate di contenuti idrici del terreno nell'intorno della pianta; la fig. 3.1 mostra la distribuzione degli adacquamenti e degli eventi di pioggia del periodo compreso tra inizio luglio ed inizio novembre.

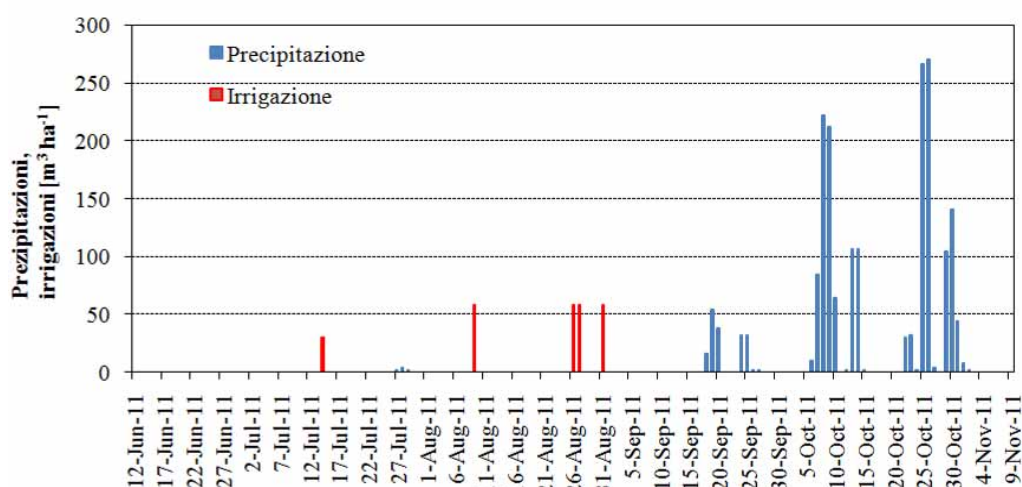


Figura 3.1 – Distribuzione degli adacquamenti e degli eventi di pioggia nel corso della stagione irrigua 2011

L'installazione dei sensori FDR secondo lo schema di fig. 2.6 ha permesso di misurare i contenuti idrici del suolo con elevato dettaglio spazio-temporale. La fig. 3.2a e 3.2b riportano gli udogrammi ottenuti utilizzando il sensore Diviner 2000, rispettivamente per pozzetti di misura P1-P8 e P9-P16.

L'analisi generale degli udogrammi evidenzia, per i pozzetti localizzati in prossimità degli erogatori (fig. 3.2a) incrementi del contenuto idrico in concomitanza degli adacquamenti e rapide diminuzioni legate agli attingimenti radicali, fino alla profondità di 80 cm. Per i pozzetti più distanti dalla fascia umettata invece, l'entità dei picchi degli attingimenti si riduce fino a scomparire completamente per distanze superiori ad un metro dall'asse del filare. L'entità di tali incrementi risulta ovviamente più consistente in corrispondenza dei pozzetti di misura P1, P2 e P3 ubicati in prossimità della superficie direttamente umettata dagli erogatori.

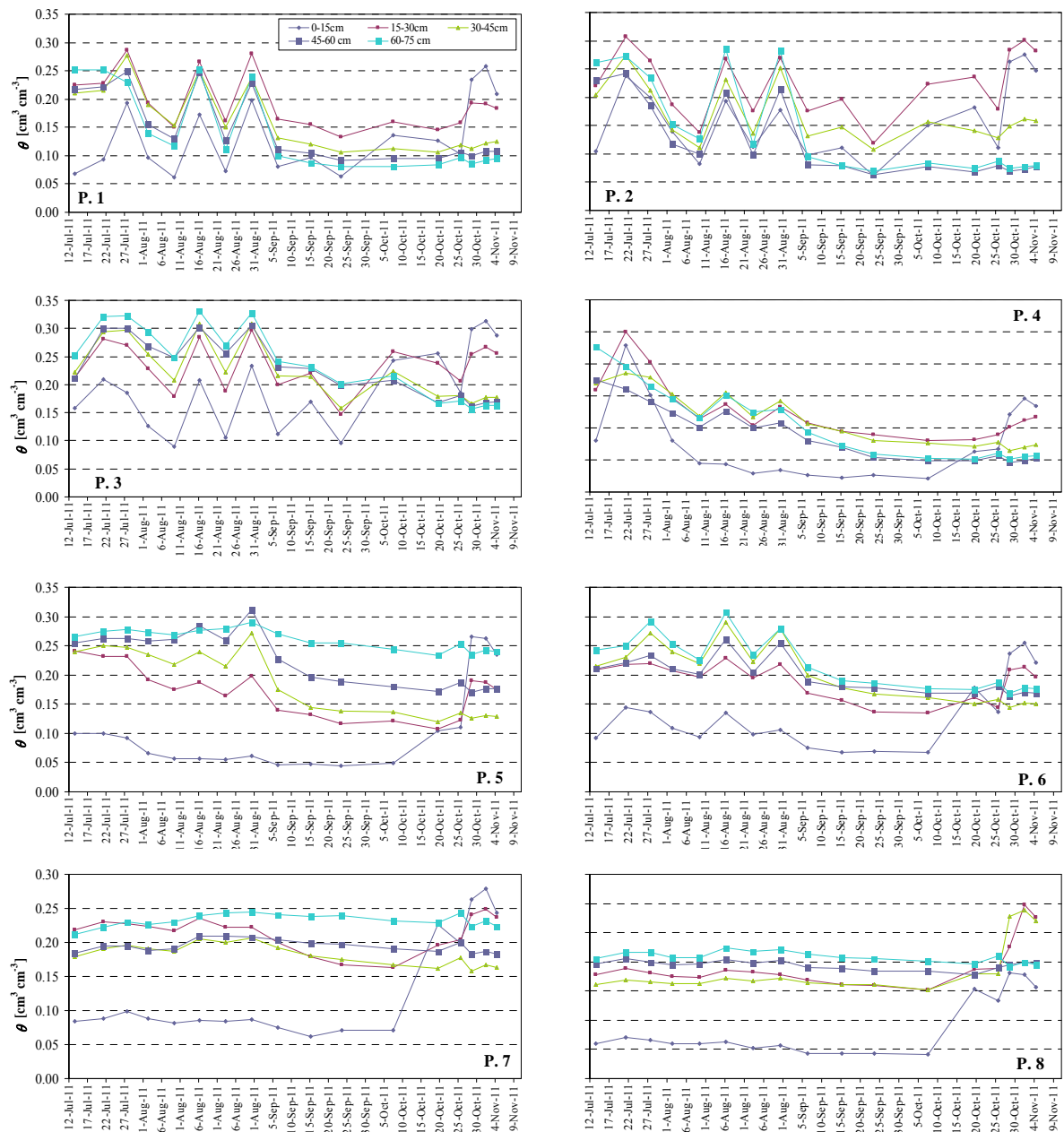
Un aumento più limitato del contenuto idrico si osserva in corrispondenza dei pozzetti P4, P5 e P6 posti nella zona più periferica dell'area bagnata. Per tutti gli altri pozzetti di misura (P8-P16) invece, non si osserva alcun incremento di contenuto idrico in conseguenza dell'irrigazione (fig. 3.2b).

Per i pozzetti di misura P7-P16, risulta interessante altresì osservare che i contenuti idrici misurati alle diverse profondità risultano pressoché costanti nel periodo luglio-agosto e tendono a diminuire nel periodo successivo. Tale circostanza potrebbe essere imputabile all'abilità che ha la pianta di esplorare un volume di suolo più esteso attivando le radici più lontane, come d'altra parte può osservarsi dall'esame degli udogrammi relativi ai pozzetti P1-P6 dall'inizio di settembre.

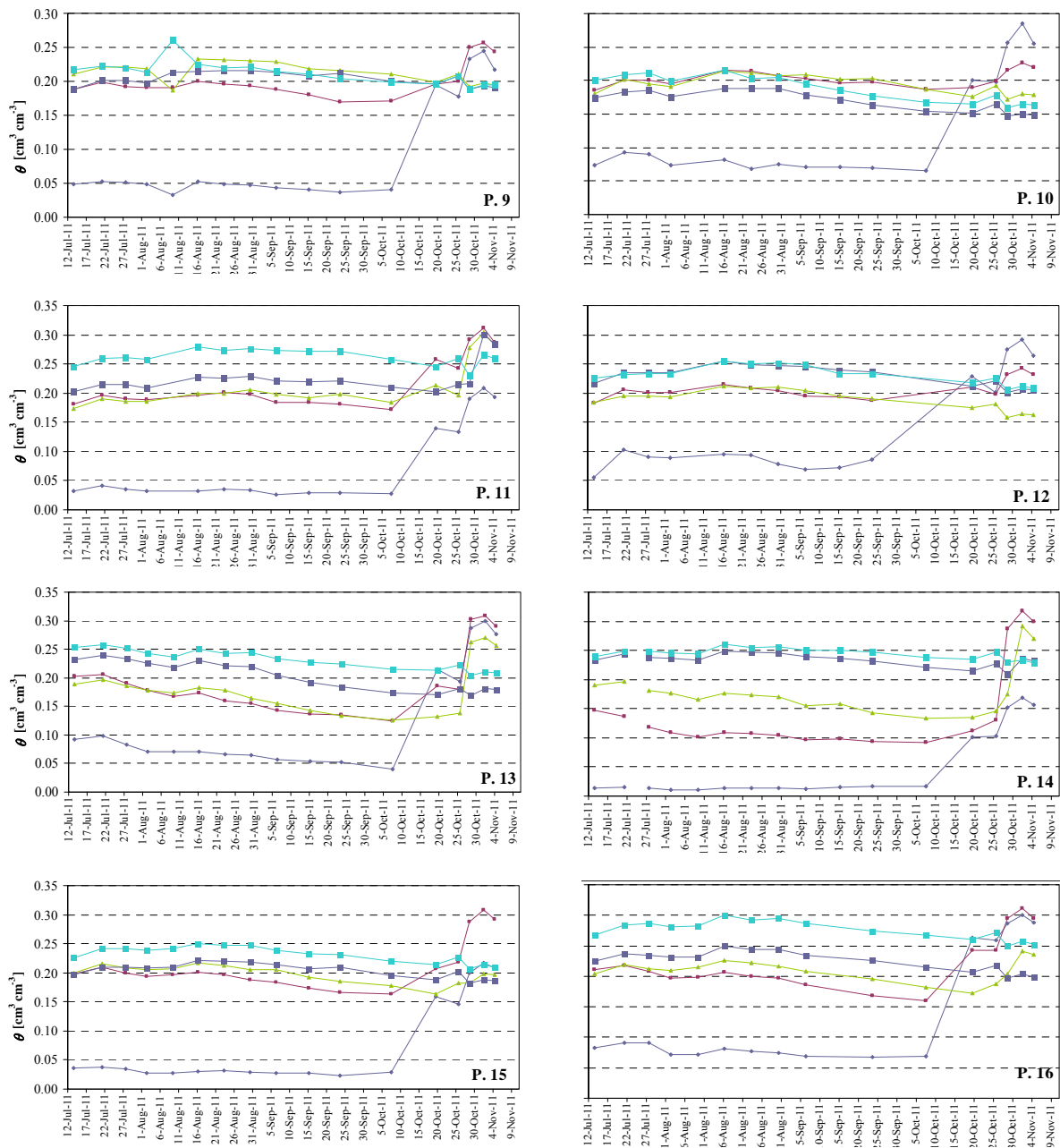
L'interpolazione spaziale dei valori misurati di contenuto idrico ha permesso, per ciascuna profondità considerata, di rappresentare la distribuzione dei contenuti idrici nell'intorno della pianta.

A titolo di esempio, la fig. 3.3a,b riporta in particolare le mappe di contenuto idrico alle diverse profondità nei giorni 16 agosto e 25 agosto, nel corso del periodo di essiccamento successivo all'adacquamento del giorno 9 agosto.

L'esame della figura evidenzia che, in relazione alla modalità di distribuzione dell'acqua irrigua, i valori più elevati di contenuto idrico del suolo si registrano ovviamente lungo i filari, in prossimità della fascia umettata dai gocciolatori. Inoltre, al trascorrere del tempo dopo l'adacquamento, la variabilità dei contenuti idrici tende ad attenuarsi, per fissata profondità, come evidenziato dal confronto tra le fig. 3.3a e 3.3b.



**Figura 3.2a - Udogrammi ottenuti per i pozzetti di misura installati secondo lo schema di fig. 2.4a,b (pozzetti P1-P8)**



**Figura 3.2b - Udogrammi ottenuti per i pozzetti di misura installati secondo lo schema di fig. 2.4 a,b (pozzetti P9-P16)**

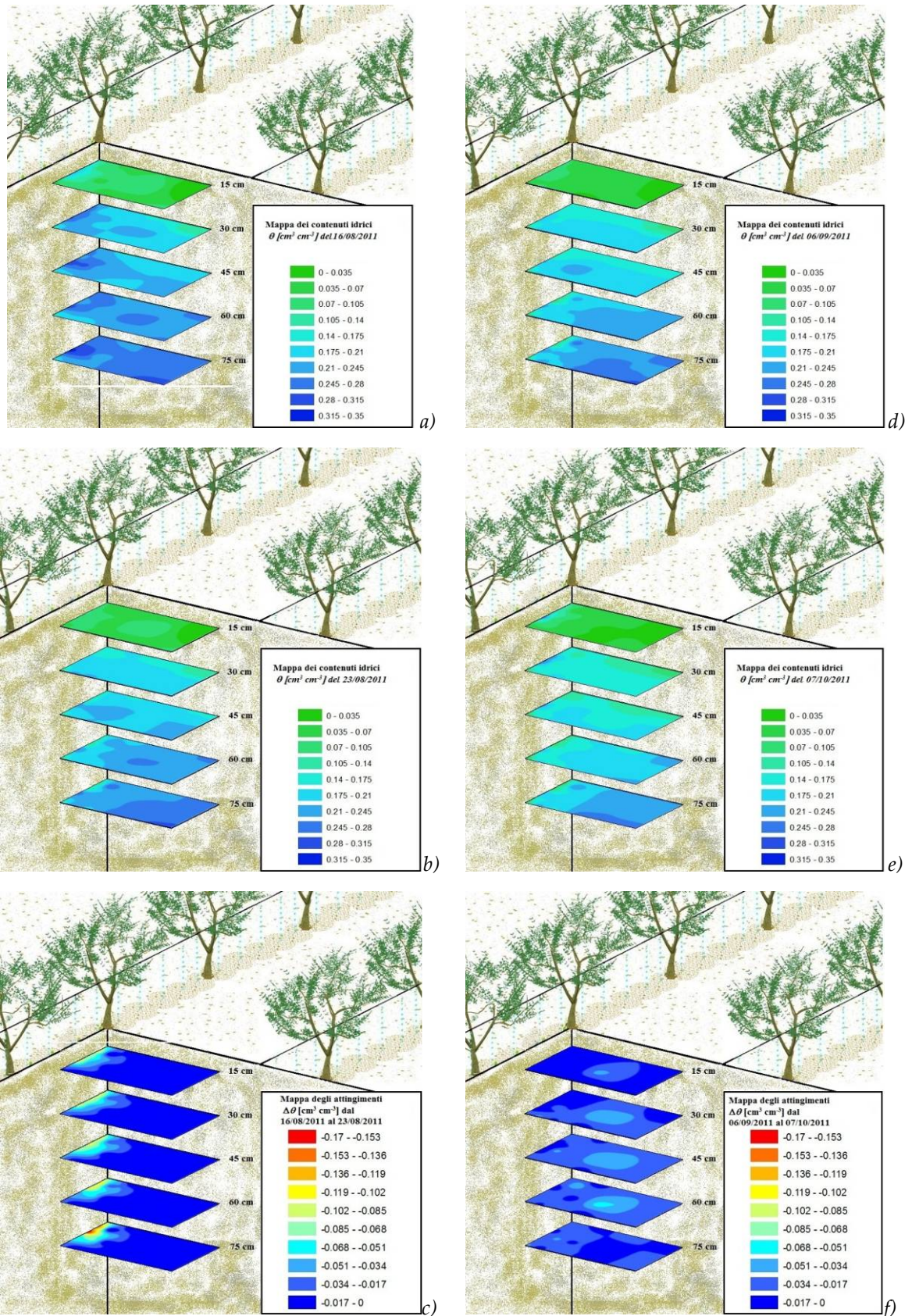


Figura 3.3 – Mappa dei contenuti idrici del suolo acquisiti con la tecnica FDR nelle date a) 16/08/11, b) 25/08/11, d) 06/09/2011, e) 07/10/2011. In basso sono riportate le mappe degli attingimenti ottenuti come differenza di contenuto idrico tra il 16/08/2011 e il 25/08/2011 c) e tra il 06/09/2011 e il 07/10/2011 f)

