

Modelli di bilancio agro-idrologico per la previsione delle dinamiche di stress idrico di colture arboree Mediterranee

Giovanni Rallo^{1*} e Giuseppe Provenzano²

¹ Dipartimento Scienze Agrarie, Alimentari e Agro-Ambientali, Università di Pisa

² Dipartimento Scienze Agrarie e Forestali, Università di Palermo

Ricezione: 8 ottobre 2015; Accettazione: 20 aprile 2016

Agro-hydrological models to predict water deficit dynamics in Mediterranean fruit trees

Abstract. Defining irrigation volumes and timing under slight or moderate water stress conditions requires to monitor the water status in the soil-crop system and identify indicators to guide irrigation scheduling. Leaf water potential (*LWP*) is commonly used to describe crop water status and, when measured at pre-dawn or mid-day, is an indicator of any instantaneous crop water stress condition. Even if leaf water potential measurements are considered one of the most reliable methods for direct determinations of crop water status, these determinations are destructive, time consuming, and require skillful operators. Agro-hydrological models can be considered an easy-to-use tool for indirect determination of soil and crop water status, as well as to estimate other parameters related to crop development. However, the application of these models requires the preliminary calibration and validation of the algorithms used for the different processes occurring in the Soil-Plant-Atmosphere continuum. Therefore, a reasonable use of the models to predict crop water stress should be based on site-specific experimental investigations and requires an improvement of sub-models related to the specific crop response to changes in soil water deficit. Several models have been proposed to quantify the water stress coefficient as linear or nonlinear functions of soil water status, expressed in terms of matric potential or soil water depletion. The water stress function can be used for a certain crop once the shape of the function and the thresholds values of soil water status beyond which crop water stress occurs, are determined. This review aims demonstrating how the use of agro-hydrological models is able to predict the water stress dynamics of two important Mediterranean tree crops (olive and citrus), which have a different eco-physio-

logical response to soil water deficit conditions. After examining the eco-physiological response of both crops to soil water deficit, we assessed the potential of FAO-56 model to identify crop water stress under different irrigation management strategies. The proposed water stress functions are the result of recent experiments based on long term series of field measurements of soil (volumetric water content) and plant (xylem water potential and transpiration fluxes) water status of olive and citrus trees. Experiments carried out during three years in a Sicilian olive grove and a Valencian citrus orchard allowed to identify the specific crop water stress response to soil water deficit conditions and confirm for citrus the original schematization proposed in FAO-56 paper. Moreover, after evaluating the similarity between the measured mid day stem water potential and the simulated crop water stress coefficient, the fairly good performance of FAO-56 agro-hydrological model to predict soil water content was proven. The results showed that the crop water stress coefficient estimated by the model is a suitable indicator to replace the tedious and time-consuming field measurements of mid day stem water potential. On the other side, when specific crop water stress function are implemented, the FAO-56 agro-hydrological model can predict soil water content and the crop water requirement, even when water saving strategies are used.

Key words: Agro-hydrological model, water stress function, olive, citrus.

Introduzione

Gli effetti negativi dovuti ai periodi di aridità che caratterizzano i Paesi del bacino del Mediterraneo determinano nel suolo una ridotta disponibilità idrica per le colture (Rebetez *et al.* 2006) e, conseguentemente, l'insorgenza dello stress idrico (Nielsen *et al.*, 1996), soprattutto nel periodo estivo quando alle scar-

* giovanni.rallo@unipi.it

se precipitazioni sono associate elevate temperature che determinano l'aumento della domanda evapotraspirativa dell'atmosfera. Tali effetti sono più marcati nelle regioni semi-aride del bacino del Mediterraneo e, più in particolare, nella regione sud-orientale della penisola iberica, in Italia meridionale e insulare, nella Corsica, nella Grecia e in gran parte della Turchia meridionale e centrale (Lionello, 2012). In questi ambienti l'aridità può avere serie conseguenze negative sul funzionamento e sull'efficienza degli ecosistemi, siano essi naturali o agrari. In un ecosistema naturale la pressione ambientale influenza molto la biodiversità, poiché in tali condizioni solo le specie in grado di sviluppare strategie come la resistenza, la evitanza o la tolleranza alla condizione di stress hanno maggiori possibilità di sopravvivere. Negli agro-ecosistemi Mediterranei i periodi di deficit idrico che si manifestano durante il ciclo colturale rendono necessaria l'adozione di adeguate strategie di gestione delle risorse idriche. In tali sistemi, la riduzione dei consumi è possibile attraverso l'applicazione di strategie di gestione che riguardano, in generale, le tecniche irrigue e agronomiche.

Il miglioramento delle tecniche d'irrigazione, attuato attraverso il diffondersi degli impianti a bassa portata e/o pressione quali quelli per la microirrigazione, consente di raggiungere valori di efficienza d'uso dell'acqua anche superiori al 90%, nell'ipotesi che gli impianti siano ben dimensionati da un punto di vista idraulico. L'efficienza irrigua può essere ulteriormente incrementata se si forniscono le dosi irrigue strettamente necessarie a sopperire ai fabbisogni nelle specifiche fasi dello sviluppo vegeto-produttivo della coltura e si consideri lo stress idrico come un fenomeno da gestire piuttosto che da evitare.

Gli interventi irrigui decisi in base ad osservazioni della coltura e del terreno portano spesso a uno spreco di acqua in conseguenza della modesta efficacia delle valutazioni empiriche; diversamente, una precisa valutazione dei volumi da fornire e dell'esatto momento d'intervento irriguo può contribuire alla riduzione dei volumi idrici applicati, al fine di incrementare l'efficienza d'uso dell'acqua e talvolta a migliorare qualitativamente le produzioni. In tale contesto, il controllo del deficit idrico è tra le più importanti strategie di gestione dell'irrigazione, soprattutto per le colture arboree mediterranee in cui una restrizione degli apporti idrici in certe fasi dello sviluppo vegetativo può consentire un notevole risparmio idrico (Fereses and Soriano, 2007; Girón *et al.*, 2015; Ballester *et al.*, 2014).

Le ricerche applicate all'irrigazione hanno individuato nei modelli di bilancio idrico delle colture uno

strumento semplice, economico ed affidabile per valutare, per ciascun tipo di coltura, sia il momento d'intervento irriguo che i volumi d'adacquamento da fornire. Recenti contributi hanno dimostrato come i modelli agro-idrologici possono essere utilizzati per valutare lo stato idrico del suolo e delle colture e, conseguentemente, per monitorare e gestire gli stati di stress idrico attraverso una precisa quantificazione delle dosi irrigue e del momento d'intervento irriguo (Paladino *et al.*, 2013; Rallo *et al.*, 2014).

Sebbene siano abbastanza affidabili, i modelli di bilancio idrico, soprattutto quelli a fondamento fisico (van Dam *et al.*, 1997), presentano un limite applicativo conseguente alla laboriosità delle misure necessarie e dell'elaborazione dei dati, cosicché spesso risultano utilizzabili solo da operatori specializzati. Per tale motivo la ricerca si è indirizzata verso modelli semplificati del tipo "a serbatoio" (bucket), che richiedono un modesto numero di dati di input e possono essere implementati negli applicativi web di gestione dell'irrigazione. A questo riguardo, di particolare interesse è l'applicativo IRRISIAS, fornito su piattaforma web dal Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano (SIAS), al fine di assistere gli agricoltori ed i 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). Analogamente, l'applicativo IRRINET, sviluppato dal Consorzio Emiliano Romagnolo (CER) permette, con un approccio modellistico semplificato, di disporre di un utile strumento on-line di gestione degli adacquamenti a scala aziendale.

L'applicazione dei modelli di bilancio idrico tipo "bucket" richiede alcuni approfondimenti teorico-sperimentali, soprattutto per la gestione dell'irrigazione di colture cosiddette sparse e irrigate con apporti localizzati. In questi complessi sistemi agricoli, l'elevata variabilità spaziale degli apparati radicali unitamente ai gradienti di contenuto idrico che occorrono nell'intorno del gocciolatore, comporta una notevole complessità nella schematizzazione dei processi di attingimento idrico radicale da parte della pianta. I modelli di bilancio agro-idrologico oggi disponibili e ampiamente utilizzati anche nei sistemi più complessi, non danno indicazioni sulla variabilità spaziale degli attingimenti radicali nell'intorno della pianta e, pertanto, rimane incertezza in merito all'attendibilità delle calibrature eseguite sulla base delle misure di variabili legate esclusivamente al suolo quali il contenuto idrico e potenziale matriciale, acqua disponibile e suo deauperamento. Con riferimento alla "pianta" nel

sistema “Suolo-Pianta-Atmosfera” (SPA), particolare importanza riveste la modellizzazione della risposta ecofisiologica della coltura alle variazioni delle condizioni di deficit idrico del suolo. Lo sviluppo di specifici modelli di stress idrico, permette la descrizione dei fenomeni di attingimento idrico radicale e, conseguentemente, di stimare i flussi traspirativi effettivi a partire da quelli potenziali. La capacità dei modelli di bilancio di simulare le condizioni di stress idrico della pianta dipende molto dalla schematizzazione utilizzata per la funzione di stress idrico e, in particolare, dalla forma della funzione e dai relativi parametri soglia, tipici per ogni coltura.

Il presente lavoro si propone di dimostrare come l’uso della modellistica agro-idrologica possa consentire una corretta previsione delle dinamiche di stress idrico di due importanti colture arboree Mediterranee (olivo e agrumi), caratterizzate da una diversa risposta eco-fisiologica alle variazioni delle condizioni di deficit idrico del suolo. Viene approfondita la schematizzazione della funzione di stress attraverso l’analisi di recenti sperimentazioni basate su lunghe serie di contenuto idrico e volumetrico del suolo, di potenziali idrici xilematici e di flussi traspirativi della pianta. Infine, è trattata l’applicabilità della procedura semplificata descritta nel quaderno FAO n. 56 (Allen *et al.*, 1998) per la previsione delle dinamiche di stress idrico delle colture e approfondita l’importanza che riveste una specifica schematizzazione della funzione di stress idrico nelle prestazioni dei modelli.

Modellizzazione della risposta eco-fisiologica della pianta al deficit idrico del suolo attraverso un approccio macroscopico

Lo studio della risposta della pianta a condizioni di deficit idrico è solitamente affrontato sia in ambito eco-fisiologico che in quello agronomico. La condizione di stress idrico può essere studiata monitorando la riduzione dei flussi traspirativi o della produttività della pianta rispetto alla condizione di massimo consumo idrico o di massima produzione agronomica.

Nell’ambito della modellistica agro-idrologica, la dinamica dello stress idrico viene studiata quantificando i volumi idrici estratti dall’apparato radicale della pianta. In questo caso la funzione di stress idrico permette di identificare dei coefficienti di riduzione della traspirazione potenziale a seguito dell’insorgenza della condizione di deficit.

Per la modellizzazione dello stress idrico può essere seguito un approccio microscopico oppure macroscopico. Il primo considera l’attingimento radicale in analogia ad un circuito elettrico e rende necessario

valutare numerosi parametri legati al suolo e alla pianta, quale la superficie radicale (Gardner, 1991), nonché definire i gradienti di potenziale e le resistenze al flusso idrico che si verificano lungo il percorso suolo-radice, spesso di difficile valutazione.

