

POLITECNICO DI MILANO  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale



**IRRIGAZIONE PARSIMONIOSA E  
PRODUTTIVITÀ DELLE COLTURE  
TRAMITE MODELLISTICA ED  
ESPERIMENTI IN CAMPO E  
LABORATORIO**

Relatori: Prof. Chiara Corbari  
Prof. Marco Mancini

Tesi di laurea di:  
Laura Rozzoni Matr. 858616

Anno accademico 2016/2017



# Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto la mia relatrice, Prof. Corbari, per avermi dato la possibilità di lavorare a un progetto interessante e innovativo. Un caloroso ringraziamento al Prof. Mancini per essersi sempre interessato al lavoro svolto, specialmente in laboratorio. Un doveroso grazie anche a Roberto, che mi ha istruito a dovere sul funzionamento del lisimetro. Grazie a Millo, che ha sempre avuto una soluzione per ogni tipo di problema.



# Sintesi

Una corretta ed efficiente gestione della risorsa idrica ha acquistato negli anni sempre maggiore importanza, come conseguenza dell'aumento della richiesta d'acqua e degli effetti dei cambiamenti climatici. In particolare, è fondamentale risparmiare quanta più acqua possibile in campo agricolo, poiché questo settore in Italia è responsabile in media del 60% del consumo. Per questo motivo nella presente tesi si è deciso di studiare la risposta di due colture a un'irrigazione basata sulle soglie di stress idrico indicate dalla FAO, al fine di verificarne l'esattezza e valutarne l'applicabilità.

In questo elaborato di tesi, dopo una breve descrizione del setup sperimentale e del bilancio idrologico, vengono descritti i due esperimenti condotti nell'ambito dell'EnvLab presso il laboratorio Fantoli del Politecnico di Milano, durante i quali l'irrigazione è stata fornita in corrispondenza di un contenuto di umidità nel terreno prossimo alla condizione di stress. Il primo ha previsto il trapianto di nove piantine di pomodori, il secondo la semina delle erbe. Per entrambi i casi vengono mostrati tutti i dati raccolti, dai flussi idrologici all'altezza, dalla frazione di vegetazione alla resistenza stomatale.

Nella seconda parte della tesi, invece, sono riportate le calibrazioni del modello AquaCrop per diversi casi studio in laboratorio e campo, eseguite dopo un'opportuna analisi di sensibilità, con lo scopo di confrontare le produttività simulate e reali. Per alcuni casi studio, la modellazione è stata poi effettuata con le irrigazioni ottimali determinate nell'ambito del progetto europeo SIM ([www.sim.polimi.it](http://www.sim.polimi.it)) del Politecnico di Milano, al fine di valutarne l'effettivo vantaggio.



# Indice dei contenuti

<b>IRRIGAZIONE PARSIMONIOSA E PRODUTTIVITÀ DELLE COLTURE TRAMITE MODELLISTICA ED ESPERIMENTI IN CAMPO E LABORATORIO.....</b>	<b>I</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>I</b>
<b>SINTESI .....</b>	<b>III</b>
<b>INDICE DEI CONTENUTI.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPITOLO 1 L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE.....</b>	<b>5</b>
1.1 IL LISIMETRO .....	6
1.2 SETUP SPERIMENTALE .....	7
1.2.1 Strumentazione.....	8
1.2.2 Metodo di acquisizione dati .....	13
1.2.3 Parametri idraulici/idrologici del terreno .....	14
1.3 TECNICA DI IRRIGAZIONE E SOGLIE DI IRRIGAZIONE .....	15
1.4 TECNICA DELL'IRRIGAZIONE A GOCCIA .....	17
1.5 EVAPOTRASPIRAZIONE .....	18
1.6 FV E LAI .....	19
1.7 PROPRIETÀ DELLO SPETTRO FOGLIARE .....	20
1.8 RESISTENZA STOMATALE.....	21
1.9 PRIMO ESPERIMENTO: I POMODORI.....	23
1.9.1 Andamento delle variabili idrometeorologiche.....	26
1.9.2 Chiusura del bilancio .....	29
1.9.3 Altri dati osservati .....	30
1.10 SECONDO ESPERIMENTO: LE ERBETTE.....	34
1.10.1 Andamento delle variabili idrometeorologiche.....	37
1.10.2 Chiusura del bilancio .....	40
1.10.3 Altri dati osservati.....	41
<b>CAPITOLO 2 LA MODELLAZIONE CON AQUACROP .....</b>	<b>46</b>