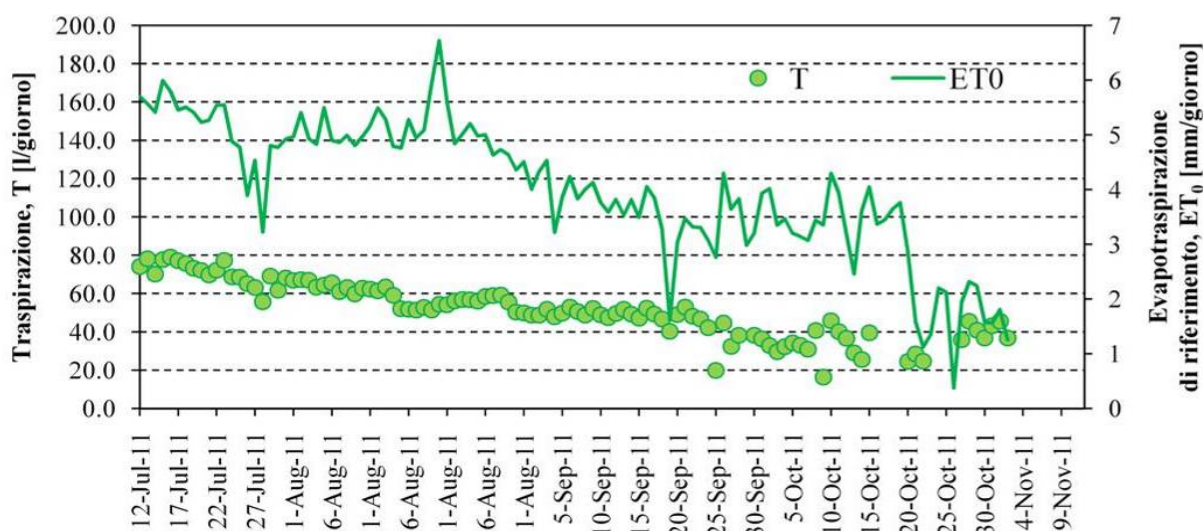
La fig. 3.3c mostra invece, alle diverse profondità considerate, le mappe delle differenze tra i contenuti idrici osservati tra le due date di misura, corrispondenti agli attingimenti radicali del periodo. In relazione ai modesti contenuti idrici dello strato superficiale, sono state ipotizzate trascurabili le perdite per evaporazione dal suolo.

L'osservazione della figura mostra chiaramente come gli attingimenti radicali sono in maggior misura localizzati nel volume di suolo umettato dai gocciolatori, dove risulta presente la massima densità radicale.

Una simile analisi è stata altresì condotta nel corso di un più lungo periodo di essiccamento intercorso tra il 6 settembre e il 7 ottobre, le cui mappe di contenuto idrico del suolo sono riportate in fig. 3.3d,e.

La fig. 3.3f mostra le differenze dei contenuti idrici osservate nell'intervallo tra le due date di misura, nel corso del quale gli attingimenti radicali hanno interessato l'intero volume di suolo esplorato dalle radici, piuttosto che da quello più prossimo alla zona umettata dai gocciolatori.

I sensori di flusso di linfa installati sulla stessa pianta sulla quale sono stati monitorati i contenuti idrici del suolo, hanno permesso di quantificare i flussi traspirativi giornalieri, espressi in termini volumetrici [ $l\ g^{-1}$ ].



**Figura 3.4 – Andamento dei flussi evapotraspirativi della coltura di riferimento e di quelli traspirativi effettivi dell'olivo, per la stagione irrigua 2011**

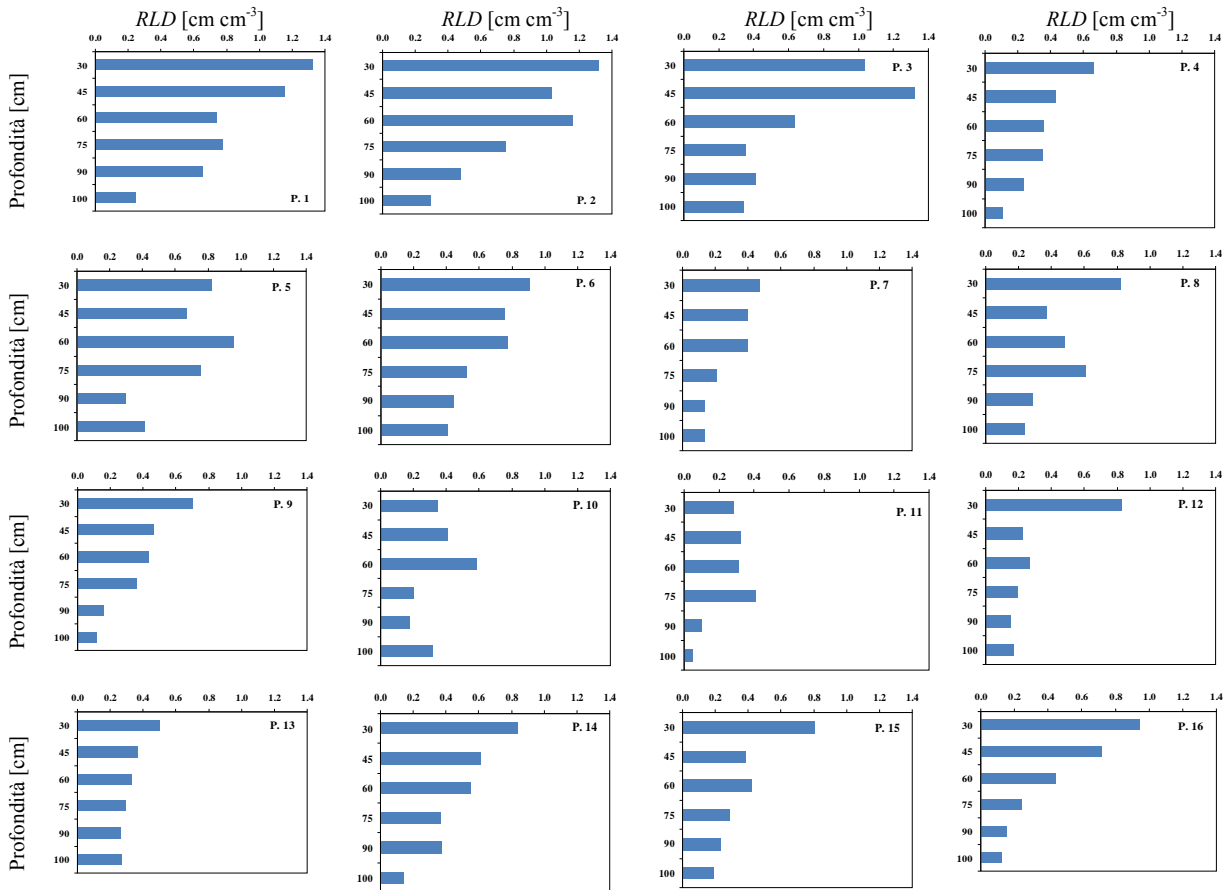
La fig. 3.4 riporta l'andamento dei valori giornalieri di evapotraspirazione della coltura di riferimento ed i valori della traspirazione effettiva misurata in campo.

L'esame della figura evidenzia che i valori di evapotraspirazione della coltura di riferimento sono risultati variabili intorno ad un valore medio di circa  $5.5\ mm\ g^{-1}$  dall'inizio del periodo di osservazione e fino alla seconda decade di agosto, per ridursi nelle tre



settimane successive (26 agosto-10 settembre), fino a raggiungere un valore medio di circa  $3.2 \text{ mm g}^{-1}$ , nel periodo 18 settembre-20 ottobre. D'altra parte, il consumo evapotraspirativo effettivo è risultato tendenzialmente decrescente nel corso di tutto il periodo di indagine, tra gli  $80 \text{ l/g}$  per pianta all'inizio del periodo di osservazione, fino a raggiungere valori inferiori ai  $40 \text{ l/g}$  per pianta ad inizio ottobre, con i valori che mostrano localmente modestissimi incrementi in corrispondenza degli adacquamenti.

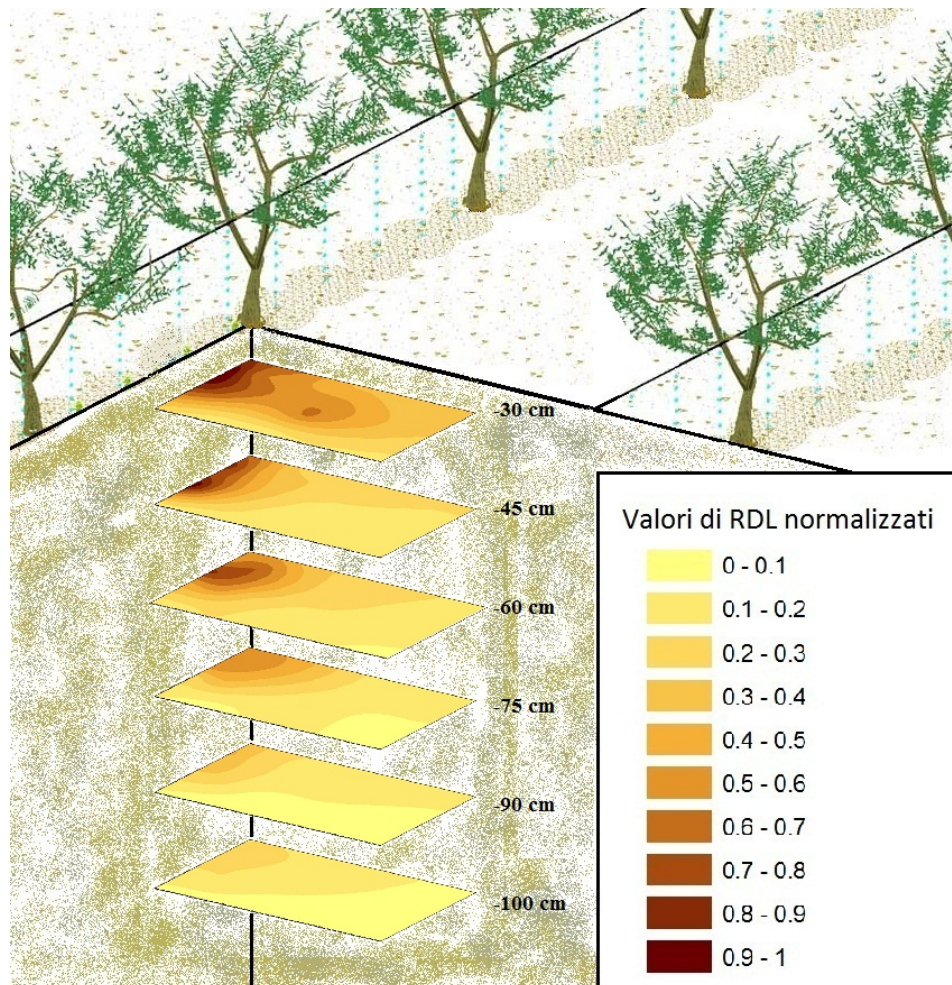
La fig. 3.5 riporta, per i 16 profili di suolo investigati, la distribuzione del parametro che è stato assunto per rappresentare la densità radicale (Root Length Distribution, *RLD*) lungo la direzione verticale. L'analisi degli istogrammi evidenzia come le radici si concentrano negli strati superficiali con valori più alti del parametro *RLD* nei profili più prossimi ai punti di erogazione (P1-P6).



**Figura 3.5 - Distribuzione verticale della densità radicale espressa in termini di *RLD*, per i profili di suolo investigati**

I valori del parametro *RLD* sono stati quindi interpolati spazialmente al fine di ottenere le mappe di distribuzione radicale alle diverse profondità, mostrate nella fig. 3.6. Dall'esame della figura è possibile notare che le aree dove si determinano i valori più elevati della densità radicale si localizzano nella direzione della linea gocciolante e in prossimità dei gocciolatori posti a 50 e 150 cm circa dal tronco della pianta. Inoltre, l'osservazione della mappa del

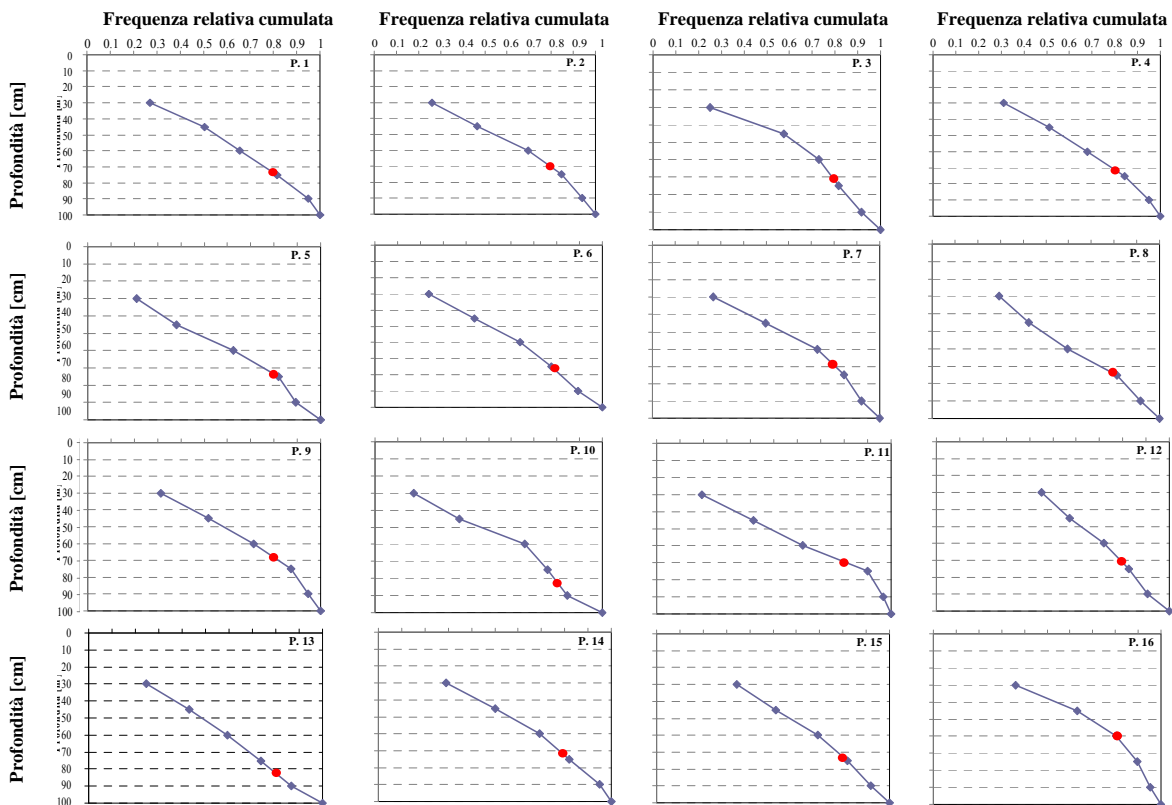
parametro *RLD* in direzione ortogonale a quella della linea gocciolante evidenzia ancora che le radici si spingono ben oltre la proiezione della chioma e fino ad una distanza superiore a circa 250 cm dal tronco della pianta.