L’approccio macroscopico fa, invece, riferimento a modelli empirici e richiede parametri globali di più semplice determinazione. La modellizzazione del processo è effettuata attraverso il monitoraggio, nel corso di un periodo secco, dell’evoluzione di un indice di stress idrico oltre che dello stato idrico del suolo. L’indice di stress idrico (α o K_s) di solito rappresenta la traspirazione relativa, data dal rapporto tra la traspirazione effettiva (T_a) e quella potenziale (T_p) o anche, secondo quanto suggerito da Kochler *et al.* (2007), i potenziali idrici xilematici corretti per il deficit di pressione di vapore. L’approccio macroscopico ha il vantaggio di non richiedere la descrizione dettagliata del processo fisico di assorbimento radicale e quindi la stima di parametri riguardanti il suolo e la pianta, di difficile determinazione. Feddes *et al.*, (1978), hanno utilizzato l’approccio macroscopico per quantificare la condizione di stress idrico, per cui la funzione di stress, $\alpha(h)$, è ottenuta dai potenziali idrici del suolo secondo la relazione lineare:

$$\alpha(h) = \frac{h_i - h_4}{h_3 - h_4} \quad (\text{eq. 1.1})$$

nella quale il termine h_i indica il potenziale matriciale del suolo all’istante i -esimo, h_3 il valore soglia del potenziale matriciale al di sotto del quale si verifica la condizione di stress, ed h_4 rappresenta il valore di potenziale corrispondente al punto di appassimento permanente. Graficamente, il modello di Feddes è caratterizzato dalla forma trapezoidale di figura 1 che, nella sua schematizzazione originale, tiene conto anche dell’eventuale stress idrico conseguente all’assenza della fase aerea in prossimità della saturazione del suolo.

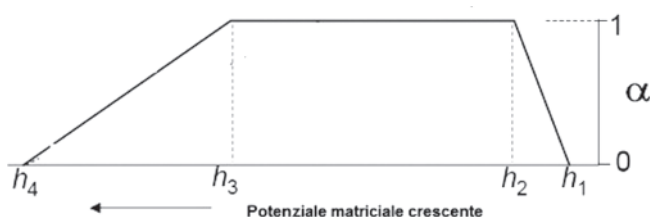


Fig. 1 - Modello di Feddes per la quantificazione dello stress idrico delle colture (h_2 ed h_1 rappresentano i potenziali corrispondenti alla capacità di campo ed alle condizioni di suolo saturo).

Fig. 1 - Feddes' model to quantify crop water stress (h_2 and h_1 are the soil matric potential corresponding to field capacity and field saturation).

Nei modelli più complessi, il tratto decrescente che quantifica lo stress da deficit idrico viene descritto mediante funzioni di tipo non lineare. Tralasciando l'effetto dovuto ai fenomeni di resistenza, tolleranza o evitanza conseguenti a condizioni di deficit che hanno luogo nella parte epigea della pianta, la non linearità delle funzioni di stress idrico è anche la conseguenza della capacità di attingimento idrico da parte del sistema radicale. Come illustrato da Guswa (2004), il complesso sistema radicale sviluppato dalle piante arboree permette alle stesse di attingere acqua in diversi punti dello spazio. La complessità della distribuzione spaziale dei percorsi di attingimento idrico permette alla pianta di compensare l'effetto della variabilità spaziale del contenuto idrico del suolo, nel senso che di volta in volta sono le radici localizzate nelle zone più umide a estrarre l'aliquota maggiore di acqua dal suolo, compensando l'attività ridotta delle radici che sono localizzate nelle zone meno umide. Tale capacità della pianta viene quantificata come la frazione minima di radici che deve essere umettata fino alla capacità di campo affinché venga soddisfatta la richiesta potenziale dell'ambiente e cioè risulti $T_a = T_p$ (Guswa, 2004). La figura 2 a,b mostra l'andamento della traspirazione relativa al variare del grado di saturazione del volume di suolo in cui ricade la zona esplorata dalle radici di piante caratterizzate da una diversa capacità di attingimento, $1/\lambda$ (Guswa, 2004). Per diversa tipologia di piante sono indicati cinque andamenti della funzione di stress idrico ottenuti al variare della frazione di suolo, δ , che all'inizio del processo di essiccamento corrisponde alla capacità di campo. In particolare, il termine δ indica la frazione di suolo inizialmente umettata fino alla capacità di campo. Con riferimento alla pianta caratterizzata da $1/\lambda=75$ è possibile verificare che il legame tra l'indice

di stress e lo stato idrico del suolo non è univoco, ma dipende in larga misura dal livello di umettamento del suolo (fig. 2a). Ad esempio, con un grado di saturazione del suolo pari a 0.13 il rapporto T_a/T_p vale 1 solo se il suolo è uniformemente umettato ($\delta=0.8$ oppure 1.0). Se invece l'acqua nel suolo è concentrata solo in una piccola frazione della zona radicale, l'attingimento globale, a parità di contenuto idrico, può ridursi significativamente.

Nel caso di pianta dotata di un'elevata abilità a compensare l'eterogeneità del contenuto idrico del suolo ($1/\lambda=25$), si nota che il soddisfacimento della richiesta ($T_a/T_p=1$) si ha in tutti i casi eccetto per $\delta=0,2$ come evidenziato in figura 2b.

Un'altra considerazione di carattere generale riguarda la forma del tratto di curva che descrive lo stress idrico. Quando tale tratto si presenta concavo, il modello schematizza una dinamica tale che l'entità dello stress idrico può diventare compromettente per la pianta già in corrispondenza di incrementi contenuti del deficit idrico del suolo. Nei modelli in cui tale tratto si presenta convesso invece, la magnitudo dello stress idrico diviene compromettente solo in corrispondenza di elevati livelli di deficit idrico, come accade ad esempio per le piante xerofitiche.

Un primo modello non lineare può essere ottenuto a partire dalla schematizzazione di Feddes, esprimendo il secondo membro dell'eq. 1.1 attraverso una legge di potenza mediante l'introduzione di un esponente di scala a .

$$\alpha(h) = \left\{ \frac{h_i - h_d}{h_s - h_d} \right\}^a \quad (\text{eq. 1.2})$$

La figura 3 mostra, per diversi valori di a , le diverse forme della funzione di stress.

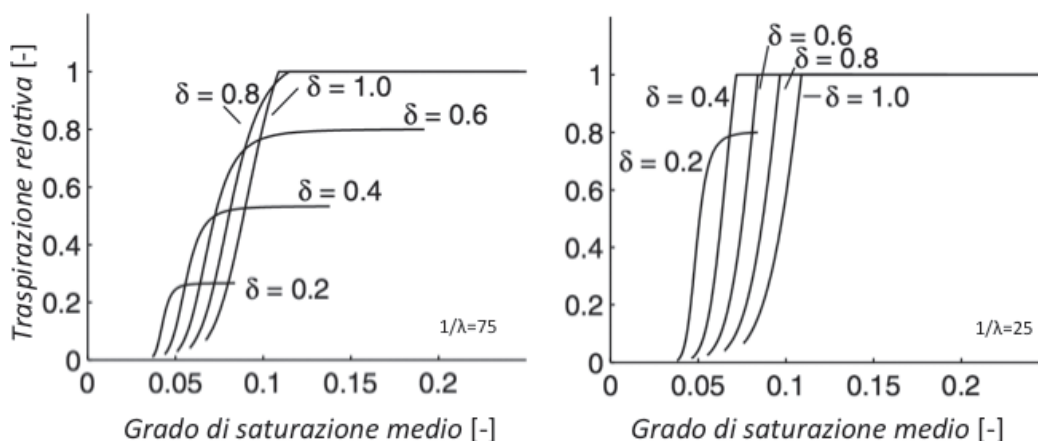


Fig. 2a,b - Funzione di stress idrico di piante con diversa abilità di compensazione ($1/\lambda$) δ rappresenta la frazione di suolo che all'inizio del processo di essiccamento si trova alla capacità di campo (estratto da Guswa *et al.*, 2004 e modificato dagli autori).

Figure 2a,b - Water stress function of crops with several root water uptake ability ($1/\lambda$) δ represents the fraction of root zone wetted at field capacity (from Guswa *et al.*, 2004 and modified by authors)

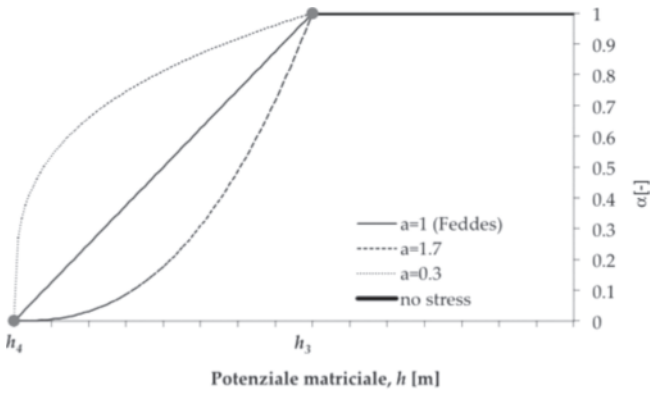


Fig. 3 - Schematizzazione non lineare della funzione di stress proposta da Feddes (1978).

Fig. 3 - Crop water stress function rearranged according to a non-linear form (Feddes, 1978).

Tra i modelli non lineari, van Genuchten (1987) ha proposto una funzione del tipo:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h_i}{h_{50}}\right)^p} \quad (\text{eq. 1.3})$$

nel quale h_{50} è il potenziale idrico del suolo, cui corrisponde un coefficiente di riduzione $\alpha(h)$ uguale a 0.50. Una modifica di tale modello è stata proposta da Dirksen *et al.* (1993) attraverso l'introduzione di un valore limite del potenziale matriciale, h^* , oltre il quale la condizione di stress è assente.

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \left[\frac{(h^* - h_i)}{(h^* - h_{50})}\right]^p} \quad (\text{eq. 1.4})$$

Il termine h^* dell'eq. 1.3 ha lo stesso significato del termine h_s utilizzato nel modello di Feddes.

Una successiva modifica al modello di van Genuchten è quella proposta da Homae (1999), secondo la quale risulta:

$$\alpha(h) = \frac{1}{1 + \frac{(1 - \alpha_0)}{\alpha_0} \left[\frac{(h^* - h_i)}{(h^* - h_{\max})}\right]^p} \quad (\text{eq. 1.5})$$

Il termine h_{\max} definisce quel valore di potenziale matriciale al di sopra del quale qualsiasi modificazione di h non comporta significative variazioni di α , mentre invece il termine α_0 rappresenta il valore di α corrispondente ad h_{\max} .

L'esponente p , che compare nei diversi modelli, dipende da fattori legati alla pianta, al suolo e clima e, secondo Homae (1999), può essere calcolato come:

$$p = \frac{h_{\max}}{h_{\max} - h^*} \quad (\text{eq. 1.6})$$

Nei diversi modelli esaminati, la funzione $\alpha(h)$, esprime in generale il valore assunto dalla traspirazione relativa (rapporto tra la traspirazione effettiva, T_a , e quella potenziale, T_p) al variare dello stato idrico del suolo. Tuttavia, è possibile attribuire a tale parametro un significato diverso in modo da esprimerlo in funzione, ad esempio, di altre variabili quali il potenziale idrico fogliare, la conduttanza stomatica e la riduzione di produzione.