---

2.1 AQUACROP .....	46
2.2 CENNI SUL PROGETTO SIM.....	55
2.3 INDICI STATISTICI E INDICATORI RIASSUNTIVI .....	56
2.4 ANALISI DI SENSIBILITÀ.....	57
2.5 CALIBRAZIONI .....	62
2.5.1 Pomodori: Puglia.....	62
2.5.2 Mais: Livraga.....	71
2.5.3 Mais: Calcinato .....	82
2.5.4 Laboratorio.....	88
<b>CAPITOLO 3 CONCLUSIONI.....</b>	<b>98</b>
<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....</b>	<b>101</b>

# Introduzione

L'incremento del fabbisogno idrico e l'impatto dei cambiamenti climatici hanno portato alla necessità di migliorare la gestione dell'acqua, anche in quelle regioni che generalmente ne hanno in abbondanza. In Italia il consumo a scopo irriguo è pari al 60% in media, con valori fino all'80% in alcune regioni italiane (Istat, 2010). Viste le enormi quantità della risorsa idrica utilizzate dall'agricoltura è evidente l'importanza di perfezionarne la gestione attraverso innovative tecniche di irrigazione. Negli anni sono stati sviluppati sistemi irrigui sempre più efficienti, ma un ulteriore progresso è costituito dall'irrigazione al bisogno, mediante l'utilizzo di sonde che rilevano l'umidità del terreno e facendo riferimento a soglie di stress definite *ad hoc* per ogni coltura. Tuttavia, sia per i costi che per la necessità di avere a disposizione un sistema di irrigazione a domanda e non a turno, la diffusione di questa pratica è ancora molto limitata. Ad ogni modo, i benefici che si possono trarre da questa tecnica sono consistenti, e per questo si è deciso di studiarla nella presente tesi.

La maggior parte delle colture ortofrutticole sono sensibili a carenze d'acqua anche piccole e di conseguenza normalmente necessitano dell'irrigazione per una produzione commerciale. Non garantire adeguati apporti idrici alla coltura porta a una minor produzione, ed eccedere nell'irrigazione costituisce un costo aggiuntivo inutile. Per questo è importante gestire le irrigazioni in modo ottimale.

Un metodo affidabile per stimare la richiesta idrica di una coltura è costituito da una semplice procedura che prevede la determinazione dell'acqua persa per evaporazione del suolo e traspirazione delle piante attraverso la moltiplicazione del coefficiente culturale ( $K_c$ ) derivato empiricamente per l'evapotraspirazione di riferimento ( $ET_0$ ) (Allen et al., 1998).

Attualmente, il modo più accurato per stimare il consumo d'acqua da parte di una coltura prevede l'utilizzo di un lisimetro, costituito da un grosso recipiente contenente terreno posto su una bilancia in grado di misurare direttamente le variazioni di massa dovute a irrigazione, pioggia ed evapotraspirazione. Esempi di colture studiate con il lisimetro includono alfaalfa, mais, cotone, soia e frumento (Evetts et al., 2000; López-Urrea et al., 2009a), broccoli (López-Urrea et al., 2009b), aglio (Ayars, 2007), uva (Williams et al., 2003a, 2003b), cipolla (López-Urrea et al., 2009c; Piccinni et al., 2009), pesca (Johnson et al., 2000, 2002), spinaci (Piccinni et al., 2009), mais dolce (Ayars et al., 1999) e pomodori (Ayars et al., 1999; Phene et al., 1985).