**Figura 3.6 - Distribuzione spaziale del parametro *RLD* per le sei profondità investigate**

Analizzando la distribuzione di frequenza relativa del parametro *RLD*, misurata per ciascun pozzetto di misura ad intervalli di 15 cm di profondità, è stato possibile identificare la profondità entro la quale si concentra l'80% delle radici della pianta (*DP80*).

La fig. 3.7 riporta la frequenza relativa cumulata del parametro *RLD*, calcolata per ogni profilo di suolo investigato. Il punto in rosso indica il parametro *DP80*, che rappresenta la profondità entro la quale si concentra l'80% delle radici della pianta. Questo dato viene spesso utilizzato quale limite inferiore del volume di suolo nel quale si considera concentrato l'apparato radicale della pianta.



**Figura 3.7 - Frequenza relativa cumulata della distribuzione verticale del parametro RLD per i profili di suolo investigati**

La distribuzione orizzontale dell'apparato radicale è stata invece analizzata valutando le frequenze relative cumulate dei valori del parametro RLD relativi a tre transetti ortogonali al filare (transetti A, B, C) secondo lo schema di fig. 3.8.



**Figura 3.8 - Rappresentazione schematica dei transetti lungo i quali sono state analizzate le frequenze relative cumulate del parametro RLD**

La fig. 3.9 a-f riporta, per ciascuna profondità e per i tre transetti considerati, i valori della frequenza relativa cumulata al variare della distanza dall'asse del filare. Come si osserva dalla figura, alle minori profondità (30-75 cm) e per prefissata distanza dall'asse del filare, i valori della frequenza relativa cumulata del parametro *RLD* in corrispondenza del transetto più lontano dalla pianta (sez. C) risultano generalmente inferiori rispetto a quelli riscontrati nei transetti A e B. Del tutto confrontabili risultano invece le distribuzioni di frequenza del parametro *RLD* lungo i transetti A e B.

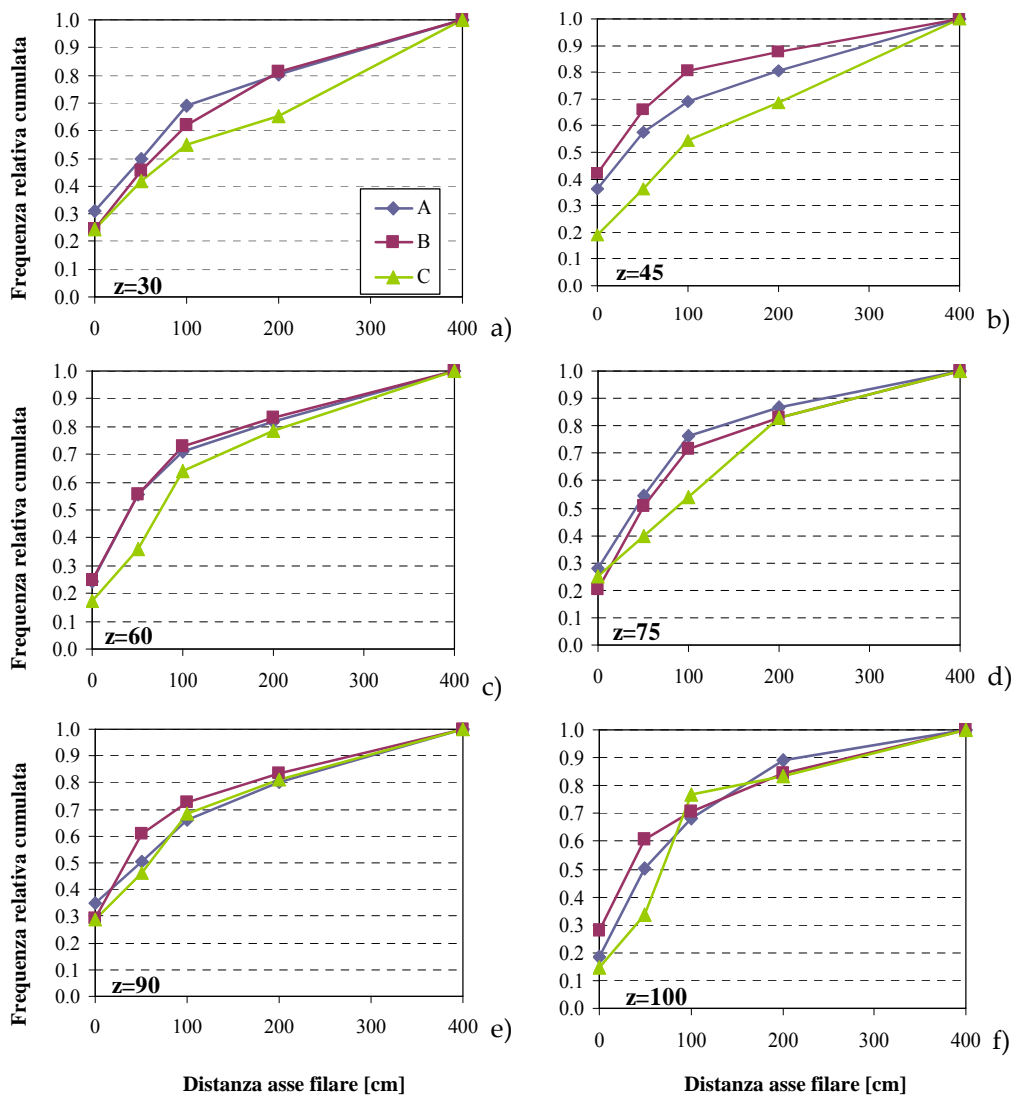
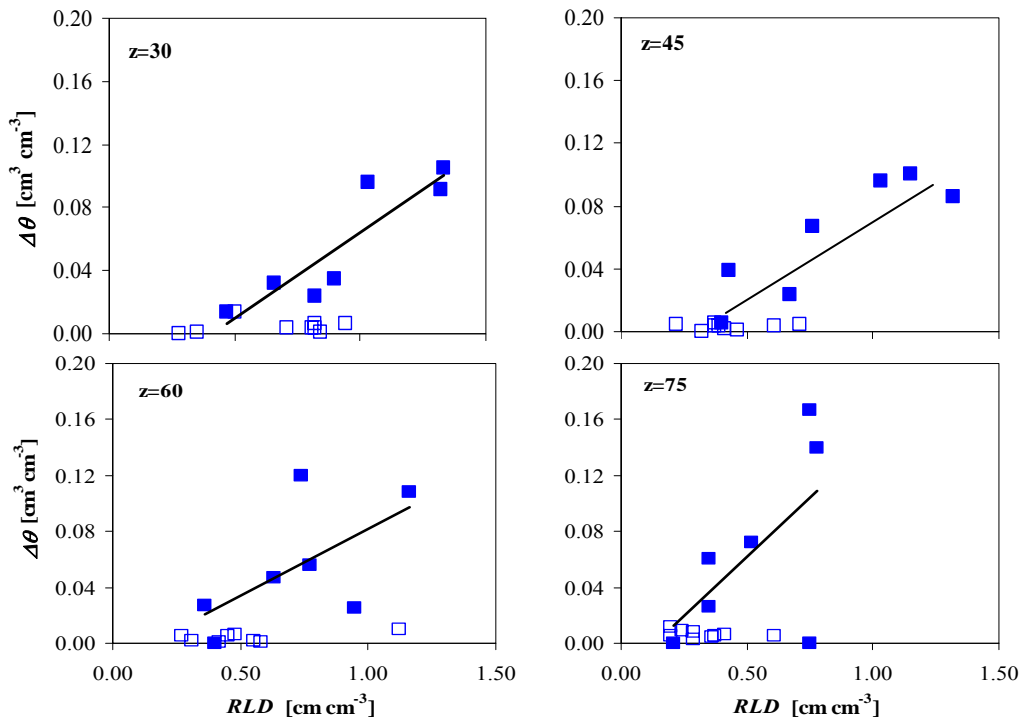


Figura 3.9 a-f – Frequenza cumulata del parametro *RLD* per i tre transetti investigati

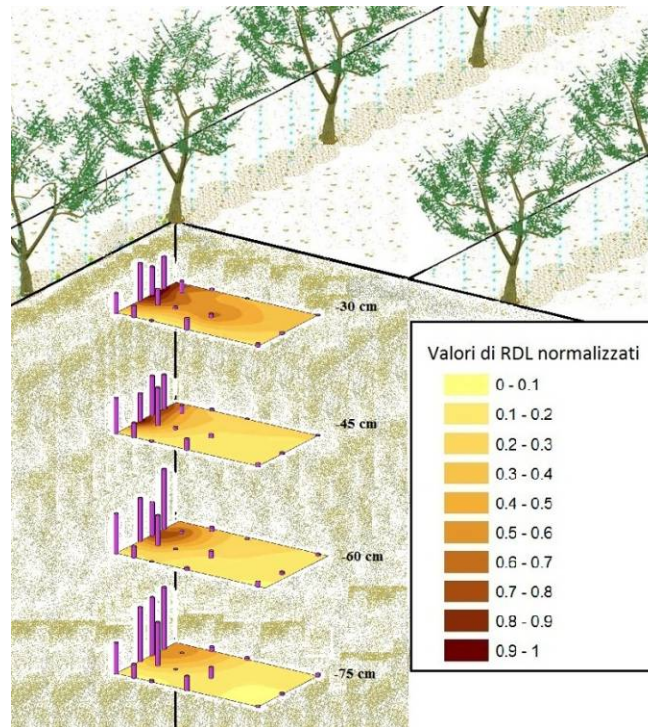
La fig. 3.10 riporta, per ciascuno strato di suolo investigato, le variazioni di contenuto idrico  $\Delta\theta$  nel corso del periodo compreso tra il 16 agosto ed il 23 agosto in funzione del parametro *RLD*. Nel corso del periodo considerato, come peraltro evidenziato nella fig. 3.10, i massimi attingimenti radicali sono stati osservati in corrispondenza dei pozzetti di misura più prossimi alla zona umettata dagli erogatori (P1-P7), dove risulta localizzata la maggiore

densità radicale. Per tali pozzetti è possibile riconoscere alle diverse profondità, un trend crescente dei valori di  $\Delta\theta$  al crescere della densità radicale.



**Figura 3.10** – Relazione tra densità radicale ed entità degli attingimenti calcolati come differenza di contenuto idrico tra le due date di rilievo 16/08/11 e 23/08/1. I quadrati pieni si riferiscono ai pozzetti P1-P7, mentre i quadrati vuoti sono relativi ai pozzetti P8-P16

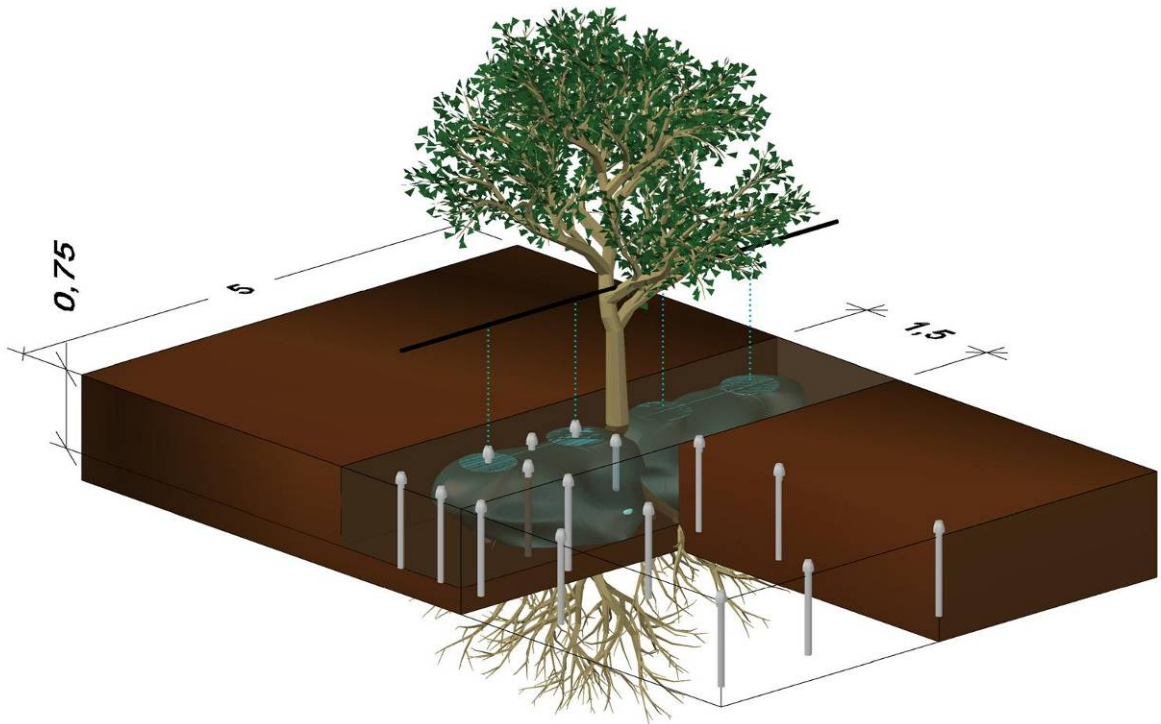
D'altra parte invece i valori di  $\Delta\theta$  relativi ai pozzetti P8-P16, risultano prossimi a zero e non mostrano alcuna variazione al crescere del parametro RLD, come conseguenza della circostanza che, nel periodo considerato, l'attingimento radicale, a distanze superiore a circa 75 cm dal filare, è risultato del tutto trascurabile.



**Figura 3.11 – Mappe di densità radicale con indicazione dei valori del parametro  $\Delta\theta/RLD$**

Sulla base di tali motivazioni è stata quindi assunta pari a 75 cm la distanza limite orizzontale del serbatoio dal quale la pianta attinge l'acqua fornita con l'irrigazione. La fig. 3.11 mostra, unitamente alle mappe del parametro  $RLD$ , i valori puntuali del rapporto  $\Delta\theta/RLD$  calcolato per il periodo 16-23 agosto, per ciascun pozzetto e per le diverse profondità. Tale rapporto rappresenta l'entità del volume idrico estratto dall'unità di lunghezza radicale e indica, in qualche misura, l'abilità delle radici ad attingere l'acqua presente nell'unità di volume di suolo. Come si può osservare dalla figura è evidente che, nel periodo considerato, le radici più attive sono risultate quelle più prossime alla pianta, presenti nel volume di suolo umettato dagli erogatori.