Anche nella schematizzazione proposta dal quaderno FAO-56, la funzione di stress idrico è espressa mediante una relazione lineare tra il coefficiente di stress, questa volta identificato con K_s , e lo stato idrico del suolo espresso in termini di depauperamento, D_i . Quest'ultima variabile rappresenta il volume idrico, per unità di superficie di suolo, necessario a ripristinare lo stato idrico del suolo corrispondente alla capacità di campo. Numericamente, il calcolo del coefficiente di stress, K_s , richiede la definizione del cosiddetto fattore di depauperamento, q , ovvero la frazione di acqua disponibile totale (TAW) che la pianta può assorbire prima che riduca i consumi traspirativi in conseguenza di fenomeni di stress.

$$K_s = \frac{TAW - D_i}{(1 - q) TAW} \quad (\text{eq. 1.7})$$

nella quale D_i indica l'ammontare del depauperamento al giorno i -esimo [mm]. Il parametro p , tabellato per le diverse colture sullo stesso quaderno FAO 56, può essere empiricamente valutato sulla base dell'osservazione contestuale di variabili connesse allo stato idrico del suolo e della pianta. A titolo di esempio, la figura 4 riporta la curva di ritenzione idrica del suolo, nonché la corrispondente funzione di stress, rappresentata in funzione dell'andamento di K_s al variare del contenuto idrico volumetrico del suolo, SWC . L'identificazione del valore soglia SWC^* , corrispondente al contenuto idrico al di sotto del quale si determina l'insorgenza di una condizione di stress per la coltura, permette di valutare il fattore di depauperamento, q . E' opportuno tuttavia rilevare che la capacità delle radici di estrarre acqua dal terreno dipende dalla curva di ritenzione idrica e quindi, in ultima analisi, dalle caratteristiche fisiche e tessiture dello specifico tipo di suolo. Per tenere conto di tale circostanza, il quaderno FAO-56 suggerisce di ridurre tali coefficienti per i suoli con tessitura fine e maggiorarli per quelli a tessitura più grossolana.

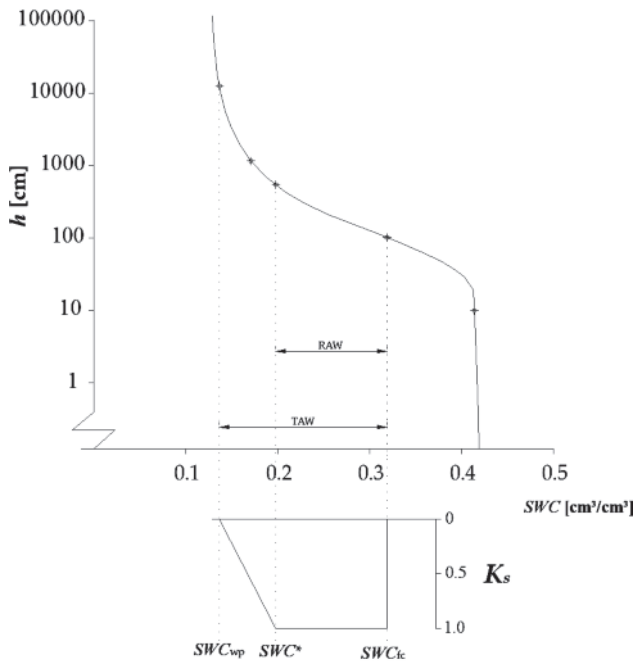


Fig. 4 - Curva di ritenzione idrica del suolo e andamento del coefficiente di stress, K_s , al variare del contenuto idrico del suolo
 Fig. 4 - Soil water retention curve and water stress coefficient, K_s , as a function of soil water status.

Recentemente, al fine di valutare la risposta della pianta all'irrigazione, è stato presentato il nuovo applicativo AQUACROP (Steduto, 2009), che introduce una schematizzazione non lineare della funzione di stress, K_s . In particolare, a parziale modifica della procedura descritta nel quaderno FAO-56, lo stress idrico è descritto attraverso una relazione non lineare a curvatura concava o convessa, a secondo che la coltura sia sensibile alla condizione di deficit idrico o, al contrario, presenti caratteristiche di xerofilia.

In quest'ultimo caso, lo stato idrico del suolo è espresso in funzione del depauperamento relativo, D_{rel} , ottenuta normalizzando i valori di depauperamento rispetto al massimo e al minimo valore della riserva idrica del suolo, pari rispettivamente a q_{low} TAW e q_{upper} TAW. Il coefficiente di depauperamento, q_{low} , che individua lo zero del depauperamento relativo e che segna il passaggio alla condizione di stress idrico, ha lo stesso significato di quello già descritto per l'eq. 1.6. Il coefficiente di massimo depauperamento, q_{upper} , individua la condizione estrema di stress e non necessariamente deve coincidere con il valore di contenuto idrico corrispondente al punto di appassimento. Dal punto di vista analitico, il tratto della funzione che descrive le condizioni di stress è matematicamente rappresentato mediante l'eq. 1.8.

$$K_s = 1 - \frac{e^{D_{rel} f_{shape}} - 1}{e^{f_{shape}} - 1} \quad (\text{eq. 1.8})$$

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

In relazione alla natura empirica dei parametri utilizzati nei modelli prima richiamati, è necessario procedere alla calibrazione sito-specifica per tener conto, oltre che del tipo di pianta, anche delle condizioni climatiche e pedologiche dell'ambiente in cui si opera.

Calibrazione della funzione di stress per oliveti e agrumeti

Studi recentemente condotti su impianti adulti, irrigati mediante microirrigazione, hanno permesso di valutare la risposta eco-fisiologica delle colture di olivo e agrumi a condizioni di deficit idrico del suolo. Per l'olivo, il protocollo sperimentale ha previsto il monitoraggio di un impianto gestito secondo le tecniche ordinarie tipiche dell'area sud occidentale della Sicilia, per gli agrumi si sono presi in esame tre trattamenti irrigui con volumi di adacquamento minori o uguali al consumo potenziale stimato nell'area di Valencia (Spagna).

L'individuazione della funzione di stress idrico dell'oliveto è stata effettuata sulla base di misure contestuali di contenuto idrico del suolo, potenziale idrico xilematico, flussi traspirativi e della distribuzione dell'apparato radicale (Rallo e Provenzano, 2013). Le misure di contenuto idrico sono state effettuate mediante le tecniche della riflettometria nel dominio delle frequenze (FDR) e del tempo (TDR), le misure di potenziale xilematico utilizzando la camera di Scholander e, infine, i flussi traspirativi mediante la tecnica del flusso di linfa (*sap flow*) (Granier, 1986).

Una prima analisi ha riguardato lo studio delle relazioni tra i flussi traspirativi reali, T_a , misurati direttamente sulla pianta ed il contenuto idrico del suolo, mostrati in figura 5. I valori del contenuto idrico sono stati ottenuti pesando, in funzione della densità radicale, i valori misurati con le due tecniche, FDR e TDR, alla profondità 45÷65 cm, alla quale corrisponde la massima densità radicale. Nel grafico è altresì indicata la curva di ritenzione idrica corrispondente al medesimo strato di suolo, in modo da identificare i valori di potenziale matriciale del terreno corrispondenti ai diversi contenuti idrici. La figura 5 evidenzia che i valori più elevati dei consumi traspirativi effettivi si ottengono per valori del contenuto idrico volumetrico superiori ad un valore soglia valutato nell'intervallo $SWC^* = 16 \pm 2\%$. Quando si utilizzano i contenuti idrici misurati sull'intero profilo di suolo (10-100 cm), nonostante la maggiore variabilità dei dati sperimentali, l'intervallo entro cui è possibile riconoscere il contenuto idrico critico risulta ancora

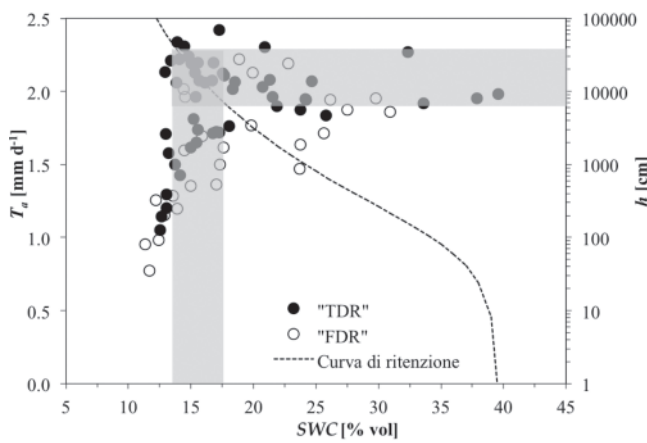


Fig. 5 - Relazione tra traspirazione effettiva, T_a , e contenuto idrico del suolo nello strato 45-65 cm. La curva di ritenzione idrica relativa al medesimo strato di suolo è anche riportata. Le bande grigie indicano l'intervallo di variazione dello stato idrico critico del suolo e della pianta.

Fig. 5 - Actual transpiration fluxes as a function of the average soil water content in the layer 45-65 cm. Soil water retention curve for the same soil layer, is also showed. Shaded areas and plant indicate the range of variation of the critical soil water status.

una volta compreso tra il 14 ed il 18% (dati non riportati). Naturalmente, in termini di potenziale matriciale del suolo, η^* , l'intervallo di variazione del valore critico è ben più ampio, poiché ci si trova sul tratto esponenziale della curva di ritenzione. Per valori del contenuto idrico del suolo inferiori al valore soglia, si determina una condizione di deficit idrico che si traduce in una riduzione dell'attività traspirativa della pianta. Le coppie di valori che descrivono tale processo sembrano seguire un andamento di tipo lineare, anche se tuttavia occorre segnalare che non è stato possibile, nel corso della sperimentazione, raggiungere condizioni di stress idrico severo.

Un'ulteriore e più dettagliata analisi della dinamica dello stress idrico, finalizzata a confermare l'intervallo di valori soglia del contenuto idrico del suolo, è stata effettuata considerando le relazioni tra il contenuto idrico del suolo e i potenziali idrici xilematici della pianta, mostrate in figura 6a-b.

La prima analisi, eseguita, sui potenziali idrici xilematici misurati all'alba ($PLWP$), ha confermato come il valore critico di contenuto idrico del suolo si localizza intorno al $16 \pm 2\%$ risultando, per contenuti idrici più elevati, i valori di $PLWPs$ pressoché costanti nell'intorno di 0.5 MPa. Tale valore corrisponde ad una condizione di assenza di stress idrico dell'olivo (Fernández e Moreno, 1999). Un'analoga situazione avviene quando si considerano i potenziali idrici del fusto a metà giornata ($MSWP$) che, essendo più stabili e rappresentativi dello stato idrico della pianta, restituiscono stime più robuste. In termini di potenziale matriciale del suolo, h , corrispondenti al valore di

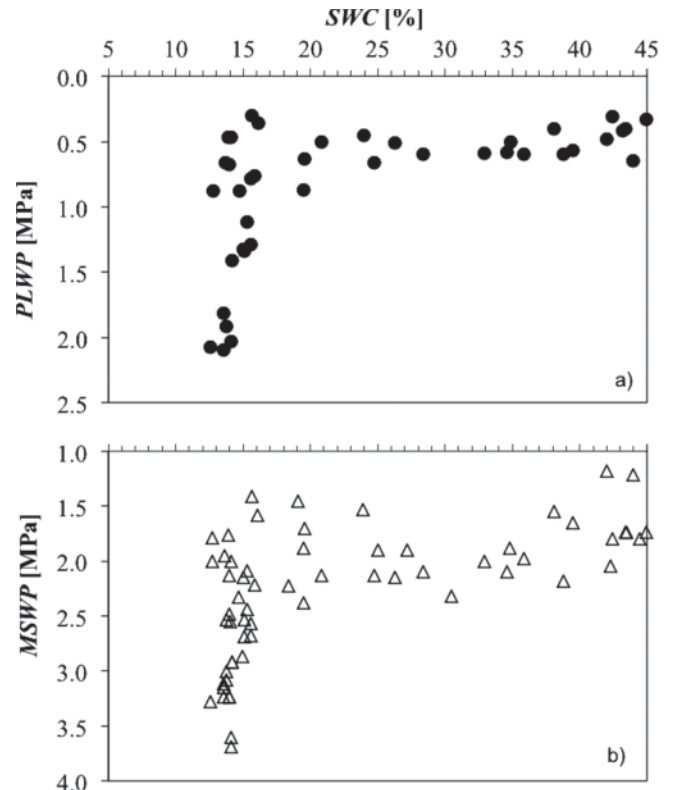


Fig. 6 - Relazione tra i potenziali idrici xilematici (a) e dell'asse (b) misurati sulla pianta di olivo ed il contenuto idrico medio del suolo nello strato 10-100 cm.