---

Se da un lato la ricerca scientifica studia da anni i comportamenti di diverse colture in risposta alle condizioni esterne, dall'altra si cerca di rendere fruibili queste informazioni alle persone che lavorano, anche indirettamente, con esse. Per questo motivo è nato AquaCrop, un software sviluppato dalla FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) che permette di valutare gli effetti dell'ambiente e della gestione del campo e dell'irrigazione sulla produzione di diverse colture. Infatti, la produzione del cibo e il consumo idrico sono inestricabilmente legati. L'acqua, infatti, è certamente il principale fattore limitante nella produzione delle colture in quelle zone del mondo dove la precipitazione non è sufficiente a soddisfare la richiesta idrica delle piante (Steduto et al., 2012). In uno studio correlato alla presente tesi, AquaCrop è stato calibrato e validato per i pomodori da industria nel Sud Italia, al fine di confrontare diverse strategie di irrigazione dalle prospettive economica e produttiva (Rinaldi et al., 2011). Altri studi hanno visto la validazione di AquaCrop per campi di mais (Heng et al., 2008; Abedinpour et al., 2012), cotone (Farahani et al., 2008), orzo (Araya et al., 2010).

Il testo si articolerà in due parti, in ognuna delle quali l'umidità del suolo fa da protagonista: la prima è relativa all'attività sperimentale, l'altra riguarda l'attività modellistica.

L'attività sperimentale si è svolta nell'ambito dell'EnvLab, un progetto interdipartimentale che ha lo scopo di sviluppare una visione di insieme sulle problematiche inerenti all'Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, capire come funzionino ambiente e territorio, sperimentare dal vivo l'interrelazione tra componenti fisiche, chimiche e biologiche dei processi ambientali. In particolare, l'attività è stata svolta utilizzando un lisimetro, dove sono stati prima trapiantati dei pomodori, e poi seminate delle erbe.

Per quanto concerne l'attività modellistica invece, è stato utilizzato AquaCrop, Il software è stato usato per analizzare i dati di due diversi campi di pomodoro in Puglia, due campi di mais in Lombardia e le osservazioni degli esperimenti in laboratorio.

# CAPITOLO 1

## L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE

L'attività ha fatto uso di un lisimetro (Figura 1.1) presente in laboratorio, e si è articolata in due fasi:

- Primavera 2017, trapianto di pomodori;
- Autunno 2017, semina di erbe.

Questi due esperimenti costituiscono la continuazione di un progetto che ha visto in primis l'installazione in laboratorio del lisimetro e della relativa strumentazione, successivamente calibrata. In seguito, sono state eseguite tre prove di irrigazione: a scorrimento, per innalzamento di falda e a goccia, queste ultime sono state poi simulate con il modello FEST-EWB (Mantovani, 2016; Paleari, 2017). Infine, è stato eseguito un esperimento sulla gestione dell'irrigazione a goccia durante la crescita del basilico con relativa modellazione tramite FEST-EWB (Paleari, 2017).

La possibilità di misurare tutte le componenti del bilancio idrologico è un punto di forza della sperimentazione tramite l'utilizzo del lisimetro. Difatti negli studi a larga scala alcune componenti del bilancio, si pensi a evaporazione e percolazione, risultano assai difficili o addirittura impossibili da misurare.

I dati raccolti dai due esperimenti realizzati nell'ambito della presente tesi sono stati elaborati tramite codice Matlab.

Per l'analisi dei dati si è fatto uso della calibrazione degli strumenti quali radiometro e sonde di umidità, eseguita nell'ambito di un precedente lavoro di tesi (Paleari, 2017).



Figura 1.1 Lisimetro

## 1.1 Il lisimetro

I lisimetri sono strumenti usati per determinare l'evapotraspirazione e fare analisi sulla qualità dell'acqua. Sono usati da oltre 300 anni per determinare la quantità d'acqua usata dalla vegetazione, ma quelli di precisione sono stati sviluppati negli ultimi 50 anni. Il termine lisimetro deriva dalla composizione di due parole greche, *lysis* e *metron*, e letteralmente significa misura della dissoluzione, intesa come percolazione (Aboukhaled et al., 1982). Il lisimetro è un dispositivo, generalmente un serbatoio o una cisterna, in grado di definire il movimento d'acqua attraverso un volume di suolo. L'evapotraspirazione può essere determinata tramite bilancio idrico in due modi: direttamente con il bilancio di massa nel caso dei *weighing lysimeters* (come quello presente in laboratorio), o indirettamente con il bilancio di volume nel caso dei *non-weighing lysimeters*.