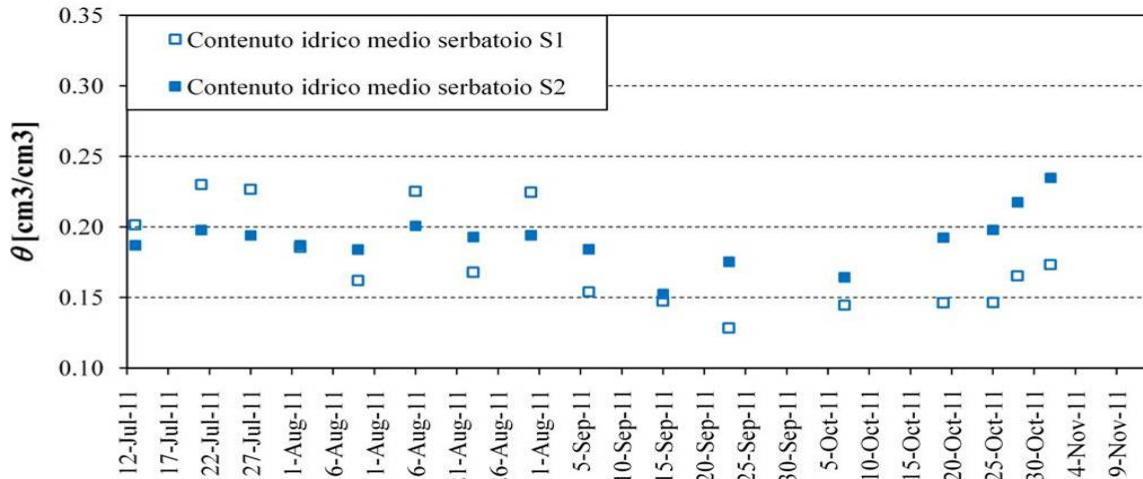
La schematizzazione ipotizzata porta pertanto ad assumere che il serbatoio S1 nel quale si registrano i massimi attingimenti radicali a seguito di un adacquamento risulta di forma parallelepipedica, con larghezza pari a 1.50 m, lunghezza di 5.0 m e profondità pari a 0.75 m, come schematizzato nella fig. 3.12.



**Figura 3.12 - Schematizzazione del volume di suolo esplorato dall'apparato radicale dell'olivo. Il serbatoio S1, è raffigurato come un parallelepipedo il cui volume è generalmente umettato con gli adacquamenti, mentre il serbatoio S2 rappresenta il volume esterno**

La fig. 3.13 mostra l'andamento temporale dei contenuti idrici medi nei serbatoi S1 ed S2 ottenuti nel periodo di indagine.

Con riferimento al serbatoio S1, l'analisi dell'evoluzione temporale del contenuto idrico medio ( $\theta$ ) del terreno evidenzia una notevole variabilità nel corso della stagione irrigua, anche in conseguenza degli adacquamenti; per il serbatoio S2, invece, i valori di  $\theta$  sono risultati pressoché costanti sino alla fine di agosto, e leggermente decrescenti verso la fine della stagione irrigua quando, con le piogge autunnali, tendono nuovamente ad aumentare. In effetti, intorno alla fine di agosto, quando lo stato idrico del serbatoio S1 non consente di soddisfare i consumi traspirativi della pianta, questa attiva le radici localizzate all'interno del serbatoio S2, riducendone di conseguenza il contenuto idrico medio.



**Figura 3.13 - Dinamica dei contenuti idrici medi misurati all'interno del serbatoio 1 (valor medio delle misure relative ai pozzetti P1-P7) ed 2 (valor medio delle misure relative ai pozzetti P8-P16)**

Sulla base dell'indagine condotta, pertanto, è possibile concludere che, per disporre di valori rappresentativi del contenuto idrico del terreno finalizzati alla gestione dell'irrigazione, occorre installare i sensori di misura nel serbatoio S1 nel quale si concentra la maggiore densità radicale e conseguentemente si registra il massimo attingimento idrico durante la stagione irrigua.

Considerato che all'interno del serbatoio, in relazione alle modalità di adacquamento, si verificano elevati gradienti di contenuto idrico del suolo, risulta di interesse identificare la posizione più rappresentativa dove posizionare i sensori di misura rispetto ai punti di erogazione.

A tal fine i valori di contenuto idrico medio all'interno del serbatoio S1 sono stati confrontati, per le diverse date di misura, con i corrispondenti valori medi ottenuti nei pozzetti di misura P1-P7 installati all'interno del serbatoio S1, come riportato in fig. 3.14. Dall'esame della figura risulta evidente che i valori medi di contenuto idrico ottenuti per i pozzetti P1, P2, P5 e P6 risultano abbastanza prossimi a quelli del serbatoio S1, anche se il pozzetto P6, installato a 50 cm dal gocciolatore, nella direzione ortogonale al filare, presenta in assoluto le minori differenze tra i contenuti idrici misurati rispetto ai valori medi riscontrati del serbatoio. D'altra parte se, si considerano le medie dei contenuti idrici misurati in corrispondenza dei pozzetti P2 e P5, posti lungo due direzioni ortogonali a distanza di 50 cm dall'erogatore, il risultato tende a migliorare.



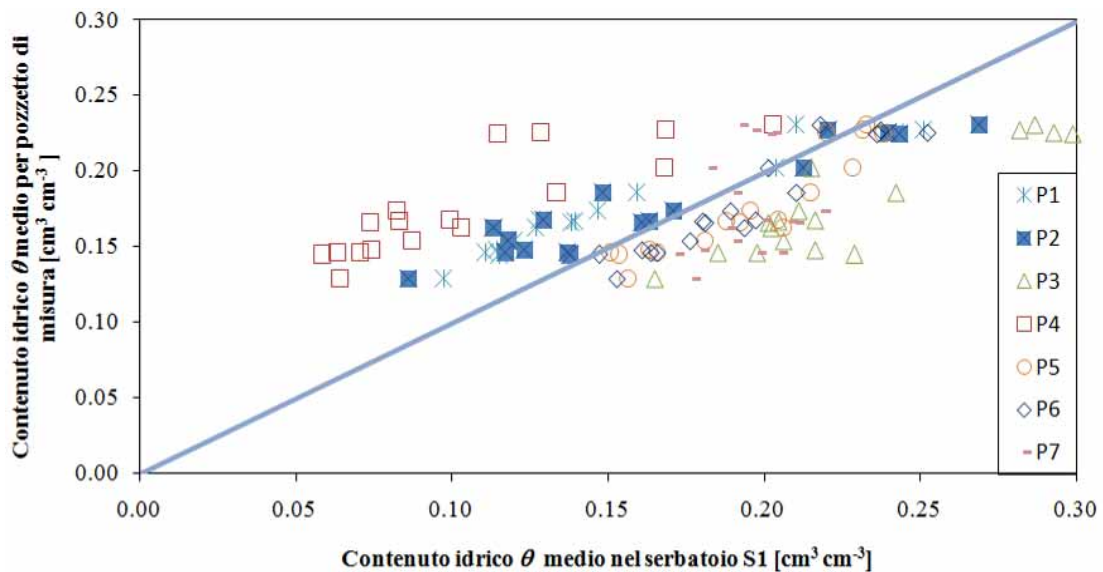


Figura 3.14 – Confronto tra il contenuto idrico medio misurato nei singoli pozzetti e il contenuto idrico medio del serbatoio S1 per tutte le giornate di misura.

### 3.2 Applicazione e validazione del modello di bilancio idrico FAO 56 nella stima dei consumi idrici degli oliveti

Nel presente paragrafo sono descritti i risultati ottenuti dall'applicazione del modello di bilancio agro-idrologico FAO 56, nella sua forma originale (Allen et al., 1998) e in quella modificata per la funzione di stress idrico, così come suggerito da Rallo et al. (2013), con riferimento a colture quali l'olivo, tolleranti a condizioni di stress idrico. I risultati relativi al dimensionamento del serbatoio di prevalente attingimento radicale hanno permesso di considerare, nelle simulazioni, l'effettivo volume nel quale effettuare il monitoraggio della dinamica dei contenuti idrici del suolo.

La validazione del modello è stata effettuata considerando il database di misure acquisite nelle tre stagioni irrigue 2009 (Rallo et al., 2013), 2010 e 2011, contenente sia i flussi traspirativi, rilevati con l'ausilio di sonde sap-flow TDP (Thermal Dissipation Probe), sia i valori di contenuto idrico del suolo misurati con sonde TDR e FDR. Queste ultime hanno in particolare interessato il volume di suolo nel quale si concentra in prevalenza l'attingimento radicale nel corso della stagione irrigua (serbatoio S1).

Le misure di potenziale idrico dell'asse, rilevate a mezzogiorno (Midday Stem Water Potential, *MSWP*) utilizzando la camera di Scholander hanno infine permesso di riconoscere e monitorare, nelle tre stagioni irrigue, lo stato idrico della vegetazione.

La parametrizzazione del modello in termini di costanti idrologiche del terreno (contenuto idrico corrispondente alla capacità di campo ed al punto di appassimento) e di caratteristiche

bio-agronomiche (coefficiente colturale, fraction cover e altezza della pianta) è stata eseguita sulla base delle indicazioni riportate in Rallo et al., 2013, sintetizzate in tab. 3.1. La profondità di attingimento radicale, utilizzata per valutare l'entità del  $TAW$  (eq. 1.5) è stata considerata pari a 0.75 m, così come in precedenza descritto (fig. 3.12).

**Tabella 3.1 – Valori delle variabili usati per le simulazioni condotte usando il modello FAO-56 sia nella forma originale che per quella modificata (da Rallo et al., 2013)**

Variabili	Modello Originale			Modello Modificato		
	2009	2010	2011	2009	2010	2011
Contenuto idrico alla capacità di campo, $\theta_{fc}$ [ $m^3/m^3$ ]	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Contenuto idrico al punto di appassimento, $\theta_{vp}$ [ $m^3/m^3$ ]	0.13	0.13	0.13	n.u.	n.u.	n.u.
Contenuto idrico minimo stagionale, $\theta_{min}$ [ $m^3/m^3$ ]	n.u.	n.u.	n.u.	0.07	0.07	0.07
Acqua disponibile totale, $TAW$ [mm]	150	150	150	n.u.	n.u.	n.u.
Fattore di deplezione, $p$ [%]	65	65	65	n.u.	n.u.	n.u.
Acqua totale evaporabile, $TEW$ [mm]	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5
Acqua facilmente evaporabile, $REW$ [mm]	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
Frazione di suolo umettata dopo l'irrigazione, $f_w$ [-]	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Giorno dell'anno al momento della ripresa vegetative, $J_{plant}$ [-]	105	105	105	105	105	105
Giorno dell'anno all'inizio del periodo di sviluppo, $J_{dev}$ [-]	135	135	135	135	135	135
Giorno dell'anno all'inizio della fase stazionaria, $J_{mid}$ [-]	225	225	225	225	225	225
Giorno dell'anno all'inizio della fase senescente, $J_{late}$ [-]	285	285	285	285	285	285
Giorno dell'anno al momento della raccolta, $J_{harv}$ [-]	375	375	375	375	375	375
Coefficiente colturale basale per la fase iniziale, $K_{cb\ ini}$ [-]	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
Coefficiente colturale basale per la fase stazionaria, $K_{cb\ mid}$ [-]	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Coefficiente colturale basale per la fase senescente, $K_{cb\ end}$ [-]	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Altezza massima della coltura, $H$ [m]	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
Profondità minima radicale, $Z_r$ [m]	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Profondità massima radicale, $Z_r$ [m]	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
Velocità media del vento durante la fase stazionaria, [ $m\ s^{-1}$ ]	0.99	1.34	1.38	0.99	1.3	1.8
Umidità relativa media dell'aria durante fase stazionaria, $RH_{min}$ [%]	52.6	52.2	53.1	52.6	52.2	53.1

n.u.= non usato nelle simulazioni

Nei tre anni considerati, l'inizio delle simulazioni ha seguito una successione di eventi piovosi che hanno permesso di considerare un valore del contenuto idrico iniziale del terreno corrispondente alla capacità di campo (deplezione nulla all'inizio del periodo di simulazione).

La fig. 3.15 mostra l'evoluzione temporale dei valori misurati e simulati del contenuto idrico medio del suolo (fig. 3.15a-c) e della traspirazione potenziale ed effettiva (fig. 3.15d-e) per le tre stagioni esaminate. L'entità degli eventi irrigui e delle precipitazioni sono inoltre mostrati in fig. 3.15g-i.

La tabella 3.2 riporta gli errori connessi ai valori simulati del contenuto idrico del suolo,  $\theta$ , (valor medio nel serbatoio S1) e della traspirazione effettiva ( $T_a$ ), utilizzando il modello sia nella versione originaria che in quella modificata per la funzione di stress, rispetto ai corrispondenti valori misurati. La tabella 3.3 riporta invece i risultati del test  $t$  di Student,

finalizzato a valutare la significatività delle differenze tra i valori misurati e stimati di  $T_a$  e  $\theta$ , ottenuti utilizzando le due versioni, originaria e modificata, del modello.

L'esame di fig. 3.15a-c evidenzia come l'andamento dei valori del contenuto idrico medio del suolo simulato dal modello modificato per la funzione di stress segue in generale quello dei valori misurati; inoltre all'inizio di ciascun periodo di simulazione, caratterizzato da uno stato idrico del suolo non limitante per la traspirazione, gli output del modello originale risultano identici a quelli del modello modificato per la funzione di stress. Nei periodi successivi, quando il contenuto idrico del suolo raggiunge un valore prossimo al 16%, il modello modificato restituisce in output valori di  $\theta$  sempre inferiori a quelli simulati utilizzando la versione originale, e prossimi ai valori misurati in campo.

Sebbene gli errori connessi alle due versioni del modello, espressi in termini di RMSE, sull'intero triennio di osservazione risultano del tutto confrontabili (tab. 3.2), i risultati del test di Student, riportato in tab. 3.3, evidenzia la migliore performance del modello modificato rispetto a quello originale. Infatti, dall'esame della tabella è evidente che le differenze tra i contenuti idrici simulati ed i corrispondenti misurati risultano statisticamente non significative ( $\alpha=0,05$ ) nel caso in cui si utilizza la versione modificata del modello, contrariamente a quanto succede utilizzando la versione originaria.

Tale risultato è una conseguenza dell'aver assunto, nel modello modificato, in luogo del contenuto idrico corrispondente al punto di appassimento, il valore minimo stagionale misurato in campo, circostanza questa che ha permesso di migliorare la performance del modello in termini di attingimenti idrici radicali.