Fig. 6 - Experimental values of (a) predawn leaf water potential, $PLWP$, (b) midday stem water potential $MSWP$ of the olive trees and corresponding soil water contents in the layer 10-100 cm.

$SWC^* \approx 16\%$, lo stato idrico del suolo si attesta intorno a 4.000 cm e, per potenziali matriciali più bassi (in valore assoluto), i valori di $MSWPs$ si mantengono costanti intorno a 1.7 MPa ($CV=0.2$), definenti una condizione di assenza di stress simile a quella trovata da Moriana *et al.* (2010).

Per quanto riguarda le condizioni di stress avanzato, si è considerato il valore di stato idrico del suolo corrispondente al massimo (in assoluto) valore di $PLWP$ osservato nel corso delle sperimentazioni. A tale valore, pari all'11%, corrisponde un potenziale idrico prima dell'alba di circa -2.1 MPa o un potenziale idrico del fusto di -3.3 MPa. In termini di potenziale matriciale, tale contenuto idrico corrisponde a circa 20.000 cm colonna acqua (c.a.), ben più alto di quello che solitamente viene considerato come punto di appassimento permanente (15.000 cm c.a.).

L'indice utilizzato per la schematizzazione delle funzioni di stress idrico è rappresentato dal rapporto, T_a/T_p , ottenuto dividendo il valore di traspirazione giornaliera effettiva, T_a [mm d⁻¹], dedotta dai dati misurati attraverso la tecnica TDP (Granier, 1985), con il corrispondente valore potenziale, T_p , simulato in accordo a quanto suggerito da Jarvis e McNaughton (1986). In considerazione del fatto che

l'insieme di dati sperimentali ottenuti, non include condizioni di stress estremo, la parametrizzazione macroscopica delle funzioni di stress idrico è stata eseguita sulla base dell'analogia con le relazioni tra il potenziale idrico xilematico e lo stato idrico del suolo descritte in precedenza. In particolare, i valori critici dello stato idrico del suolo, sono rappresentati dal valore del potenziale matriciale al di sotto del quale si verifica la condizione di stress, h_3 o h^* , di quello al punto di appassimento o alla condizione di massimo stress, h_4 o h_{max} , e del valore di potenziale matriciale, h_{50} , al quale corrisponde un coefficiente di riduzione della traspirazione $\alpha(h)$ pari a 0.50. Una volta impostati tali parametri nei modelli, i coefficienti a e p delle diverse equazioni esaminate vengono ottenuti attraverso un procedura iterativa che minimizza le differenze tra i dati di traspirazione relativa osservati e quelli stimati attraverso i diversi modelli considerati. Il valore critico del potenziale matriciale oltre il quale ha inizio la condizione di stress è stato fissato in 40 m. La condizione massima di stress corrisponde a potenziali matriciali, h_4 o h_{max} , di 200 m. Come valore del parametro h_{50} è stato utilizzato il valore di potenziale matriciale pari a 152 m. La figura 7 riporta l'adattamento dei modelli esaminati ai punti sperimentali osservati, mentre la tabella 1 riassume, per ciascun modello, i valori soglia identificati per i potenziali matriciali, nonché i valori stimati dei parametri a ed p ed il coefficiente di correlazione, r , associato alle relazioni di stima. Dall'analisi dei dati si osserva che il modello lineare è quello che peggio si adatta ai dati osservati, presentando un coefficiente di correlazione statisticamente non significativo. La schematizzazione lineare potrebbe migliorare qualora si consideri un valore di h_3 maggiore di quello osservato (400 m) e pari all'incirca a 800 m.

Invece, il modello non lineare ottenuto a partire dalla schematizzazione di Feddes (eq. 1.2) presenta una buona performance e riesce a descrivere con buona approssimazione la fase iniziale del processo di

Tab. 1 - Parametri usati per la calibrazione dei modelli 1.1 - 1.5. Viene inoltre riportato il coefficiente di correlazione r e la significatività statistica.

Tab. 1 - Empirical parameters used for the calibration of the models 1.1-1.5. The correlation coefficients and statistical significance are also shown.

Eq.	h_3 o h^*	h_4	h_{50}	h_{max}	a_0	a	p	r
	[m]							
1.1	40	200						0.63 (n. s.)
1.2	40	200				0.34		0.64 (0.05)
1.3			152				4.284	0.65 (0.05)
1.4	40		152				3.137	0.66 (0.05)
1.5	40			200	0.15		4.388	0.66 (0.05)

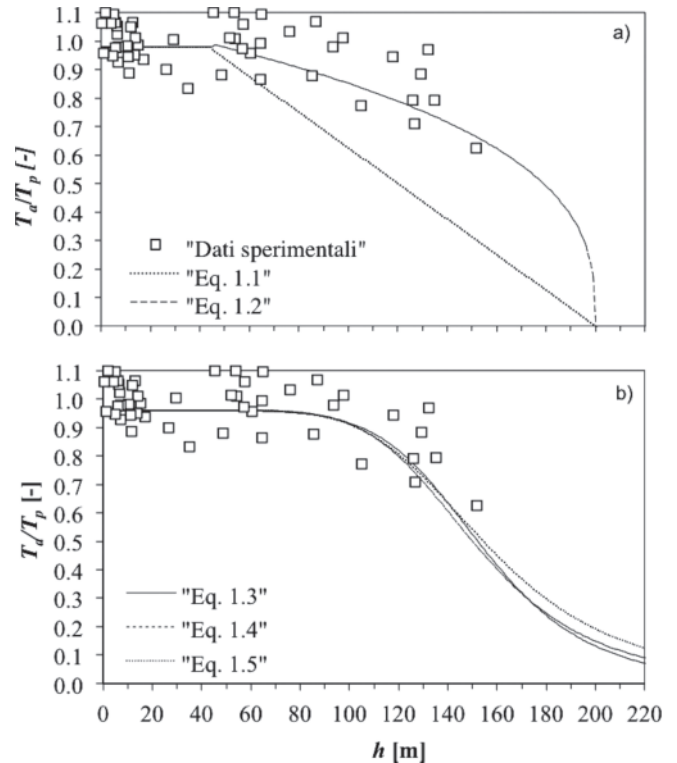


Fig. 7 - Valori misurati della traspirazione relativa, T_d/T_p , in funzione del potenziale matriciale del terreno, h , e funzioni di stress idrico (Equazioni 1.1-1.5).

Fig. 7 - Experimental values of relative transpiration, T_d/T_p , as a function of soil matric potential, h , and fitted water stress models (Equations 1.1-1.5).

riduzione della traspirazione. Gli altri modelli non lineari (eq. 1.3 - 1.5) mostrano analoghe prestazioni e, pertanto, il modello proposto da van Genuchten (eq. 1.3) appare preferibile in considerazione del minor numero di parametri richiesti.

Sulla base dei dati sperimentali disponibili, è stato altresì calibrato il modello proposto da Steduto *et al.*, (2009), matematicamente rappresentato mediante l'eq. 1.8, utilizzando come indicatore dello stress sia i potenziali idrici xilematici misurati all'alba, che quelli rilevati nell'ora più calda della giornata. I valori misurati sono stati inizialmente normalizzati rispetto agli estremi, in modo da utilizzare un intervallo di variabilità compreso tra 0 ed 1. Il depauperamento relativo, D_{rel} , viene determinato sul dominio dei valori di contenuto idrico del suolo che esplicitano la condizione di stress idrico. In particolare $D_{rel}=0$, coincide con quel valore di contenuto idrico del suolo al di sotto del quale inizia lo stress ($SWC=16\%$), mentre il valore $D_{rel}=1$ si determina in corrispondenza ad un contenuto idrico del suolo pari al minimo assoluto rilevato in campo ($SWC=11.0\%$). La parametrizzazione dell'eq. 1.8, eseguita attraverso una procedura di calcolo iterativo, permette di determinare l'unico parametro, f_{shape} , ottenuto minimizzando le differenze tra i valori

osservati e stimati dell'indice di stress. I grafici di figura 8 mostrano le relazioni ottenute considerando i coefficienti di stress ottenuti a partire dai potenziali xilematici all'alba $\alpha=f(PLWP)$ o quelli del fusto $\alpha=f(MSWP)$. L'esame dei grafici evidenzia il buon adattamento tra i dati osservati ed i corrispondenti stimati con un errore, espresso in termini di RMSE, variabile tra 0.14 e 0.15. Il parametro f_{shape} è risultato diverso a seconda del tipo di indicatore di stress idrico utilizzato e pari rispettivamente a 2.89 e 1.41, a seconda che si considerino i potenziali xilematici all'alba o quelli del fusto. Tale parametro di forma, ovviamente, influenza il grado di convessità della curva e quindi l'entità della variazione del coefficiente di stress in corrispondenza di variazioni unitarie del depauperamento relativo, D_{rel} .

Pertanto, la sperimentazione condotta ha evidenziato che la funzione di stress per l'olivo può essere adeguatamente rappresentata attraverso modelli non lineari caratterizzati da una forma convessa, indipendentemente dalle variabili utilizzate per la sua rappresentazione, a conferma del fatto che i livelli di stress divengono sempre più marcati al diminuire dello stato idrico del suolo.

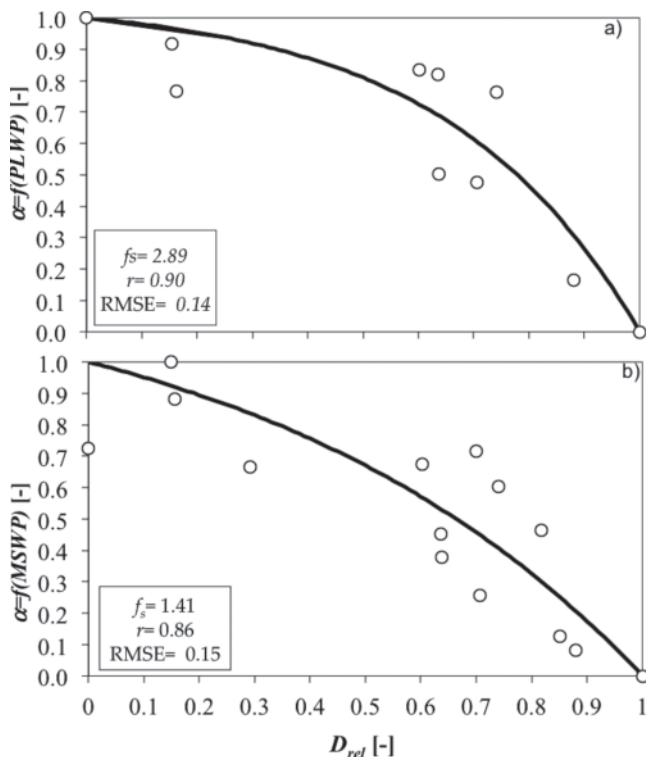


Fig. 8 - Valori sperimentali del coefficiente di stress idrico in funzione dei valori sperimentali del depauperamento relativo, D_{rel} . In ogni grafico è mostrata la funzione di stress idrico (eq. 1.7).
 Fig. 8 - Experimental values of the stress coefficient as a function of relative depletion, D_{rel} . In each figure the fitted model is also shown (eq. 1.7).