L'accuratezza dell'evapotraspirazione dipende dalla frequenza con cui viene effettuata la misura, dal tipo di bilancia utilizzata, dalla risoluzione. All'interno degli attuali lisimetri di precisione la miglior accuratezza riscontrata è pari a 0.05 mm, ma fa riferimento a strumenti aventi dimensione molto minore del nostro setup (almeno un ordine di grandezza più piccoli

rispetto al caso in esame) che invece presenta un'accuratezza di 0.22 mm. Tale valore è comunque soddisfacente per gli esperimenti eseguiti.

Le dimensioni del lisimetro variano a seconda del problema da analizzare, in particolare è fondamentale tenere conto dello sviluppo delle radici. L'estensione superficiale deve essere tale da poter disporre la coltura in maniera rappresentativa di una condizione di campo.

Il lisimetro può essere costituito da acciaio, oppure da materiali plastici o fibra di vetro, che riducono la conduzione di calore laterale e la capacità termica delle pareti rispetto all'acciaio.

Il lisimetro, a seguito di uno scavo, può essere posizionato direttamente in campo, al fine di studiare la coltura nel suo habitat reale e tenendo così conto dell'interazione con la vegetazione circostante (Bryla et al., 2010). Alternativamente si può costruire il setup in un ambiente riparato, come nel nostro caso e in quello di (Ghamarnia et al., 2015), dove le condizioni al contorno (radiazione, calore, fornitura d'acqua) sono maggiormente controllate. Ciò permette di studiare il comportamento delle colture al variare di tali condizioni e definire quali siano le situazioni di stress.

## 1.2 Setup sperimentale

Il lisimetro consiste in un volume di terreno asportato dal suolo e immesso in un cassone al cui interno e nelle immediate circostanze sono posti strumenti di misura. Il suo scopo principale è l'analisi dei flussi costituenti un bacino idrografico, che può essere schematizzato come un sistema aperto con entrate (precipitazioni e contributi sotterranei dei bacini adiacenti) e uscite (evapotraspirazione, deflussi superficiali e perdite sotterranee) (Figura 1.2).

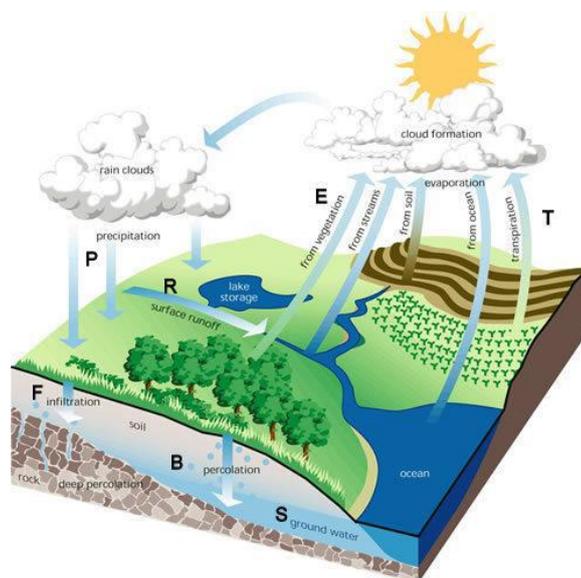


Figura 1.2 Flussi costituenti il bilancio idrologico

L'equazione di bilancio di massa per un generico bacino idrografico è data da:

$$P + Q_{in} + G_{in} - ET - Q_{out} - G_{out} - \Delta S_s - \Delta S_g - \varepsilon = 0 \quad \text{Eq. (1.1)}$$

Dove:

$P$  = precipitazione

$Q_{in}$  = portata superficiale entrante

$G_{in}$  = portata sotterranea entrante

$ET$  = evapotraspirazione

$Q_{out}$  = portata superficiale uscente

$G_{out}$  = portata sotterranea uscente

$\Delta S_s$  = variazione del volume d'acqua immagazzinata superficiale

$\Delta S_g$  = variazione del volume d'acqua immagazzinata sotterranea

$\varepsilon$  = termine di chiusura del bilancio

L'evapotraspirazione, elemento chiave del presente studio, è anche una componente del bilancio energetico del sistema suolo-pianta-atmosfera esprimibile come:

$$R_N = G + H + LE \quad \text{Eq. (1.2)}$$

$$LE = \lambda ET \quad \text{Eq. (1.3)}$$

Dove

$R_N$  = radiazione netta

$G$  = flusso di calore nel suolo

$H$  = calore sensibile

$LE$  = calore latente

$\lambda$  = calore latente di vaporizzazione (2.45 MJ/kg)

Nella Eq. (1.1) compare il termine  $\varepsilon$ , che rappresenta l'errore di chiusura. Tale elemento non corrisponde a un flusso idrologico reale e dal punto di vista teorico non dovrebbe esistere, in quando il bilancio è definito chiuso. Tuttavia, applicando il concetto a dati strumentali, affetti da errori, il bilancio non si chiuderebbe. Per questo motivo è necessario introdurre un termine legato agli errori di misura, al fine di permettere la chiusura del bilancio.