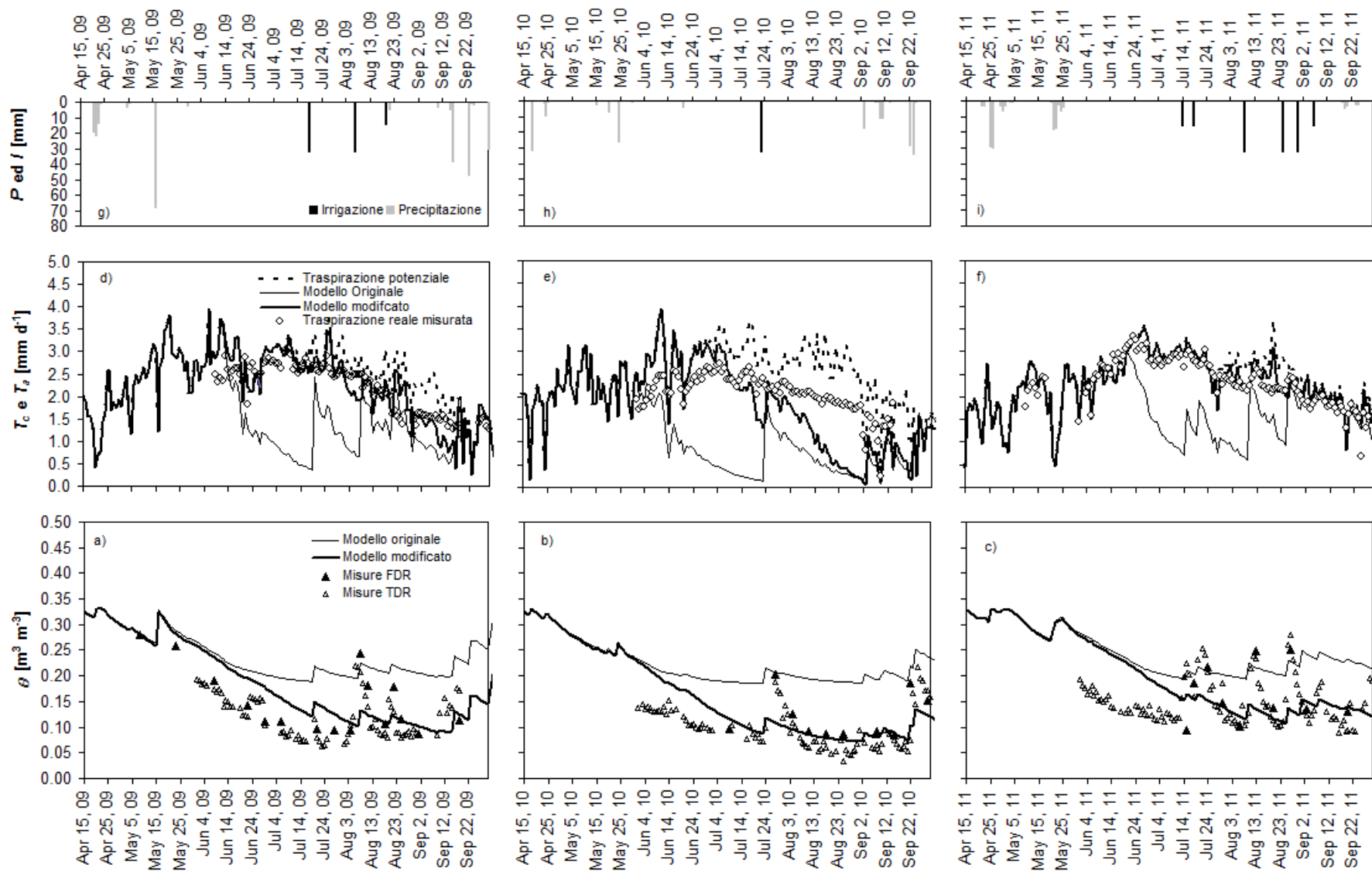


Figura 3.15 - Andamenti temporali dei valori misurati e simulati del contenuto idrico del suolo (a-c) e della traspirazione (d-e) per le tre stagioni irrigue analizzate. La traspirazione potenziale e l'ammontare di eventi irrigui e di precipitazioni sono anche mostrati (g-i)

**Tab. 3.2 – RMSEs e MBEs associati al contenuto idrico del suolo ed alla traspirazione simulati con il modello originale e modificato**

	Anno	Numero di osservazioni (N)			Root Mean Square Error (RMSE)			Mean Bias Error (MBE)		
		Traspirazione effettiva	$\theta$ FDR	$\theta$ TDR	Traspirazione effettiva	$\theta$ FDR	$\theta$ TDR	Traspirazione effettiva	$\theta$ FDR	$\theta$ TDR
		[-]	[-]	[-]	[mm]	[cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]	[cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]	[mm]	[cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]	[cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ]
<b>ORIGINALE</b>	<b>Tutti i dati</b>	381	43	337	1.02	0.06	0.08	0.64	-0.03	-0.04
	<b>2009</b>	104	16	80	1.06	0.05	0.06	0.68	-0.03	-0.04
	<b>2010</b>	125	11	118	1.25	0.04	0.06	0.93	-0.03	-0.05
	<b>2011</b>	152	16	139	0.75	0.08	0.10	0.37	-0.04	-0.03
<b>MODIFICATO</b>	<b>Tutti i dati</b>	381	43	337	0.54	0.06	0.07	-0.14	-0.02	0.00
	<b>2009</b>	104	16	80	0.44	0.04	0.04	-0.08	-0.01	0.01
	<b>2010</b>	125	11	118	0.78	0.05	0.03	-0.37	-0.04	0.00
	<b>2011</b>	152	16	139	0.30	0.07	0.09	0.01	-0.01	-0.01

**Tab. 3.3 – Test t di Student finalizzato a valutare la significatività delle differenze tra i valori misurati e stimati di  $T_a$  e di SWC ottenuti utilizzando il modello modificato e quello originale**

	Anno	Numero di osservazioni (N)			Traspirazione effettiva		$\theta$ FDR		$\theta$ TDR	
		$T_a$	$\theta$ FDR	$\theta$ TDR	Student t	$t_{crit}(a=0.05)$	Student t	$t_{crit}(a=0.05)$	Student t	$t_{crit}(a=0.05)$
<b>ORIGINALE</b>	<b>Tutti i dati</b>	381	43	337	15.57	1.97	4.12	2.02	11.94	1.97
	<b>2009</b>	104	16	80	8.49	1.98	2.64	2.13	11.98	1.99
	<b>2010</b>	125	11	118	12.4	1.98	3.00	2.23	21.38	1.98
	<b>2011</b>	152	16	139	6.91	1.98	2.29	2.13	3.89	1.98
<b>MODIFICATO</b>	<b>Tutti i dati</b>	381	43	337	5.15	1.97	1.92	2.02	0.29	1.97
	<b>2009</b>	104	16	80	1.81	1.98	0.96	2.13	1.72	1.99
	<b>2010</b>	125	11	118	6.02	1.98	3.66	2.23	0.63	1.98
	<b>2011</b>	152	16	139	0.53	1.98	0.36	2.13	0.7	1.98

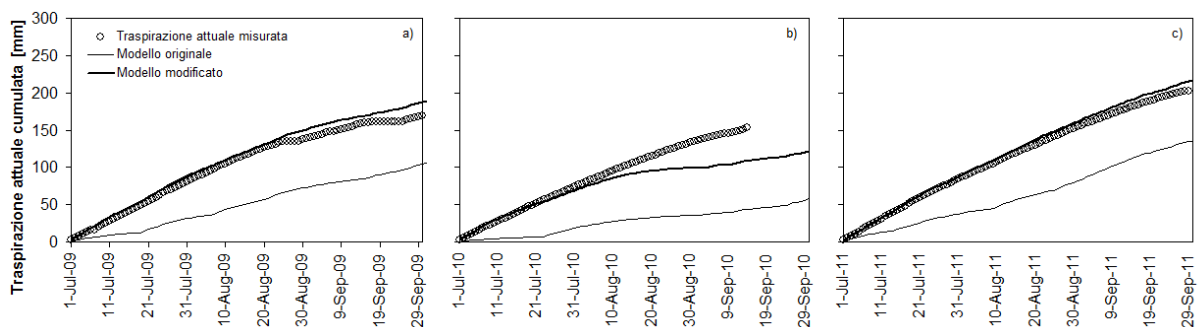
Con riferimento alla traspirazione, il trend stagionale simulato dal modello modificato meglio interpreta la serie dei valori misurati (fig. 3.15 d-f), con un errore medio RMSE pari a 0.54 mm se si considerano tutti e tre i periodi di osservazione. Comunque, rispetto al buon accordo globale tra i valori misurati e simulati di traspirazione effettiva, alcune locali discrepanze sono evidenti nei periodi immediatamente successivi agli interventi irrigui, nei quali i picchi di traspirazione effettiva simulata, connessi ai rapidi incrementi della funzione di deplezione, non sono stati registrati in campo. Questo comportamento è in accordo con quanto osservato da Liu and Luo (2010) and Peng et al. (2007), che hanno sperimentalmente verificato la scarsa performance del modello FAO-56 a doppia componente nel simulare i valori di picco che si manifestano dopo un evento irriguo o una pioggia. Per la stagione 2010, le maggiori differenze osservate (RMSE=0.78) rispetto agli anni 2009 e 2011, possono essere una conseguenza dell'aver trascurato il contributo della capacità della pianta (acqua immagazzinata negli organi assili e nei tessuti fogliari) al processo traspirativo simulato dal modello.

La maggiore traspirazione effettiva misurata in campo rispetto a quella simulata dal modello può essere altresì legata alla circostanza che, dopo un prolungato periodo di deficit idrico del suolo, la pianta può avere attivato porzioni del sistema radicale differenti rispetto a quella interna al serbatoio S1, all'interno del quale sono stati misurati i contenuti idrici del terreno.

Inoltre, la rapida riduzione della traspirazione simulata dal modello nella versione originale è la diretta conseguenza dell'aver assunto una funzione di stress idrico del tipo lineare piuttosto che una più realistica funzione convessa e pertanto utilizzato, nel periodo di simulazione, valori coefficiente  $K_s$  inferiori a quelli effettivi sin dalle fasi iniziali di insorgenza dello stress idrico.

La fig. 3.16a-c mostra, per i tre periodi di simulazione, il confronto tra i valori cumulati degli flussi di traspirativi effettivi misurati con quelli predetti dal modello originale (linea sottile) e modificato (linea marcata). In particolare, nelle stagioni irrigue 2009 e 2011 il modello modificato riproduce, con differenze del tutto trascurabili, i valori di traspirazione effettiva misurata, a differenza del modello originale per il quale è evidente una significativa sottostima dei flussi traspirativi. D'altra parte, la sottostima dei valori cumulati di traspirazione effettiva, osservabile nella stagione 2010, risulta in linea a quanto discusso con riferimento alle performance del modello nella stima dei valori giornalieri di traspirazione effettiva nei periodi conseguenti a prolungati deficit idrici del suolo.

In ogni caso, la migliore performance del modello modificato nella valutazione dei flussi traspirativi è coerente con l'effetto combinato della migliore stima dei contenuti idrici del suolo e di una più adeguata schematizzazione della funzione di stress.



**Figura 3.16 – Confronto simulato-stimato dei valori di traspirazioni cumulati**

Al fine di valutare la potenzialità del modello a predire il coefficiente di stress idrico  $K_s$ , la fig. 3.17a-c mostra le dinamiche temporali della traspirazione relativa misurata ( $T_a/T_p$ ) e dei valori di  $K_s$  simulati utilizzando sia l'originale funzione lineare di stress (linea sottile) che il

modello convesso (eq. 1.12, linea marcata). I potenziali idrici dell'asse misurati a mezzogiorno sono mostrati lungo l'asse delle ordinate secondario, mentre gli apporti idrici sono presentati nella porzione superiore della figura.

Come si può notare entrambi i modelli determinano un rapido incremento del coefficiente di stress negli istanti immediatamente successivi all'irrigazione, analogamente a quanto osservato per la traspirazione effettiva. Tuttavia, anche in questo caso il modello modificato permette di spiegare meglio la dinamica della traspirazione relativa, mostrando una curvatura convessa che meglio riflette la tendenza dei valori di  $K_s$  simulati, consentendo quindi una migliore approssimazione della condizione di stress idrico. Al contrario, il coefficiente di stress simulato dal modello originale generalmente sottostima la traspirazione a causa dell'inadeguata schematizzazione della funzione stress.

Dall'osservazione di fig. 3.17 emerge inoltre che, se da una parte il modello modificato simula valori di  $K_s$  sempre superiori a 0.6, come osservato in campo in termini di traspirazione relativa, dall'altra il modello originale simula valori poco realistici di  $K_s$ , che raggiungono addirittura un minimo pari a circa 0.1. Nella stessa figura si può altresì verificare che i coefficienti di stress idrico seguono la tendenza generale stagionale seguita dai potenziali idrici dell'asse misurati a mezzogiorno (*MSWP*).

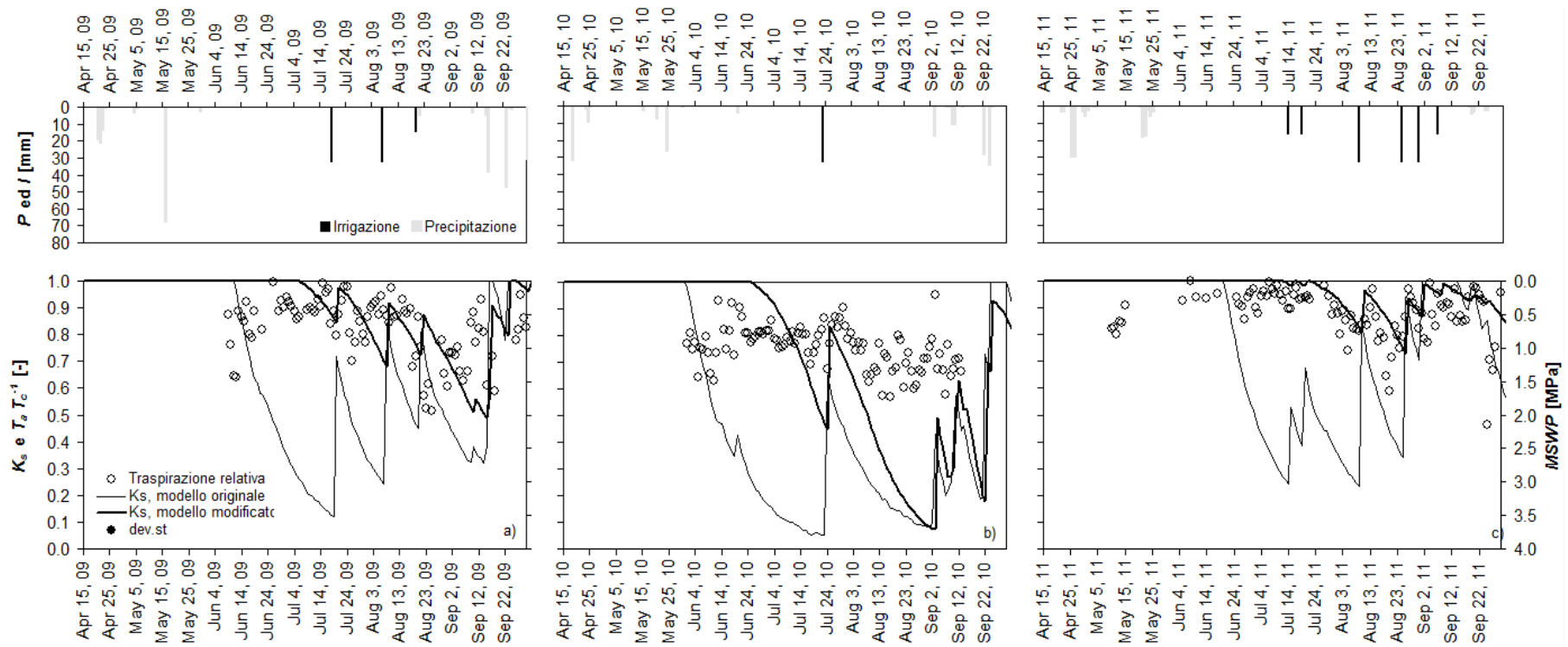
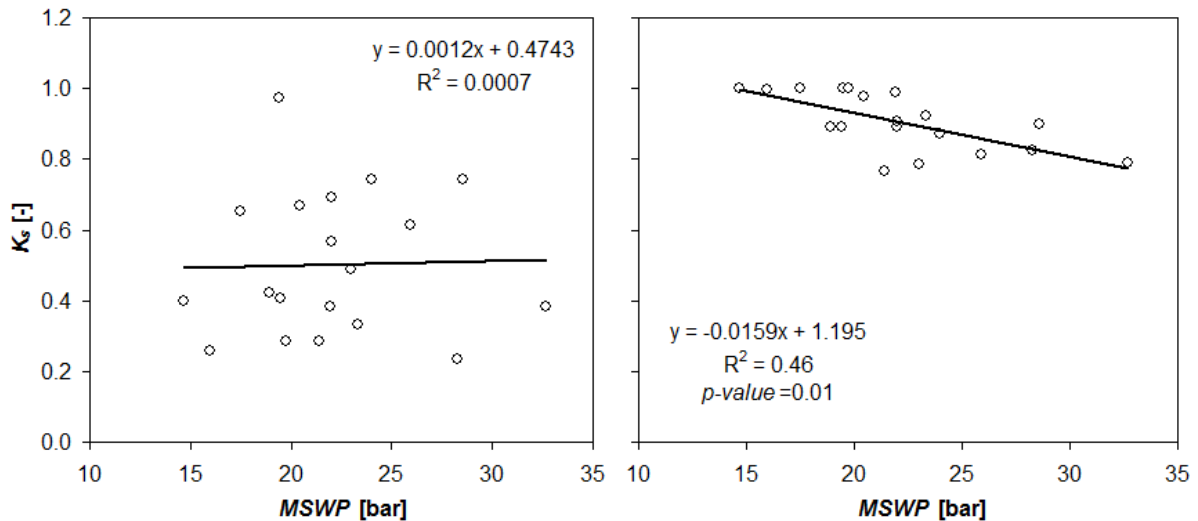