Per gli agrumi, i dati si riferiscono a prove di tre anni condotte in un agrumeto adulto (*C. sinensis*) cv Navel innestata su Cleopatra (*C. reshni*) in Spagna (Provenzano *et al.* 2014) per l'individuazione della funzione di stress idrico della coltura sulla base di misure contestuali di contenuto idrico del suolo e potenziale idrico xilematico a metà giornata (*MSWP*). Le misure di contenuto idrico sono state effettuate mediante la tecnica della riflettometria nel dominio delle frequenze (FDR) e le misure di potenziale xilematico utilizzando la camera di Scholander. I trattamenti sono stati determinati in conformità a due restituzioni irrigue (T40 e T60) calcolate rispetto a un controllo (T100) dove la restituzione prevedeva il completo soddisfacimento dell'evapotraspirazione colturale.

La figura 9 mostra la relazione esistente tra le misure di *MSWPs* con i corrispondenti valori di stato idrico del suolo misurati a quattro profondità (0.1 m, 0.3 m, 0.5 m, 0.7 m) ed espresso in termini di contenuto idrico volumetrico (*SWC*) oppure di depauperamento (*D*). La risposta dell'albero al deficit idrico del suolo è molto differente per i diversi strati di suolo esaminati e per i diversi trattamenti irrigui. Quando si considera lo strato superficiale, dove il processo evaporativo è dominante rispetto agli attingimenti radicali, i valori di *MSWP* non dipendono dallo stato idrico del suolo. Agli strati più profondi, lo stato idrico della coltura è influenzato da quello del suolo, specialmente per il trattamento T40 caratterizzato dal più ampio esplorato dominio di stato idrico del suolo.

La figura 10 mostra le suddette correlazioni in termini medi, considerando l'intero strato di suolo 0.1-0.7 m ed evidenzia come per valori alti di *SWC* i corrispondenti valori di *MSWP* sono dispersi attorno a 1.0 MPa per poi diminuire quando lo stato idrico del suolo si identifica intorno a una soglia corrispondenti a valori di depletion $D^* \approx 50-60$ mm ($SWC^* \approx 22\%$). Questa soglia critica separa due comportamenti:

- per $D < D^*$ i valori di *MSWPs* sono approssimativamente costanti e uguali a 1.0 MPa, esprimendo una condizione di assenza o limitato stress idrico (González-Altozano e Castel, 1999);
- per $D > D^*$ mm, i valori di *MSWP* tendono a decrescere come conseguenza dell'insorgere e dell'evolvere dello stress idrico.

La risposta della pianta alle variazioni di deficit idrico del suolo mostrata in figura 10, può essere riprodotta utilizzando la schematizzazione della funzione di stress proposta dalla FAO, in accordo alla quale un coefficiente di riduzione della traspirazione, K_s , evolve per valori di depletion $D > D^*$. Per il suolo in questione, il valore soglia della depletion è stato una percentuale dell'acqua disponibile totale (*TAW*)

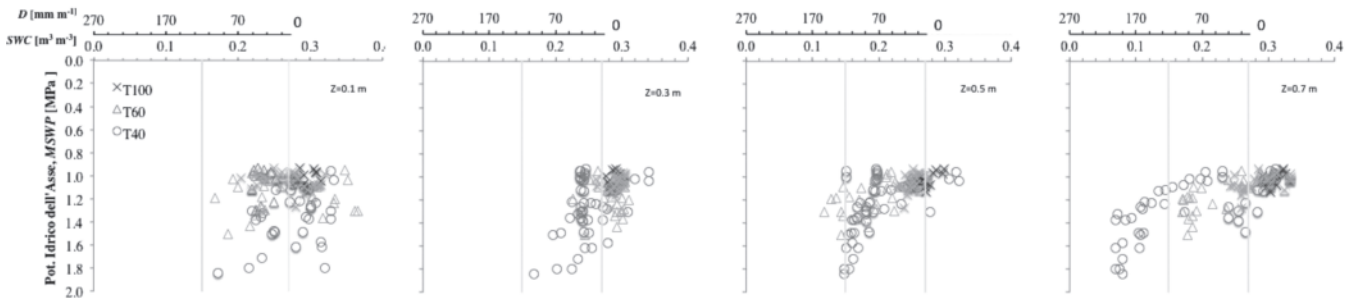


Fig. 9 - Valori sperimentali di potenziale idrico del punto misurato al midday (MSWP) e corrispondenti valori di stato idrico del suolo espressi in termini di contenuto idrico volumetrico (SWC) e depauperamento (D)
 Fig. 9 - Experimental values of midday stem water potential (MSWP) and corresponding soil water status expressed as soil water content, SWC, and depletion, D.

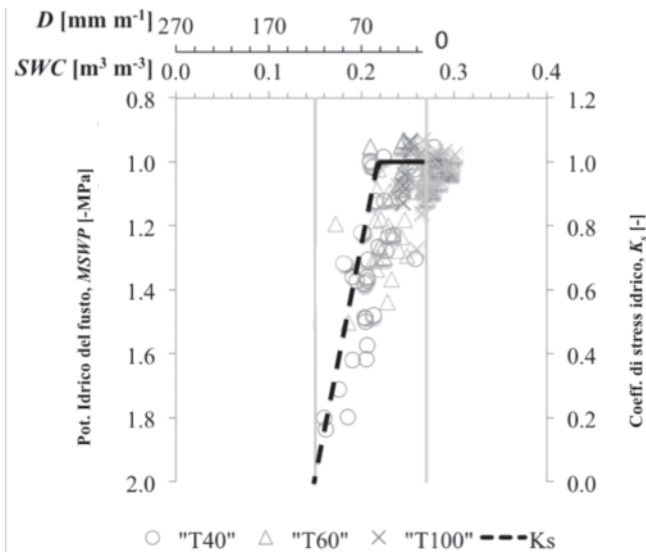


Fig. 10 - Potenziali idrici del fusto a metà giornata (MSWP) come funzione dello stato idrico del suolo nello strato 0.1-0.7 m. Nel grafico è inserita la funzione di stress idrico proposta dalla FAO.
 Fig. 10 - Midday stem water potential (MSWP) as a function of the average soil water status in the layer 0.1-0.7 m. The crop water stress function proposed by FAO-56 is also represented.

uguale a 55%, valore simile a quello riportato all'interno del quaderno FAO-56 (Allen *et al.*, 1998).

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

Le complesse relazioni idriche che avvengono nel sistema continuo Suolo-Pianta-Atmosfera (SPA) possono essere esplicitate sulla base di due distinte impostazioni modellistiche, la prima delle quali segue un approccio fisicamente basato mentre l'altra, di tipo analogico, assimila il sistema suolo-pianta ad un serbatoio. Nel primo caso gli scambi idrici nel sistema SPA vengono descritti attraverso modelli fisici che ne determinano e influenzano la dinamica specifica. Seguono questa impostazione quei modelli (SWAP, ACRUS) che 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 tale impostazione, è possibile simulare in termini differenziali le componenti del bilancio idrico ed in particolare, attraverso i profili di umidità del suolo $SWC(z)$, la variazione della riserva idrica del suolo, ΔW , in un intervallo temporale, Δt :

$$\Delta W = \int_0^z [SWC(z, t + \Delta t) - SWC(z, t)] dz \quad (\text{eq. 2.1})$$

Con riferimento invece all'impostazione di tipo analogico, la modellizzazione degli scambi idrici nel sistema SPA è molto semplificata e si basa fondamentalmente su leggi di essiccamento del suolo. In questi modelli, solitamente, il terreno è assimilato ad un serbatoio di assegnata capacità massima, TAW , definita capacità idrica massima utilizzabile. Si usano spesso formulazioni semplificate per la stima della traspirazione effettiva della pianta, T_a , dell'evaporazione effettiva dal suolo, E_a , solitamente calcolate in funzione della massima evapotraspirazione colturale, sulla base coefficienti dipendenti dal contenuto idrico medio del serbatoio. In questa impostazione i termini di bilancio idrico sono schematizzati come semplici flussi in entrata o in uscita dal serbatoio, calcolati mediante semplici relazioni.

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 facilmente utilizzabili in campo. La forte variabilità spaziale che caratterizza tale grandezza, unitamente alle citate difficoltà, fa sì che essa venga preferibilmente calcolata, a partire da dati climatici, mediante relazioni empiriche o ottenute sulla base di un approccio termodinamico. I metodi empirici sono validi solo

subordinatamente al verificarsi di specifiche condizioni climatiche e di uso del suolo e non possono dunque essere applicati in modo generalizzato.

Seguendo le indicazioni suggerite da Allen *et al.* (1998), la richiesta evapotraspirativa dell'ambiente può essere determinata seguendo la formulazione di Penman-Monteith, successivamente modificata dalla FAO. Per la quantificazione di tale variabile, ci si riferisce solitamente 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 s m^{-1} ed albedo pari a 0,23 (FAO, 1998). 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_0 [mm giorno^{-1}] può essere calcolata attraverso la seguente eq. 2.2:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (\text{eq. 2.2})$$

nella quale Δ [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$] è la pendenza della curva pressione di vapore saturo-temperatura calcolata alla temperatura T_a , R_n [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$] è il flusso di radiazione netta, G [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$] è il flusso di calore dal suolo, T_a [$^\circ\text{C}$] è la temperatura dell'aria rilevata a 2 m, $(e_s - e_a)$ [kPa] è il deficit di pressione di vapore, ovvero la differenza tra la pressione di vapore saturo e la pressione di vapore effettiva alla data temperatura, γ [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$] è la costante psicrometrica e u_2 [m s^{-1}] è la velocità del vento rilevata a 2 m dal suolo. L'insieme minimo di dati necessari per il calcolo è costituito dalla temperatura dell'aria T_a [$^\circ\text{C}$], dall'umidità relativa dell'aria, RH [%], dalla velocità del vento u_2 [m s^{-1}] e dal flusso di radiazione solare incidente R_s [$\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$]. Le altre grandezze, in mancanza di misure dirette, possono essere stimate seguendo le procedure reperibili in bibliografia (Smith, 1990; Jensen *et al.*, 1990; Brutsaert, 2006).

Nel modello FAO-56 (*Guidelines for computing crop water requirement*, FAO irrigation and drainage paper 56) (Allen *et al.*, 1998) 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 proprietà idrauliche del suolo (fig. 11). L'evoluzione della riserva idrica nel volume di suolo interessato dall'apparato radicale è simulata attraverso una funzione di esaurimento.

Tutti i flussi in entrata e uscita dal serbatoio sono espressi in mm e la scala temporale di simulazione è in generale quella giornaliera. La variazione della riserva idrica nel suolo, espressa mediante la variabile depauperamento, D_i , viene descritta dalla seguente equazione:

$$D_i = D_{i-1} - (P_i - RO_i) - I_i - CR_i + ET_{c,i} + DP_i \quad (\text{eq. 2.3})$$

nella quale si è indicato con D_i e D_{i-1} [mm], rispettivamente, l'entità del depauperamento al giorno i -esimo ed al giorno precedente, con P_i [mm] la precipitazione, con RO_i [mm] il deflusso superficiale, con I_i [mm] l'irrigazione netta (efficace), cioè l'altezza idrica 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 effettiva e con DP_i [mm] la perdita di acqua per percolazione profonda.

Il dominio della funzione di depauperamento è compreso tra zero, che corrisponde al contenuto idrico al suolo pari alla capacità di campo, e un massimo pari al totale dell'acqua disponibile per la pianta (TAW):

$$TAW = 1.000(SWC_{fc} - SWC_{wp})Z_r \quad (\text{eq. 2.4})$$

nella quale si è indicato con SWC_{fc} [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$] il

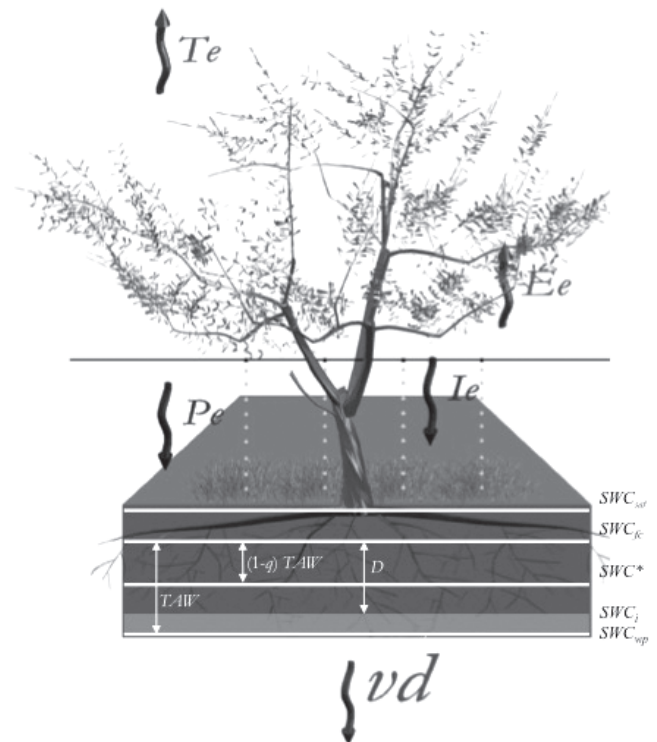


Fig. 11 - Schematizzazione del sistema continuo Suolo-Pianta-Atmosfera nel modello FAO-56
 Fig. 11- Schematization of the Soil Plant Atmosphere continuum in FAO-56 model.

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

Nella procedura a doppia componente è possibile calcolare separatamente i valori massimi (potenziali) di evaporazione dal suolo, E_p , e di traspirazione della pianta, T_p , sulla base dell'evapotraspirazione della coltura di riferimento, ET_0 , in condizioni standard, ossia in assenza di stress idrico per la coltura.

In particolare, il termine T_p viene calcolato come una frazione, K_{cb} , della evapotraspirazione ET_0 della coltura di riferimento in condizioni standard:

$$T_p = K_{cb} ET_0 \quad (\text{eq. 2.5})$$

Il parametro culturale K_{cb} , denominato anche coefficiente basale, compendia i diversi fattori legati al tipo di copertura del suolo, alle caratteristiche della specie culturale, nonché alla sua resistenza aerodinamica.

I valori di K_{cb} dipendono in particolare 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 e quindi l'energia disponibile per la traspirazione, nonché 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. I valori di K_{cb} raccomandati sono riportati nella tabella 17 del quaderno FAO 56 e 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^{-1} . Qualora si operi in ambienti diversi da quello di riferimento, occorre effettuare la correzione dei valori di K_{cb} tabulati, attraverso la seguente espressione:

$$K_{cb} = K_{cb(tab.)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h_{crop}}{3} \right)^{0.3} \quad (\text{eq. 2.6})$$

nella quale $K_{cb(tab.)}$ è il coefficiente basale tabulato, u_2 è 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 viene solitamente

suddiviso in quattro periodi (iniziale, di sviluppo, intermedio e finale), ognuno di ampiezza variabile in funzione delle specie. Nel periodo iniziale, quando la copertura del suolo è pari al massimo 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, aumenta. 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 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, identificare gli andamenti temporali dei coefficienti culturali K_{cb} .

Di notevole importanza sono gli aggiustamenti che è possibile eseguire a carico della traspirazione potenziale, che tengono 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 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 del suolo. La traspirazione effettiva quindi si ottiene semplicemente come prodotto tra la traspirazione massima, T_p , ed il coefficiente di stress idrico, K_s , del quale si è diffusamente discusso nella sezione precedente.

$$T_a = K_s T_p \quad (\text{eq. 2.7})$$

D'altra parte, la componente di evaporazione potenziale, E_p , viene calcolata come prodotto tra un coefficiente evaporativo, K_e , e l'evapotraspirazione di riferimento ET_0 :

$$E_p = K_e ET_0 \quad (\text{eq. 2.8})$$

Il calcolo del coefficiente K_e può essere effettuato sulla base della seguente espressione:

$$K_e = \min\{K_r(K_{c_max} - K_{cb}); f_{ew} K_{c_max}\} \quad (\text{eq. 2.9})$$

Tralasciando la procedura di calcolo, piuttosto articolata e laboriosa, è riportata soltanto una breve descrizione dei termini del sistema. 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, nella quale si determina la maggiore aliquota di evaporazione.

Con riferimento alla gestione dell'irrigazione, il modello richiede di impostare sia il fattore che identifica il momento di intervento irriguo, sia 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* è simile, dal punto di vista computazionale, al fattore di depauperamento q e indica la frazione massima dell'acqua disponibile totale che può essere estratta dal suolo, prima che venga suggerito di irrigare:

$$MAD = \frac{SWC_i - SWC_{lim}}{SWC_{fc} - SWC_{wp}} \quad (\text{eq. 2.10})$$

nella quale SWC_{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, SWC_{fc} e SWC_{wp} , anche da un valore limite di contenuto idrico, SWC_{lim} . Questo contenuto idrico limite assume valore diverso o uguale al valore critico SWC^* , in funzione del tipo di gestione dell'irrigazione che si vuole effettuare. In particolare, nel caso in cui $SWC_{lim} \geq SWC^*$ l'irrigazione consente il mantenimento di un ecosistema umido e la totale assenza di stress idrico, mentre se $SWC_{lim} < SWC^*$ l'irrigazione è gestita in condizioni di prevalente stress idrico. Pertanto è possibile impostare un valore $SWC_{lim} > SWC^*$ quando ci si trova a gestire l'irrigazione in contesti dove vigono vincoli ambientali, ad esempio quello di mantenere un'area naturale umida, $SWC_{lim} = SWC^*$ quando si vuole intervenire con l'adacquamento prima che la pianta entri nella fase di stress e $SWC_{lim} < SWC^*$ 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 dal tipo di risultato produttivo che l'agricoltore vuole conseguire, nonché da vincoli specifici quali la quantità di acqua disponibile per l'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 ($SWC_{lim} = SWC^*$). Tali ipotesi, tuttavia, non si 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 motivo è stata suggerita una modifica del modello (Rallo *et al.*, 2012) al fine di permettere la programmazione dell'irrigazione in condizioni di stress idrico ($SWC_{lim} < SWC^*$).

Riguardo alla quantità d'acqua da somministrare nel corso di ogni adacquamento, è possibile scegliere tra due opzioni, a seconda se si vuole riportare l'umidità del suolo alla capacità di campo, oppure intervenire con un prestabilito volume di adacquamento.

Applicazione del modello FAO-56 per il monitoraggio delle condizioni di stress idrico negli oliveti e negli agrumeti

In questo paragrafo sono presentati e discussi i risultati di alcune applicazioni del modello FAO-56 per oliveti ed agrumeti. Per l'olivo, le simulazioni sono state effettuate utilizzando il modello sia nella sua forma originale (Allen *et al.*, 1998), che nella forma modificata da Rallo *et al.* (2013) al fine implementare la reale funzione di stress idrico sperimentalmente ottenuta per la coltura in esame (Rallo e Provenzano, 2013).

La calibrazione del modello è stata eseguita considerando un consistente database di misure acquisite nel corso delle stagioni irrigue 2009, 2010 e 2011, contenente i flussi traspirativi, rilevati con l'ausilio di sonde TDP (*Thermal Dissipation Probe*), i valori di contenuto idrico del suolo misurati con sonde TDR e FDR e il potenziale idrico del fusto misurato a mezzogiorno (*Midday Stem Water Potential*, MSWP). La parametrizzazione delle costanti idrologiche del terreno (contenuto idrico corrispondente alla capacità di campo ed al punto di appassimento) e delle caratteristiche bio-agronomiche della vegetazione (distribuzione radicale, coefficiente colturale, percentuale di copertura vegetale, altezza della pianta) è stata ese-

guita sulla base di misure dirette, in campo ed in laboratorio, per le quali si rimanda al lavoro originale (Rallo e Provenzano, 2013).

La figura 12 riporta l'evoluzione temporale della traspirazione potenziale ed effettiva (fig. 12d-f), dei valori misurati e simulati del contenuto idrico medio del suolo (fig. 12g-i), nonché il confronto tra la dinamica della traspirazione relativa misurata ($T_a T_p^{-1}$) e quella del coefficiente di stress, K_s simulato utilizzando sia l'originale funzione lineare di stress, eq. 1.7, che il modello convesso, eq. 1.8 (fig. 12j-l). L'entità dei volumi di adacquamento e delle precipitazioni è inoltre mostrata nella fig. 12a-c.

L'esame dello stato idrico del suolo evidenzia come l'andamento dei valori del contenuto idrico medio simulato dal modello, nella versione modificata, segue in generale quello dei valori misurati.

I risultati del test t di Student hanno evidenziato che solo quando si utilizza la versione modificata del modello, le differenze tra i contenuti idrici simulati e i corrispondenti misurati risultano statisticamente non significative e l'errore commesso (RMSE) non supera il valore di $0.03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

Anche con riferimento ai consumi traspirativi, il trend stagionale simulato dal modello modificato meglio interpreta la serie dei valori misurati (fig. 12 d-f), con un errore medio $\text{RMSE}=0.54 \text{ mm}$. Tuttavia, nonostante il modello modificato dimostri una migliore performance rispetto alla versione originaria nella stima della traspirazione effettiva, nei periodi immediatamente successivi agli interventi irrigui si verificano locali discrepanze tra i valori misurati e simulati della variabile. Infatti, se da una parte il modello simula incrementi istantanei di traspirazione come conseguenza di apporti idrici al suolo, dall'altra tali valori di picco non sono stati analogamente riscontrati sui valori misurati di traspirazione. Analoghi risultati sono stati ottenuti da Liu e Luo (2010) e Peng *et al.* (2007), che hanno sperimentalmente constatato la scarsa performance del modello FAO-56 a doppia componente nel simulare i valori di picco che si manifestano nei giorni subito dopo un evento di pioggia o irrigazione. Per la stagione 2010, le maggiori differenze osservate ($\text{RMSE}=0.78$) rispetto agli anni 2009 e 2011, possono essere una conseguenza dell'aver trascurato il contributo della capaci-