Figura 3.17 – Andamenti temporali dei valori misurati della traspirazione relativa,  $T_a T_c^{-1}$  e simulati del coefficiente di stress  $K_s$ , durante le stagioni irrigue 2009, 2010 e 2011. Sono inoltre riportati i valori di potenziale idrico dell'asse misurato al midday (MSWP) e l'ammontare di eventi irrigui e di precipitazioni sono anche mostrati (d-f)



La fig. 3.18a-b mostra i valori di  $K_s$  simulati in funzione dei corrispondenti  $MSWP$ , rispettivamente ottenuti utilizzando il modello originale (fig. 3.18a) e quello modificato (fig. 3.18b), nonché le rette interpolari. Come si può osservare in figura, i valori di  $K_s$  stimati con il modello originale sono caratterizzati da una variabilità superiore rispetto a quella valutata con la versione modificata per la quale, il più elevato valore di  $R^2$  permette di spiegare la varianza osservata nel dominio dei valori misurati di  $MSWP$ .

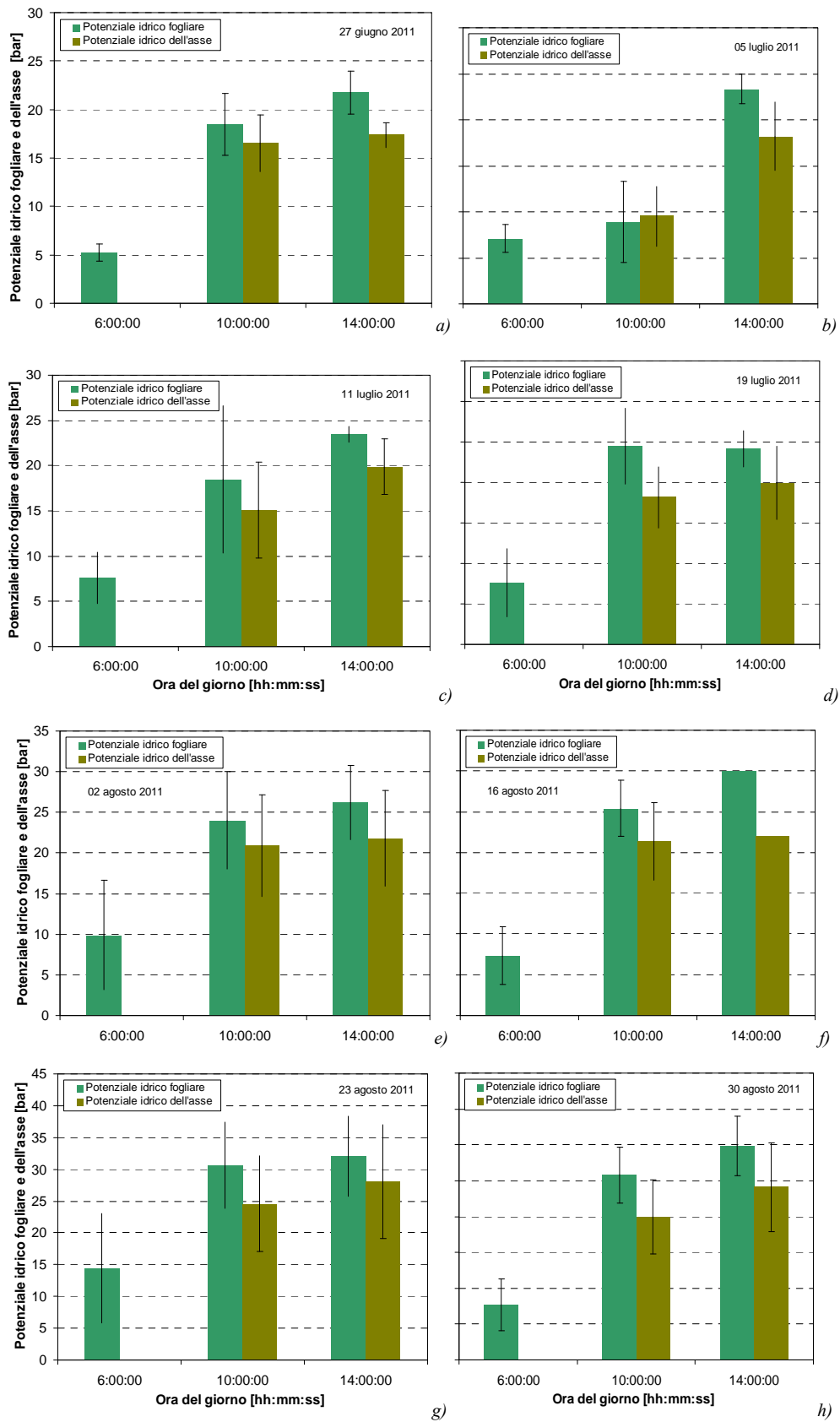


**Figura 3.18 - Relazioni tra il coefficiente di stress idrico,  $K_s$ , ed il potenziale idrico dell'asse misurato a mezzogiorno,  $MSWP$ , nel modello originale a) e modificato b)**

### **3.3 Analisi e valutazione dello stato idrico della pianta attraverso misure spettroradiometriche**

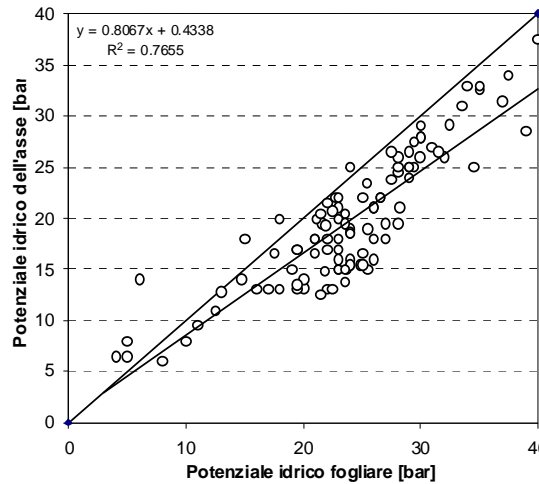
Lo stato idrico delle piante di olivo, come riferito, è stato rilevato anche in termini energetici, attraverso la misura dei potenziali idrici xilematici fogliari e dell'asse. La fig. 3.19a-h mostra i valori di potenziali xilematici fogliari e dell'asse misurati in diverse giornate della stagione irrigua 2011, alle ore 6:00 (predawn), 10:00 e 14:00 (midday).

L'esame della figura evidenzia, come atteso, che i valori di potenziale idrico fogliare nelle ore più calde della giornata sono più elevati rispetto a quelli misurati all'alba. Inoltre, nelle diverse giornate di misura, i potenziali idrici fogliari risultano generalmente più elevati rispetto a quelli dell'asse determinati alla stessa ora, sebbene entrambe le grandezze misurate sono caratterizzate da elevata variabilità.



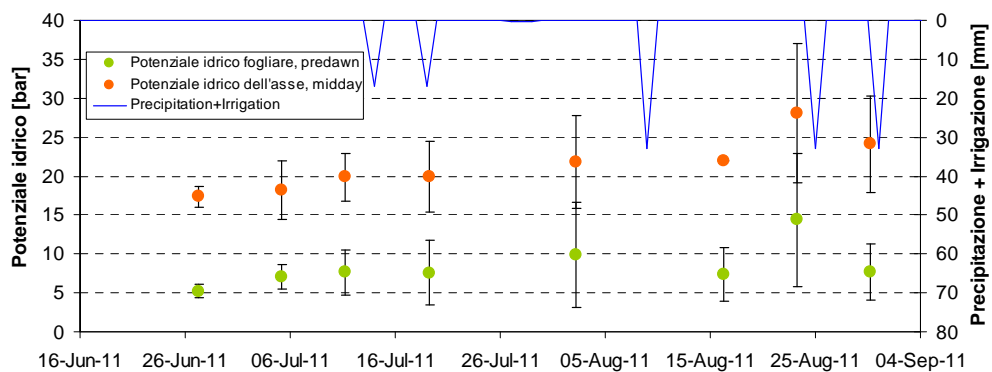
**Fig. 3.19 a-h** – Andamento dei potenziali idrici fogliari e dell'asse misurati alle ore 6:00, 10:00 e 14:00 nel corso di alcune giornate di indagine nel corso della stagione irrigua 2011

La fig. 3.20, che mostra i potenziali idrici dell'asse in funzione dei corrispondenti valori di potenziale xilematico fogliare misurati nelle diverse ore del giorno, evidenzia una forte correlazione tra le due grandezze esaminate e in particolare che i potenziali idrici dell'asse risultano pari mediamente a circa l'80% dei potenziali fogliari.



**Fig. 3.20 – Relazione tra i potenziali idrici xilematici dell'asse e quelli fogliari osservati**

La fig. 3.21 riporta, per la stagione di indagine, l'andamento temporale dei valori assoluti dei potenziali idrici misurati su cinque piante prima dell'alba (predawn) e a mezzogiorno su rametti insacchettati (midday stem). La figura evidenzia che tanto i potenziali idrici predawn che midday risultano crescenti nel periodo dal 27 giugno al 10 luglio. Inoltre, gli adacquamenti di metà luglio e metà agosto hanno determinato un rallentamento nel precedente trend di crescita dei potenziali idrici, sia fogliari che dell'asse. Nel periodo successivo alla prima decade di luglio le piante si trovano verosimilmente in una condizione di incipiente stress idrico, atteso che i valori dei due potenziali xilematici risultano di poco più elevati delle soglie di stress idrico suggerite in letteratura, pari rispettivamente a 5 bar per il potenziale idrico fogliare predawn ed a circa 20 bar per il potenziale idrico dell'asse misurato a midday.



**Fig. 3.21 – Andamento temporale dei potenziali idrici dell'asse (midday) e di quelli misurati prima dell'alba (predawn). Sono inoltre indicate le altezze giornaliere di irrigazione e precipitazione**

Le misure spettroradiometriche, finalizzate ad acquisire le firme spettrali in diversi istanti della giornata, sia a scala di canopy (top canopy), che sul materiale vegetale (rametto di un anno e foglie mediane) scelto per la misura del potenziale, hanno permesso di identificare un metodo indiretto speditivo per la valutazione dello stato idrico della pianta. All'interno dell'azienda sono stati identificati due alberi rappresentativi sui quali è stato eseguito il monitoraggio dei potenziali idrici e delle contestuali firme spettrali sia a scala di foglia che di canopy.

È stata quindi effettuata un'analisi delle relazioni regressive tra le misure di potenziale idrico xilematico e l'informazione spettrale estratta considerando alcuni indici sintetici quali il *Floating Water Index (fWI)*, l'*Absorption Index (AI)*, il *Moisture Stress Index (MSI)*, il *RATIO<sub>975</sub>*, il *RATIO<sub>1200</sub>*, il *Normalized Difference Infrared Index (NDII)*, il *Relative Depth Index (RDI)*, il *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* e il *Normalized Difference Water Index (NDWI)*.

A scala di singola foglia la tabella 3.4 riporta, con riferimento alle misure effettuate alle diverse ore del giorno, l'analisi delle correlazioni ottenute tra i citati indici e lo stato idrico della pianta, espresso in termini di potenziale idrico xilematico fogliare.

**Tabella 3.4 - Analisi delle correlazioni a scala di foglia tra i valori degli indici spettrali e del potenziale xilematico fogliare misurato nelle diverse ore del giorno. Il livello di sensibilità è espresso secondo le indicazioni di Smith et al., (2002) ed Eitel et al., (2006).**

Indice Spettrale	Coeff. Angolare	Intercetta	R <sup>2</sup>	Signif. F	N	Sensibilità dell'indice
<i>fWI</i>	1458.9	-1370.7	0.43	<0.001	24	bassa
<i>AI</i>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	24	non sensibile
<i>SRWI</i>	-446.8	541.3	0.47	<0.001	24	bassa
<i>MSI</i>	310.0	-130.3	0.66	<0.001	24	moderata
<i>RATIO<sub>975</sub></i>	1125.7	-1063.8	0.17	<0.05	24	non sensibile
<i>RATIO<sub>1200</sub></i>	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	24	non sensibile
<i>RDI</i>	-9.3	108.7	0.66	<0.001	24	moderata
<i>NDII</i>	-368.3	131.3	0.66	<0.001	24	moderata
<i>NDVI</i>	242.2	-199.7	0.20	0.0087	24	non sensibile
<i>NDWI</i>	-945.1	93.2	0.46	<0.001	24	bassa

L'esame della tabella evidenzia che, ad eccezione degli indici diretti quali l'*AI* ed il *RATIO<sub>1200</sub>*, che non riescono a spiegare la variabilità dello stato idrico della pianta, gli altri indici considerati sono generalmente correlati con i potenziali xilematici, sebbene con valori del coefficiente di correlazione (R<sup>2</sup>) non sempre elevato. In particolare, indici quali l'*MSI*, l'*RDI* e l'*NDII*, calcolati considerando le lunghezze d'onda relative al medio e corto

infrarosso risultano moderatamente sensibili a spiegare la variabilità dello stato idrico della pianta misurato in campo, con un livello di significatività minore di 0.001.

Limitando l'analisi alle sole coppie di valori riferite ai cardinali giornalieri (predawn e midday), i cui risultati sono mostrati in tabella 3.5, si osserva un aumento del coefficiente di correlazione, e quindi un generale miglioramento della sensibilità ad interpretare il trend dei potenziali xilematici.