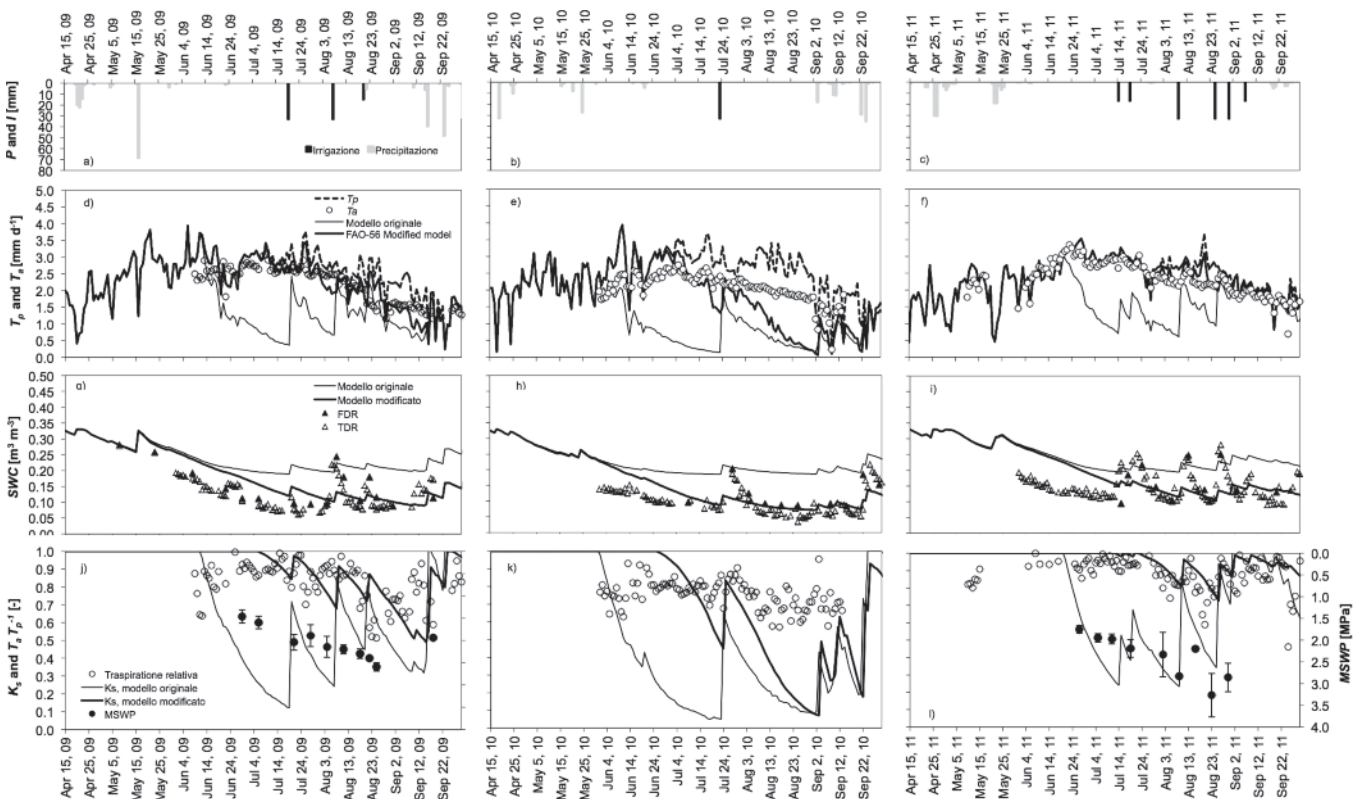


Fig. 12 - Olivo. Evoluzione temporale della traspirazione potenziale ed effettiva (d-f), dei valori misurati e simulati del contenuto idrico medio del suolo (g-i), della traspirazione relativa ($T_a T_p^{-1}$), del potenziale idrico del punto (MSWP) e del coefficiente di stress, K_s simulato utilizzando sia l'originale forma del modello FAO-56 che la versione modificata per la funzione di stress idrico (j-l). L'entità dei volumi di adacquamento e delle precipitazioni è riportata (a-c).

Fig. 12 - Olive. Time course of potential and actual transpiration fluxes (d-f), observed and simulated soil water content (g-i), measured relative transpiration, $T_a T_p^{-1}$, midday stem water potentials (MSWP) and simulated water stress coefficient, K_s . Precipitations and irrigations are also shown (a-c).

tanza della pianta (acqua immagazzinata negli organi assili e nei tessuti fogliari) al processo traspirativo simulato dal modello. Inoltre, i valori più elevati di traspirazione effettiva misurati in campo, rispetto a quelli simulati dal modello, possono essere connessi alla circostanza che in concomitanza a prolungati periodi di deficit idrico del suolo, la pianta attiva porzioni del sistema radicale differenti rispetto a quelle interne al serbatoio nel quale sono state condotte le misure di contenuto idrico del terreno.

La più rapida dinamica di riduzione della traspirazione simulata dalla versione originaria del modello è comunque la diretta conseguenza della relazione lineare assunta per rappresentare la funzione di stress idrico piuttosto che quella convessa, più realistica per la coltura in esame.

Il confronto tra i valori cumulati dei flussi di traspirativi effettivi simulati rispetto ai corrispondenti misurati (dati non riportati) ha evidenziato come alla versione originale del modello siano in generale associate significative sottostime dei flussi traspirativi stagionali. 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 prestazione 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.

Al fine di valutare la potenzialità del modello a predire il grado di stress idrico della coltura, la figura 12j-l mostra le dinamiche temporali della traspirazione relativa misurata ($T_a T_p^{-1}$) e dei valori di K_s simulati utilizzando sia l'originale funzione lineare di stress (eq. 1.7) che il modello convesso (eq. 1.8). I valori del punto *MSWP* sono mostrati lungo l'asse delle ordinate secondario. Entrambi i modelli, analogamente a quanto osservato per la traspirazione effettiva, determinano un rapido incremento del coefficiente di stress negli istanti immediatamente successivi all'irrigazione. Tuttavia, anche in questo caso il modello modificato permette di stimare meglio la dinamica della traspirazione relativa, permettendo quindi una più corretta definizione della condizione di stress idrico della coltura. D'altra parte, il coefficiente di stress simulato dal modello originale generalmente sottostima la traspirazione relativa a causa dell'inadeguata schematizzazione della funzione stress. L'osservazione di figura 12 evidenzia inoltre come il modello modificato simula valori di K_s sempre superiori a 0.6, come osservato in

campo in termini di traspirazione relativa, mentre il modello originale simula valori poco realistici di K_s , che raggiungono addirittura un minimo di circa 0.1. Nella figura si può altresì verificare come i coefficienti di stress idrico seguano il trend stagionale *MSWP*.

Con riferimento agli agrumi, le simulazioni sono state eseguite utilizzando il modello nella sua forma originale (Allen *et al.*, 1998), in quanto il modello FAO-56 riesce a descrivere con buona approssimazione le condizioni di stato idrico della pianta (Provenzano *et al.*, 2014). Riguardo alle performance del modello FAO-56 nel predire lo stato idrico del suolo, sono stati osservati errori di stima molto accettabili ($RMSE < 0.02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), evidenziando che il modello è abile a simulare i contenuti idrici medi di uno strato di suolo 0.1-0.7 m.

L'abilità del modello a predire le condizioni di stress idrico durante i periodi di restrizione idrica è stata studiata confrontando l'andamento dei valori *MSWP* con quello dei coefficienti di stress idrici (K_s) simulati dal modello. Le figure 13 e 14 mostrano, per i trattamenti T60 e T40, la dinamica temporale delle precipitazioni e irrigazioni, l'evapotraspirazione di riferimento (riga di grafici in alto), come pure i misurati valori di *MSWP* e i simulati coefficienti di stress idrico, K_s (riga di grafici intermedia). Nella riga di grafici in basso, le figure 13 e 14 riportano i cumulati valori dello stress idrico cumulato (S_{MSWP}) calcolato seguendo l'approccio di Myers 1988 e considerando un valore soglia di 1.0 MPa (González-Altozano and Castel, 1999); in uno stesso grafico e in asse secondario è riportato lo stress idrico cumulato (S_{FAO-56}) relativo al coefficiente K_s . Il periodo considerato per il calcolo sia di (S_{MSWP}) che (S_{FAO-56}) coincide con il periodo di restrizione idrica (luglio-agosto) previsto nei trattamenti T60 e T40.

In entrambe le tesi, il modello FAO-56 riesce a simulare una dinamica dello stato idrico, identificata nel K_s , molto simile a quella osservata monitorando i potenziali idrici. Anche considerando lo stress idrico cumulato durante il periodo di restrizione (riga di grafici in basso), è possibile osservare come i dati simulati S_{FAO-56} sono molto simili a quelli misurati S_{MSWP} , confermando l'abilità del modello a identificare le osservate differenze in termini di stress idrico cumulate tra le tesi.

Prospettive future per le specie arboree da frutto

L'impiego della modellistica agro-idrologica può consentire una corretta previsione delle dinamiche di stress idrico di importanti colture arboree mediterranee, quali l'olivo e gli agrumi, caratterizzate da una

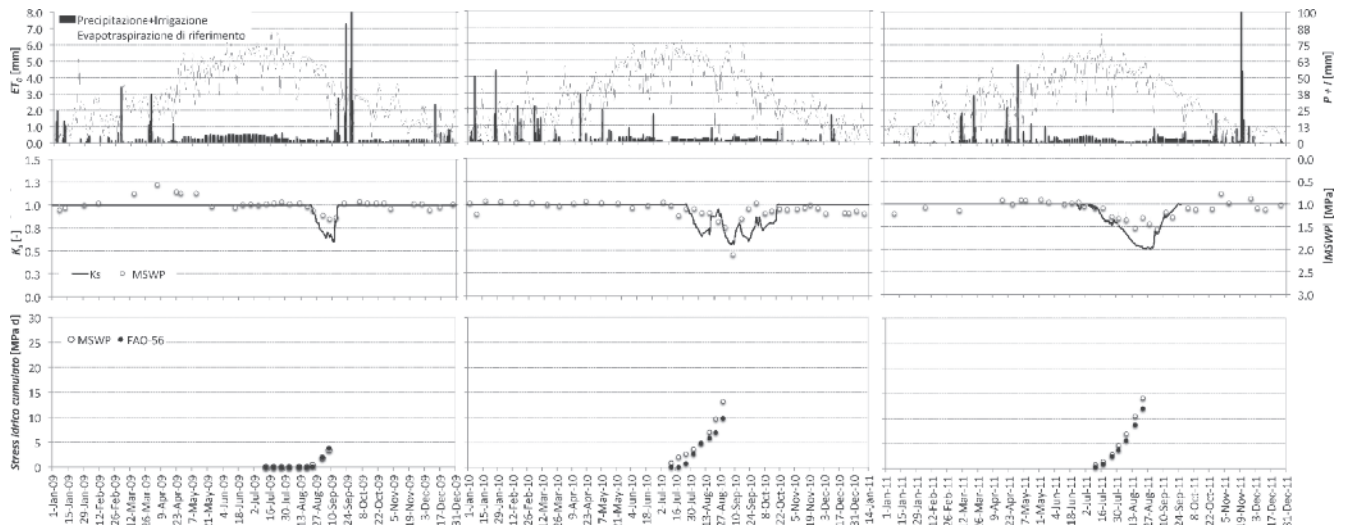


Fig. 13 - Agrumi, Trattamento T60. Dinamica temporale dell'evapotraspirazione di riferimento, delle precipitazioni e delle irrigazioni (grafici riga in alto); misurati valori del potenziali idrico del punto MSWP, e simulati valori del coefficiente di stress, K_s (grafici riga centrale); misurati e simulati valori dello stress idrico cumulato durante il periodo di restrizione (grafici riga in basso).

Fig. 13 - Citrus, Temporal dynamic of reference evapotranspiration, precipitation and irrigation events (upper row), measured mid day stem water potentials (MSWP) and simulated water stress coefficient, K_s (central row), measured and simulated water stress integral, during the periods of water restriction (lower row), referred to T60 treatment.

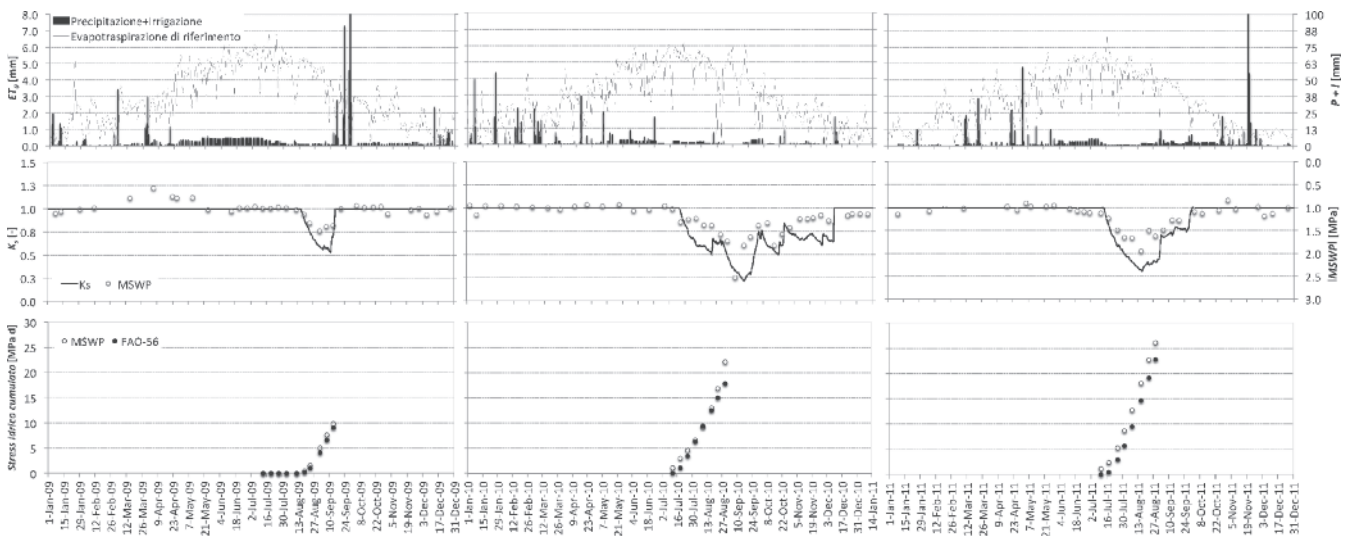


Fig. 14 - Agrumi. Dinamica temporale dell'evapotraspirazione di riferimento, delle precipitazioni e delle irrigazioni (grafici riga in alto); misurati valori del potenziali idrico dell'asse, MSWP, e simulati valori del coefficiente di stress, K_s (grafici riga centrale); misurati e simulati valori dello stress idrico cumulato durante il periodo di restrizione (grafici riga in basso) per la tesi T40.

Fig. 14 - Citrus, Time course of reference evapotranspiration, precipitation and irrigation events (upper row), measured midday stem water potentials (MSWP) and simulated water stress coefficient, K_s (central row), measured and simulated water stress integral, during the periods of water restriction (lower row) for the T40 treatment.

diversa risposta eco-fisiologica a condizioni di deficit idrico del suolo.

Per le colture resistenti alla siccità, come l'olivo, si è evidenziato che è importante schematizzare lo stress idrico seguendo funzioni non lineari, tipicamente convesse. Per gli agrumi, si è visto che la risposta eco-fisiologica al deficit idrico del suolo può schematizzarsi in maniera lineare e parametrizzata come suggerito dal quaderno FAO 56 (Allen *et al.*, 1998), standard di riferimento mondiale per la determinazione e gestione dei consumi idrici di tutte le colture agrarie.

Con riferimento alla potenzialità del modello a predire il grado di stress idrico dell'olivo, la modifica implementata nel modello ha permesso di stimare in modo migliore la dinamica della traspirazione relativa, permettendo quindi una più corretta definizione della condizione di stress idrico della coltura.

Nella sua forma originale, il modello FAO applicato agli agrumi riesce a simulare una dinamica dello stato idrico della coltura, identificata nel K_s , molto simile a quella osservata monitorando i potenziali idrici. Anche considerando lo stress idrico cumulato

durante il periodo di restrizione, è possibile osservare come i simulati valori si adattano bene con i misurati, confermando l'abilità del modello a identificare le osservate differenze in termini di stress idrico cumulate tra i trattamenti.

Tuttavia, i modelli semplificati non sono ancora in grado di descrivere con precisione lo stato idrico della pianta e, conseguentemente, valutano in maniera approssimata l'insorgenza di condizioni di stress idrico, come nel caso dell'olivo probabilmente per la sua notevole resistenza alla carenza idrica. E' comunque probabile che una maggiore interazione tra gli esperti in modellistica agro-idrologica e gli eco-fisiologi delle piante arboree possa portare porti allo sviluppo di specifici sub-modelli (funzioni di stress) capaci di istruire il modello stesso a simulare una più reale dinamica dello stato idrico della pianta.

Tra gli approfondimenti teorico-sperimentali ancora oggi necessari, quelli legati all'influenza dell'elevata disuniformità degli apparati radicali e dei relativi gradienti di contenuto idrico al suolo determinano inevitabili ripercussioni sui processi di attingimento idrico. I modelli di bilancio agro-idrologico oggi disponibili e ampiamente utilizzati anche nei sistemi più complessi, non danno indicazione sulla variabilità spaziale degli attingimenti radicali nell'intorno della pianta e pertanto rimane sempre un'alea d'incertezza in merito all'attendibilità delle calibrazioni eseguite sulla base delle misure di variabili legate esclusivamente al suolo (contenuto idrico e potenziale matriciale, acqua disponibile, depauperamento). Infine, l'inserimento di alcuni processi eco-fisiologici di resistenza/evitanza allo stress idrico messi in atto da alcune colture quali l'aggiustamento osmotico e/o il contributo della capacitanza degli organi assili (tronco e branche) e delle foglie ai flussi traspirativi della pianta possono migliorare le prestazioni dei modelli soprattutto per quei contesti dove la coltura viene gestita in condizioni di deficit idrico del suolo.

Riassunto

Il lavoro analizza le potenzialità applicative dell'uso della modellistica agro-idrologica nella previsione delle dinamiche di stress idrico di due importanti colture arboree Mediterranee (olivo e agrumi), caratterizzate da una diversa risposta eco-fisiologica a condizioni di deficit idrico del suolo. La tematica relativa allo studio della risposta eco-fisiologica delle colture e allo sviluppo di specifiche funzioni matematiche che correlano lo stress idrico delle colture alle variazioni di stato idrico del suolo viene trattata nella prima parte approfondendo, per olivo ed agrumi, la schema-

tizzazione della funzione di stress attraverso l'analisi di recenti sperimentazioni basate su serie di misure di campo legate allo stato idrico del suolo (contenuti idrici volumetrici) e della pianta (potenziali idrici xilematici e flussi traspirativi). È, inoltre, discussa l'applicabilità della procedura di bilancio agro-idrologico descritta nel quaderno FAO n. 56 per la previsione delle dinamiche di stress idrico delle colture.

Parole chiave: Modelli agro-idrologici; funzione di stress idrico; olivo; agrumi.

Bibliografia

- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D., SMITH M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper (56), Roma.
- BALLESTER C., CASTEL J., EL-MAGEED T.A.A., CASTEL J.R., INTRIGLIOLO D.S., 2014. *Long-term response of 'Clementina de Nules' citrus trees to summer regulated deficit irrigation*. Agr. Water Manag. 138: 78-84.
- BRUTSAERT W., 2005. *Hydrology - an introduction*. Cambridge University Press, New York, 605 pp. ISBN 0-521-82479-6.
- DIRKSEN C., KOOL J.B., KOOREVAAR P., 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.
- FEDDES R.A., KOWALIK P.J., ZARADNY H., 1978. *Simulation of field water use and crop yield*. Simulation Monographs. Pudoc. Wageningen. 189 pp.
- FERERES E., SORIANO M.A., 2007. *Deficit irrigation for reducing agricultural water use*. J. Exp. Bot. 58(2): 147-159.
- GARDNER W.R., 1991. *Modelling water uptake by roots*. Irrigat. Sci. 12: 109-114.
- GIRÓN I.F., CORELL M., MARTÍN-PALOMO M.J., GALINDO TORRECELLAS A., MORENO F., MORIANA A., 2015. *Feasibility of trunk diameter fluctuations in the scheduling of regulated deficit irrigation for table olive trees without reference trees*. Agr. Water Manag. 161: 114-126.
- GRANIER A., 1985. *Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres*. Ann. For. Sci. Vol: 42(2): 193-200.
- GRANIER A., 1986. *Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements*. Tree Physiol. 3: 309-320.
- GUSWA A.J., CELIA M.A., RODRIGUEZ-ITURBE I., 2004. *Effect of vertical resolution on predictions of transpiration in water-limited ecosystems*. Adv. Water Res. 27: 467-480.
- HOMAEI M., 1999. *Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress*. Ph.D. dissertation. Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands, p. 173.
- JENSEN M.E., BURMAN R.D., ALLEN R.G., 1990. *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70.
- KOCHLER M., KAGE H., STÜTZEL H., 2007. *Modelling the effects of soil water limitations on transpiration and stomatal regulation of cauliflower*. Eur. J. Agron. 26(4): 375-383.
- LIONELLO P., 2012. *The Climate of the Mediterranean Region: From the Past to the Future*. Elsevier. ISBN: 978-0-12-416042-2.
- MERRIAM J.L., 1966. *A management control concept for determining the economical depth and frequency of irrigation*.

- Transaction of American Society Agricultural Engineers. 9: 492-498.
- MORENO F., FERNANDEZ E., CLOTHIER B.E., GREEN S.R., 1996. *Transpiration and root water uptake by olive trees*. Plant Soil 184: 85-96.
- NIELSEN E.T., ORCUTT D.M., 1996. *Physiology of Plants under stress: abiotic factor*. John Wiley & Sons, Inc.
- PALLADINO M., STAIANO A., D'URSO G., MINACAPILLIC M., RALLO G., 2013. *Mass and Surface Energy Balance approaches for monitoring water stress in vineyards*. Procedia Environmental Sciences 19: 231-238.
- PROVENZANO G., GONZÁLES-ALTOZANO P., MANZANO-JUÁREZ J., RALLO G., 2015. *Using FAO-56 model to estimate soil and crop water status: Application to a citrus orchard under regulated deficit irrigation*. Geophysical Research Union 17: EGU2015-2884.
- RALLO G., BAIAMONTE G., MANZANO JUÁREZ J., PROVENZANO G., 2014. *Improvement of FAO-56 model to estimate transpiration fluxes of drought tolerant crops under soil water deficit: Application for olive groves*. J. Irrig. Drainage Eng. 140(9): A4014001.
- RALLO G., PROVENZANO G., 2013. *Modelling eco-physiological response of table olive trees (Olea europaea L.) to soil water deficit conditions*. Agr. Water Manag., 120: 79-88.
- REBETEZ M., DUPONT O., GIROUD M., 2006. *An analysis of the July 2006 heat wave extent in Europe compared to the record year of 2003*. Theor. Appl. Climatol., 95(1/2):1-7.
- SMITH M., 1991. *Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements*. FAO, Rom.
- STEDUTO P., HSIAO T.C., RAES D., FERERES E., 2009. *AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water AquaCrop*. Reference Manual.

Sitografia

- VAN DAM J.C., HUYGEN J., WESSELING J.G., FEDDES R.A., KABAT P., VAN WALSUM P.E.V., GROENENDIJK P., VAN DIEPEN C.A., 1997. *Theory of SWAP version 2.0. Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment*. Wageningen University and Alterra. Technical Document, 45. Disponibile su www.swap.alterra.nl.
- VAN GENUCHTEN M.TH. 1987. *A numerical model for water and solute movement in and below the root zone*, Reserch Report, US Salinity Lab., Riverside, CA. Disponibile su www.ars.usda.gov.