**Tabella 3.5 - Analisi di regressione a scala di foglia tra indici spettrali e potenziale xilematico misurato all'alba e al midday**

Indice Spettrale	Coeff.		R <sup>2</sup>	Signif. F	N	Sensibilità dell'indice
	Angolare	Intercetta				
<i>fWI</i>	1405.1	-1320.9	0.44	<0.001	16	bassa
<i>AI</i>	n.s	n.s	n.s	n.s	16	non sensibile
<i>SRWI</i>	-551.7	661.3	0.79	<0.001	16	moderata
<i>MSI</i>	335.0	-143.4	0.83	<0.001	16	alta
<i>RATIO975</i>	n.s	n.s	n.s	n.s	16	non sensibile
<i>RATIO1200</i>	1390.6	-1246.6	0.51	<0.001	16	bassa
<i>RDI</i>	-10.9	122.8	0.81	<0.001	16	alta
<i>NDII</i>	-398.0	139.4	0.82	<0.001	16	alta
<i>NDVI</i>	n.s	n.s	n.s	n.s	16	non sensibile
<i>NDWI</i>	-1041.8	99.0	0.63	<0.001	16	moderata

Gli indici diretti che tengono conto della banda di assorbimento a 975 nm, ovvero il floating Water Index, *fWI*, e l'Absorption Index, *AI*, sono risultati non sensibili per entrambe le analisi condotte. Tale risultato può essere spiegato sulla base delle considerazioni di Peñuelas et al. (1993), i quali hanno evidenziato come nella banda di assorbimento centrata intorno a 970 nm, in corrispondenza della quale si manifestano cambiamenti strutturali quali la perdita di elasticità delle pareti cellulari, l'indice presenta accentuate variazioni soltanto a seguito di significative differenze di contenuto idrico fogliare.

Con riferimento all'indice vegetazionale *NDVI*, il risultato ottenuto può essere invece spiegato tenendo conto della limitata condizione di stress raggiunta in campo, che non ha permesso ampie modificazioni strutturali e quantitative della clorofilla, tali da consentire l'esplorazione di un ampio dominio di misura.

La fig. 3.22 mostra le coppie di valori sperimentali indice spettro radiometrico, potenziale fogliare e le relative relazioni interpolari ottenute considerando l'intero database di misure o soltanto i cardinali. L'esame delle relazioni ottenute considerando l'intero campione mostra come i valori di R<sup>2</sup> risultano generalmente inferiori rispetto a quelli ottenuti considerando i soli cardinali. La maggiore dispersione osservata nel primo caso è certamente conseguente alla variabilità delle condizioni ambientali corrispondenti ai diversi istanti di misura, che ha influenzato tanto le firme spettrali, quanto i valori di potenziale xilematico.

Un miglioramento della stima dei diversi indici esaminati si consegue pertanto quando si considerano esclusivamente le misure effettuate all'alba e al midday.

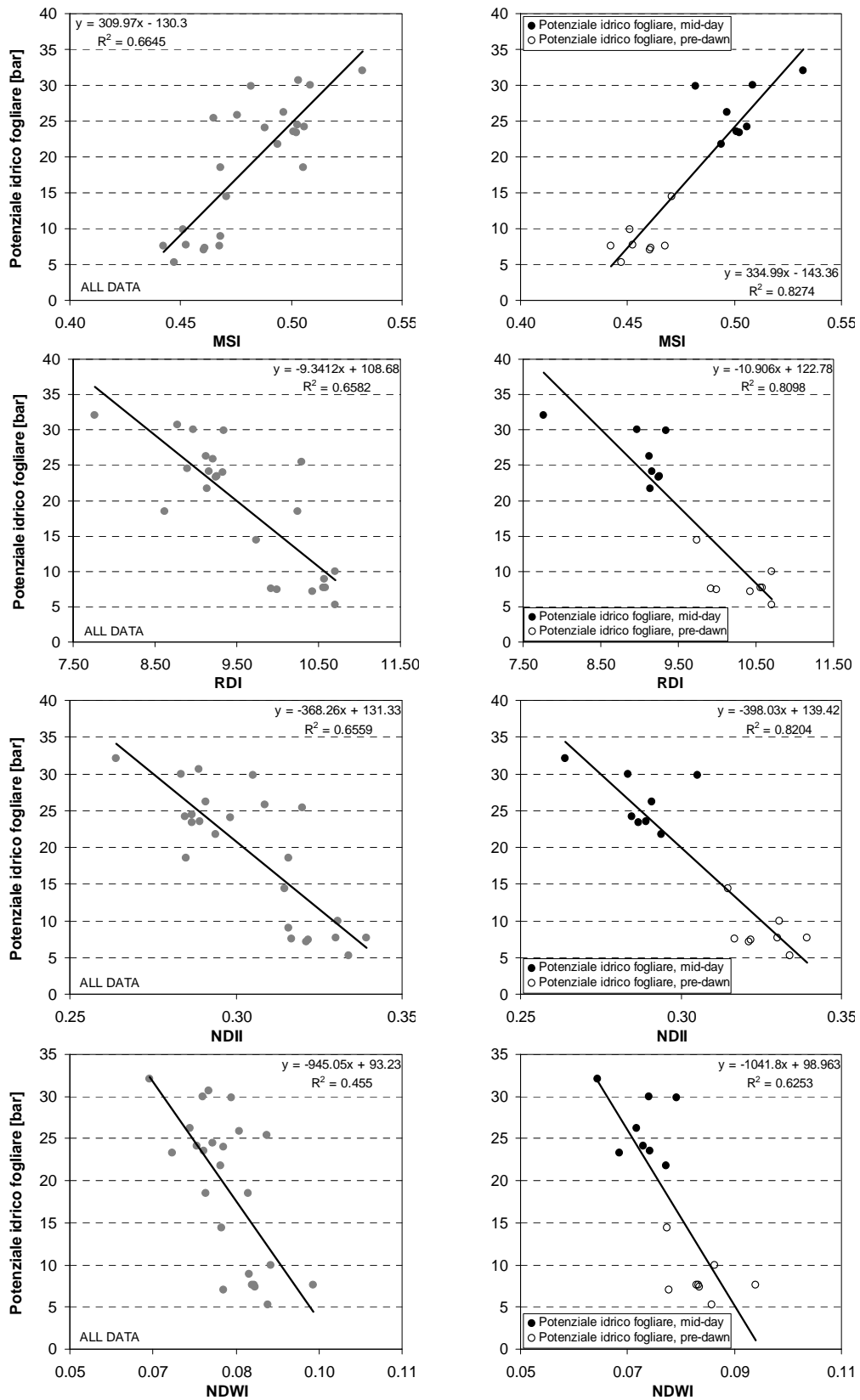
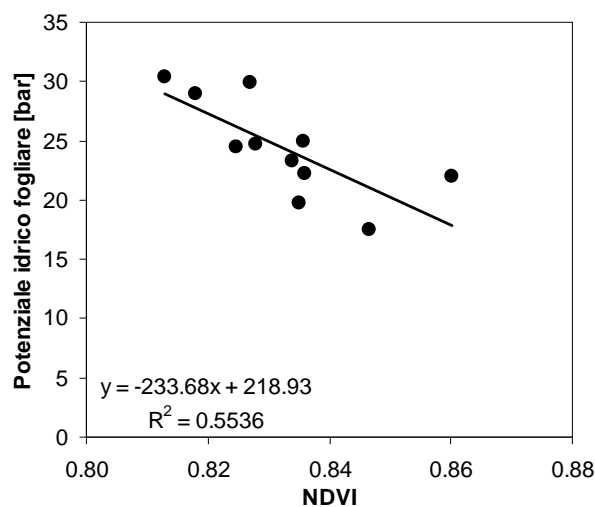


Fig. 3.22 - Relazioni tra gli indici SRWI, MSI, RDI, NDII, NDWI e i potenziali idrici xilematici considerati nel loro insieme (a sinistra) o solamente i potenziali pre-dawn e midday (a destra)

A completamento dell'indagine, l'analisi delle correlazioni ottenute tra gli indici diretti, calcolati sulla base delle firme spettrali acquisite questa volta a scala di canopy e lo stato idrico della pianta, espresso ancora in termini di potenziale idrico xilematico, ha invece evidenziato una scarsa sensibilità degli indici a stimare i potenziali idrici fogliari. Una moderata sensibilità si osserva limitatamente alla correlazione tra l'indice vegetazionale *NDVI* ed il potenziale idrico fogliare, come mostrato in fig. 3.23. Dall'esame della figura si rilevano valori decrescenti dei potenziali idrici xilematici al crescere dell'indice *NDVI*. Tale circostanza indurrebbe a ritenere che un aumento delle condizioni di stress idrico determini nell'apparato fogliare una riduzione del contenuto di clorofilla e conseguentemente valori inferiori dell'indice *NDVI*.



**Fig. 3.23 - Relazione tra i valori dei potenziali idrici xilematici e l'indice *NDVI* determinato a scala di canopy**

In effetti, più che ad una modificazione delle caratteristiche morfo-anatomiche a livello fogliare o ad una degradazione della clorofilla a seguito dell'evolversi dello stress, non evidenziata sulla base dell'analisi condotta a scala di singola foglia, si ritiene che la relazione tra l'indice *NDVI* e lo stato idrico sia da imputare ai fenomeni di paraeliotropismo fogliare che si verificano durante i periodi di stress (Natali et al., 1999). In particolare, a seguito dell'insorgenza di condizioni di stress idrico e quindi di un aumento dei potenziali idrici xilematici fogliari, la pianta mette in atto strategie di difesa per superare il periodo di carenza idrica, riducendo l'angolo di inserzione fogliare sul germoglio, modificandone l'orientamento in modo da ridurre il carico radiativo nel corso della giornata. Si viene quindi a modificare la distribuzione degli angoli fogliari della canopy e la conseguente diminuzione dell'*NDVI* si può pertanto imputare al maggior contributo, all'interno del target di acquisizione, della superficie abassiale delle singole foglie che, riflettendo in maggior misura nelle lunghezze

d'onda del rosso (640 nm) rispetto alla superficie adassiale, fa ridurre il numeratore ed aumentare il denominatore del rapporto che consente la stima dell'*NDVI* (Rallo et al., 2013). Sulla base delle indagini condotte si può pertanto evidenziare come i diversi indici spettroradiometrici calcolati a scala di singola foglia possono in qualche modo consentire una stima indiretta speditiva dei potenziali idrici xilematici e pertanto possono risultare, ai fini della gestione irrigua, strumenti idonei ad identificare le condizioni di stato idrico delle piante ed a segnalare il momento nel quale procedere con l'adacquamento, in relazione alle condizioni di stress idrico che si intendono raggiungere.



## Conclusioni

La presente tesi ha approfondito alcuni aspetti della schematizzazione del modello di bilancio agro-idrologico FAO-56 finalizzati alla stima dei consumi idrici della coltura dell'olivo.

Le attività sperimentali sono state condotte presso l'azienda agricola "Tenuta Rocchetta" nel territorio di Castelvetro, nel corso delle stagioni irrigue 2009, 2010 e 2011. L'indagine ha reso necessaria la preliminare acquisizione di dati relativi alle caratteristiche fisiche del terreno, i calendari irrigui seguiti dall'agricoltore e le caratteristiche climatiche registrate dalla stazione meteorologica di Castelvetro, gestita dal Servizio Informativo Agrometeorologico della Regione Sicilia, e ubicata in prossimità del sito sperimentale.

Le misure acquisite hanno permesso di esaminare i gradienti di attingimento radicale nell'intorno della pianta attraverso il monitoraggio spazio-temporale dei contenuti idrici del suolo, effettuato con l'ausilio di una sonda capacitiva su una griglia sistematica di monitoraggio. Tale risultato ha permesso quindi di individuare le aree nell'intorno della pianta nelle quali occorre installare i sensori di umidità, al fine di ottenere un'informazione che sia rappresentativa del reale stato idrico del suolo.

Lo studio sulla distribuzione spaziale delle radici ha evidenziato come queste si concentrano negli strati superficiali, lungo la direzione della linea gocciolante e in prossimità dei gocciolatori, posti a 50 e 150 cm circa dal tronco della pianta. Inoltre, è stato osservato che le radici si spingono ben oltre la proiezione della chioma, misurata a circa 250 cm dal tronco.

L'analisi degli udogrammi ha evidenziato che per i pozzetti installati in prossimità dei punti di erogazione, si determinano repentini incrementi del contenuto idrico in concomitanza degli adacquamenti e rapide diminuzioni legate agli attingimenti radicali, fino alla profondità di circa 75-80 cm. Per i pozzetti più distanti dalla fascia umettata invece, l'entità dei picchi di attingimento si riduce, fino a scomparire completamente per distanze superiori ad un metro dall'asse del filare. In relazione al sistema localizzato di distribuzione dell'acqua irrigua, i valori più elevati di contenuto idrico del suolo sono stati registrati, ovviamente, lungo i filari, in prossimità della fascia umettata dai gocciolatori. Inoltre, al trascorrere del tempo dopo l'adacquamento, la variabilità dei contenuti idrici tende ad attenuarsi.

Gli attingimenti radicali nel corso della stagione irrigua sono stati in maggior misura localizzati nel volume di suolo umettato con l'irrigazione dove, per quanto detto, risulta presente la massima densità radicale. Nel corso di più lunghi periodi di essiccamento invece,

la dinamica dei contenuti idrici ha interessato l'intero volume di suolo esplorato dalle radici, piuttosto che quello prossimo alla zona di umettamento, evidenziando la capacità delle piante di olivo di attivare porzioni distinte dell'apparato radicale in relazione alla disponibilità idrica del suolo.

La schematizzazione ipotizzata ha portato a riconoscere che il volume di suolo nel quale si registrano i massimi attingimenti radicali a seguito di un adacquamento (serbatoio S1) sia di forma parallelepipedica, con larghezza pari a 1.50 m, lunghezza di 5.0 m e profondità di 0.75 m, mentre invece il volume di suolo esterno (serbatoio S2) contribuisce solo quando la riserva idrica in S1 tende ad esaurirsi.

L'analisi temporale della dinamica dei contenuti idrici medi all'interno dei serbatoi S1 ed S2 ha infatti dimostrato che mentre per il serbatoio S1 si determina una notevole variabilità del contenuto idrico medio nel corso della stagione irrigua in corrispondenza degli adacquamenti, valori pressoché costanti del contenuto idrico caratterizzano invece il serbatoio S2. Pertanto, per disporre di valori rappresentativi del contenuto idrico del terreno finalizzati alla gestione dell'irrigazione occorre installare i sensori di misura nel serbatoio S1, nel quale si concentra la maggiore densità radicale e conseguentemente si registra il massimo attingimento idrico.

E' stata infine effettuata la validazione del modello di bilancio idrico proposto nel quaderno FAO n. 56, sia nella sua forma originale che in una versione modificata per la funzione di stress idrico sperimentalmente ricavata da Rallo e Provenzano (2013), attraverso le contestuali misure di contenuto idrico del suolo e di flussi traspirativi della pianta direttamente acquisiti in campo.

Le simulazioni condotte hanno evidenziato che la modifica proposta consente di migliorare la stima dei valori del contenuto idrico misurato all'interno del serbatoio S1. Tale circostanza, unitamente ad una corretta schematizzazione della funzione di stress idrico, consente altresì di stimare consumi evapotraspirativi effettivi molto prossimi a quelli misurati mediante i sensori sap-flow, con differenze sui valori cumulati stagionali del tutto trascurabili.

L'introduzione nel modello di una più attendibile funzione di stress idrico della vegetazione, rispetto alla funzione lineare considerata dalla versione originale, permette quindi di migliorare la performance del modello, implementando la capacità di stima degli attingimenti idrici radicali della pianta.

Le misure spettroradiometriche eseguite hanno infine permesso di identificare alcuni indici e in particolare quelli rilevati utilizzando le lunghezze d'onda relative al medio e corto infrarosso, sensibili a variazioni del potenziale xilematico fogliare rilevati nelle diverse ore

del giorno. Il miglioramento delle correlazioni tra gli indici spettrali ed i potenziali xilematici può conseguirsi quando si considerano soltanto i valori di potenziali misurati all'alba e al midday, in quanto si riducono gli effetti dovuti alla variabilità delle condizioni ambientali.

D'altra parte, indici spettrali che includono le bande di assorbimento a 975 nm quali il "floating Water Index" e l'"Absorption Index", sono risultati, sia a livello di foglia che di canopy, non sensibili ad identificare lo stato idrico della pianta.

A scala di canopy inoltre, l'indagine condotta ha evidenziato una generalmente scarsa sensibilità degli indici spettrali nel valutarne lo stato idrico, eccetto che per l'indice *NDVI*.

La sperimentazione ha messo in evidenza come valori decrescenti dei potenziali idrici xilematici fanno crescere l'indice *NDVI*. Tale circostanza, più che ad una modificazione delle caratteristiche morfo-anatomiche a livello fogliare o ad una degradazione della clorofilla a seguito dell'evolversi delle condizioni di stress, si suppone debba essere attribuita ai fenomeni di paraeliotropismo fogliare che si verificano durante i periodi di carenza idrica. Si tratta cioè di strategie di difesa che la pianta mette in atto per superare periodi di deficit idrico del suolo, attraverso una riduzione dell'angolo di inserzione fogliare sul germoglio; la conseguente diminuzione dell'indice *NDVI* si può imputare al maggior contributo della superficie abassiale delle singole foglie al target di acquisizione a scala di canopy.

In ogni caso, l'indagine eseguita ha permesso di verificare come i diversi indici spettro-radiometrici calcolati a scala di singola foglia possono praticamente consentire una stima indiretta dei potenziali idrici xilematici e pertanto, ai fini della gestione irrigua, possono costituire strumenti speditivi idonei ad identificare lo stato idrico della pianta.

## Bibliografia

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper (56), Rome, Italy.
- Amato, M., and Ritchie, J. T. (1995). Small spatial scale soil water content measurement with time-domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal*, 59(2): 325-329.
- Ameglio, T., Archer, P., Cruiziat, P., Daudet, F. A., Valancogne, C., Dayau, S., and Cohen M. (1997). A limit in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation.
- Baker, J.M., and Lascano, R.J. (1989). The spatial sensitivity of time domain reflectometry. *Soil Science*, 147(5): 378-384.
- Baumhardt, R.L., R.J. Lascano, and Evett, S.R. (2000). Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes, *Soil Science Society of America Journal*, 64: 1940–1946.
- Benyon, R.G. (1999). Nighttime water use in an irrigated *Eucalyptus grandis* plantation. *Tree Physiology*, 19: 853–859.
- Boyer, J.S. (1967). Leaf water potentials measured with a pressure chamber. *Plant Physiology*, 42: 133-137.
- Boyer, J.S. (1988). Cell enlargement and growth induced water potentials. *Plant Physiology*, 73: 311-316.
- Brutsaert, W. (2005). *Hydrology – an introduction*. Cambridge University Press, New York, NY, 605 pp.
- Burgess, S.S.O., M.A. Adams and Bleby, T.M. (2000). Measurements of sap flow in roots of woody plants: a commentary. *Tree Physiology*, 20: 909–913.
- Ceccato, P., S. Flasseb, and Tarantola, S. (2001). Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 77: 22- 33
- Curran, P.J., Dungan, J.L., Macler, B.A., Plummer, S.E., and Peterson, D.L. (1992). Reflectance spectroscopy of fresh whole leaves for the estimation of chemical concentration, *Remote Sensing of Environment*, 39(2): 153-166.
- Dalton, F.N., and van Genuchten, M.Th. (1986). The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, 38: 237-250.
- Dasberg, S., and Hopmans, J.W. (1992). Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 1341-1345.

- Dettori, S. (1987). Estimación con los métodos de la FAO de las necesidades de riego de los cultivos de aceitunas de mesa de Cerdeña. *Olivae*, 17: 30-35.
- Dichio, B., Romano, M., Nuzzo, V., and Xiloyannis, C. (2002). Soil water availability and relationship between canopy and roots in young olive trees (cv coratina). *Acta Horticulturae (ISHS)*, 586: 255-258.
- Dirksen, C., J.B. Kool, P. Koorevaar, and van Genuchten, M.Th., (1993). Hyswasor: simulation model of hysteretic water and solute transport in the root zone. In: D. Russo and G. Dagan (Eds.), *Water flow and solute transport in soils*. Springer-Verlag, Adv. Series in Agric. Sci., 20: 99 - 122.
- Donovan, L. A., Gris , D. J., West, J. B., Pappert, R. A., Alder, N. N., and Richards, J. H. (1999). Predawn disequilibrium between plant and soil water potentials in two cold-desert shrubs. *Oecologia*, 120(2): 209-217.
- Eitel, J.U. H, Gessler, P. E., Smith A.M.S., and Robberecht, R. (2006). Suitability of existing and novel spectral indices to remotely detect water stress in *Populus* spp *Forest ecology and management*, 229(1-3): 170-182.
- Fernández, J.E., and Moreno, F. (1999). Water use by the olive tree. *Journal of Crop Production*, 2(2): 101-162.
- Ferré P.A., and Topp, G.C. (2002). Time domain reflectometry. pp.434 - 446 in *Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods*, J.H. Dane e G.C. Topp co - eds., Number 5 in the *Soil Science Society of America Book Series*, Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Fiorino P. (2003). *OLEA Trattato di olivicoltura*. Il Sole 24 Ore. Ed. Edagricole.
- Ford, C.R., C.E. Goranson, R.J. Mitchell, R.E. Will and Teskey, R.O. (2004). Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees. *Tree Physiology*, 24: 951-960.
- Gao, B. C. (1996). NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 58 (3): 257-266.
- Gardner, W.R., 1991. Modelling water uptake by roots. *Irrigation Science*, 12: 109-114.
- Goldstein, G.G, J.L. Andrade, F.C. Meinzer, N.M. Holbrook, J. Cavelier, P. Jackson and Celis, A.. (1998). Stem water storage and diurnal patterns of water use in tropical forest canopy trees. *Plant Cell Environment*, 21: 397-406.
- Granier, A. (1985). Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de s ve brute dans le tronc des arbres. *Ann. Forest Science*, 42(2): 193-200.

- Granier, A. (1987). Evaluation of transpiration in a Douglas - fir stand by means of sap flow measurements. *Tree Physiology*, 3: 309–320.
- Green, S., B. Clothier, and Jardine, B. (2003). Theory and practical application of heat pulse to measure sap flow. *Agronomy Journal*, 95: 1371–1379.
- Hardinsky, M. A., V. Lemas, and Smart, R. M. (1983). The Influence of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Reflectance of *Spartina Alternifolia* Canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49 (1): 77–83.
- Heimovaara T.G. (1993). Design of triple-wire time domain reflectometry probes in practice and theory. *Soil Science Society of America Journal*, 57: 1410-1417.
- Herkelrath W.N., Hamburg S.P., and Murphy F. (1991). Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resources Research*, 27(5): 857-864.
- Jacquemoud, S., and Ustin, S.L. (2003). Application of radiative transfer models to moisture content estimation and burned land mapping. Proc. 4th Int. Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management, Ghent (Belgium), 5–7 June.
- Jensen M. E., R. D. Burman, and Allen, R. G. (1990). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice n. 70.
- Jones, H.G. (1992). *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kennedy, J.B. and Neville, A.M. (1986) “Basic Statistical Methods for Engineers and Scientists”, Harper and Row, 3rd ed.
- Knight J.H. (1992). Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variations in soil water content. *Water Resources Research*, 28: 2345-2352.
- Lacape, M.J., Wery, J., and Annerose, D.J.M. (1998). Relationships between plant and soil water status in five field - grown cotton (*Gossypium hirsutum* L.) cultivars. *Field Crop Research*, 57: 29-43.
- Liu, Y., and Luo, Y. (2010). A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 97: 31–40.
- Lu, P., L. Urban and P. Zhao. (2004) . Granier’s thermal dissipation probe (TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice. *Acta Botanica Sinica*, 46: 631–646.
- Ludwig, F., R.A. Jewitt and Donovan L.A. (2006). Nutrient and water addition effects on day- and nighttime conductance and transpiration in a C3 desert annual. *Oecologia*.

- Merriam, J. L. (1966). A management control concept for determining the economical depth and frequency of irrigation. *Transaction of the American Society Agricultural Engineering*, 9: 492-498.
- Nadler A., Dasberg S., and Lapid, I. (1991). Time domain reflectometry measurements of water content and electrical conductivity of layered soil columns. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 938-943.
- Nardini, A., Salleo, S., and Raimondo, F. (2003). Changes in leaf hydraulic conductance correlate with leaf vein embolism in *cercis siliquastrum* L. *Trees - Structure and Function*, 17(6): 529-534.
- Natali S., C. Bignami, C. Cammilli, and Muganu, M. (1999). Effect of water stress on leaf movement in olive cultivars. *ISHS Acta Horticulturae 474: III International Symposium on Olive Growing*.
- Newman, E.I. (1966). A method of estimating the total length of root in a sample. *Journal Applied Ecology*, 3: 139-45
- Nobel, P. S. (2010). *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. Elsevier Science.
- Noborio, K. (2001). Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31: 213-237.
- Paltineau, I.C. and Starr, J.L. (1997). Real - time water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. *Soil Science Society of America Journal*, 61: 1576-1585.
- Pellegrino A., E. Goz , E. Lebon, and J. Wery. (2006) A model - based diagnosis tool to evaluate the water stress experienced by grapevine in field sites. *European Journal of Agronomy*, 25: 49-59.
- Pellegrino, A., Lebon, E., Voltz, M., and Wery, J., (2004). Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). *Plant Soil*, 266: 129-142.
- Peng, S., Ding, J., Mao, Z., Xu, Z., and Li, D. (2007). Estimation and verification of crop coefficient for water saving irrigation of late rice using the FAO-56 method. *Transaction CSAE 23 (7): 30-34*.
- Peñuelas, J., I. Filella, C. Biel, L. Serrano, and R. Sav . (1993). The Reflectance at the 950-970 nm Region as an Indicator of Plant Water Status. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 1887-1905.

- Pu, R., Ge, S., Kelly, N. M. and Gong, P. (2003). Spectral absorption features as indicators of water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 24(99): 1799–1810.
- Rallo, G. (2010). Misura e modellazione degli scambi idrici nel sistema continuo SPA e approfondimenti sulle funzioni di stress idrico: applicazione alla coltura dell'olivo. Tesi per il conseguimento del titolo di dottorato di ricerca.
- Rallo, G., and Provenzano, G. (2013). Modelling eco-physiological response of table olive trees (*Olea europaea*, L.) to soil water deficit conditions. *Agricultural Water Management*, 120: 79-88.
- Rallo, G., Ciruolo, G., Farina, G., Minacapilli, M., and Provenzano, G. (2013). Detection of crop water status in mature olive orchards using vegetation spectral measurements. EGU General Assembly, Vol. 15, EGU 2013-464. Vienna, 7-12 aprile.
- Rallo, G., Baiamonte, G., Manzano, J., and Provenzano, G. (2013). Improvement of FAO-56 Model to Estimate Transpiration Fluxes of Drought Tolerant Crops under Soil Water Deficit: An Application for Olive Groves. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. In press.
- Ratliff, L.F., Ritchie, J.T., and Cassel, D.K. (1983). Field-measured limits of soil water availability as related to laboratory-measured properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47: 770–775.
- Remorini, D., and Massai, R. (2003). Comparison of water status indicators for young peach trees. *Irrigation Science*, 22(1): 39-46.
- Robinson, D.A., Jones S.B., Wraith J.M., Or D., and Friedman, S.P. (2003). A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurements in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone Journal*, 2: 444-475.
- Rodriguez-Pérez, J.R., Riaño, D., Carlisle, E., Ustin, S., and Smart, D.R. (2007). Evaluation of Hyperspectral Reflectance Indexes to detect Grapevine Water Status in Vineyards. *American Journal of Enology and Viticulture*, 58: 3.
- Rollin, E.M., and Milton, E.J. (1998). Processing of high spectral resolution reflectance data for the retrieval of canopy water content information. *Remote Sensing of Environment*, 65: 86– 92.
- Roth K., Schulin R., Fluhler H., and Attinger W. (1990). Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resources Research*, 26(10): 2267-2273.



- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., and Deering D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, in: Freden S.C., Becker M. (Eds) Third earth resources technology satellite - 1 symposium, NASA SP - 352, Washington, DC, 1: 309–317.
- Sakuratani, T., T. Aoe and H. Higuchi. (1999). Reverse flow in roots of *Sesbania rostrata* measured using the constant power heat balance method. *Plant Cell Environment*. 22: 1153–1160
- Santini A. (1997). Contenuto d'acqua del suolo. pp.1 - 35 in *Metodi di Analisi Fisica del Suolo*, Parte VIII, M. Pagliai ed., Ministero per le Politiche Agricole, Franco Angeli Ed., Milano, Italia.
- Savitzky A. and Golay, M.J.E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*. 36: 1627-1639.
- Smith, D.M. and S.J. Allen. (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal Experimental Botany*. 47: 1833-1844.
- Smith M. S., M. J. Wooster, A.K. Powell and Usher, D.. (2002). Texture based feature extraction: application to burn scar detection in Earth observation satellite sensor imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 23(8): 1733–1739.
- Snyder, K.A., J.H. Richards and Donovan, L.A. (2003). Nighttime conductance in C3 and C4 species: do plants lose water at night? *Journal Experimental Botany*. 54: 861–865.
- Stirzaker, R. J., and Passioura, J. B. (1996). The water relations of the root-soil interface. *Plant, Cell and Environment*. 19(2): 201-208.
- Topp G.C., and Davis J.L. (1985). Measurements of soil water content using Time Domain Reflectometry (TDR): a field evaluation. *Soil Science Society of America Journal*, 49: 19-24.
- 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(3): 574-582.
- Topp, G.C., Davis J.L., and Annan A.P. (1982). Electromagnetic determination of soil water content using TDR: II. Evaluation of installation and configuration of parallel transmission lines. *Soil Science Society of America Journal*, 46: 678-684.
- Williams, E. L., Walter, L. M., Ku, T. C. W., Ling, G. K. W., Zak, D. R. (2003). Effects of CO<sub>2</sub> and nutrient availability on mineral weathering in controlled tree growth experiments. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2): 1041.

- Xiloyannis C., G. Montanaro, and Dichio, B. (2012). Irrigation in Mediterranean fruit tree orchards. Irrigation systems and practices in challenging environments: Edited by Teang Shui Lee INTECH 2012.
- Zegelin, S.J., White, I., and Jenkins, D.R. (1989). Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry. *Water Resources Research*, 25(11): 2367-2376.