Nell'analisi sul lisimetro alcuni flussi non sono presenti e l'Eq. (1.1) si semplifica in:

$$P - ET - \Delta S_s - \varepsilon = 0 \quad \text{Eq. (1.4)}$$

### 1.2.1 Strumentazione

L'apparato strumentale è composto da un lisimetro completo di tutti gli strumenti necessari a misurare le componenti del bilancio idrologico. Le dimensioni del lisimetro sono

illustrate in Figura 1.3, i dispositivi usati sono raccolti in Figura 1.6 e Figura 1.7 e la loro disposizione è visibile in Figura 1.4. Inoltre, si è fatto uso di:

- Sei luci alogene (ridotte a quattro per l'esperimento con le erbette) aventi ciascuna una potenza nominale di 400 Watt;
- Un impianto di irrigazione a goccia;
- Un datalogger (Campbell Scientific CR3000);
- Un cassone in acciaio inox contenente il terreno e parte della strumentazione;
- Un porometro (Figura 1.8);
- Una lampada a raggi infrarossi e ultravioletti, solo per il secondo esperimento (Figura 1.8).

In Figura 1.5 è illustrata la disposizione delle sonde di umidità lungo tutta la profondità del lisimetro. Le sonde più superficiali (#7 e #8) sono affiancate e poste in modo che la #8 si trovi sotto un gocciolatore.

In Tabella 1.1 sono riportate le caratteristiche specifiche degli strumenti

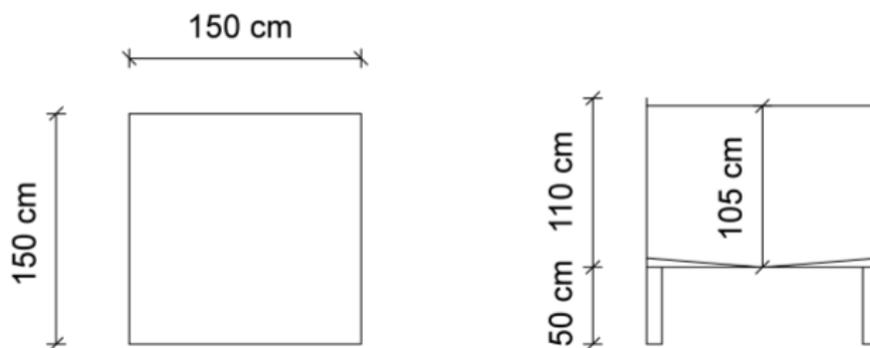


Figura 1.3 Dimensioni del lisimetro

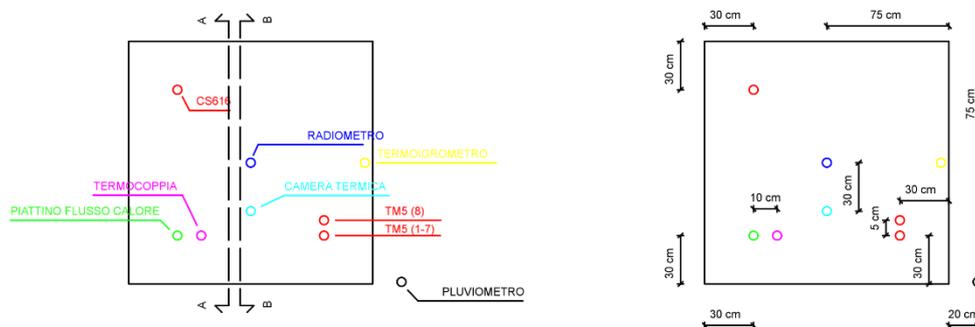


Figura 1.4 Vista dall'alto della posizione degli strumenti

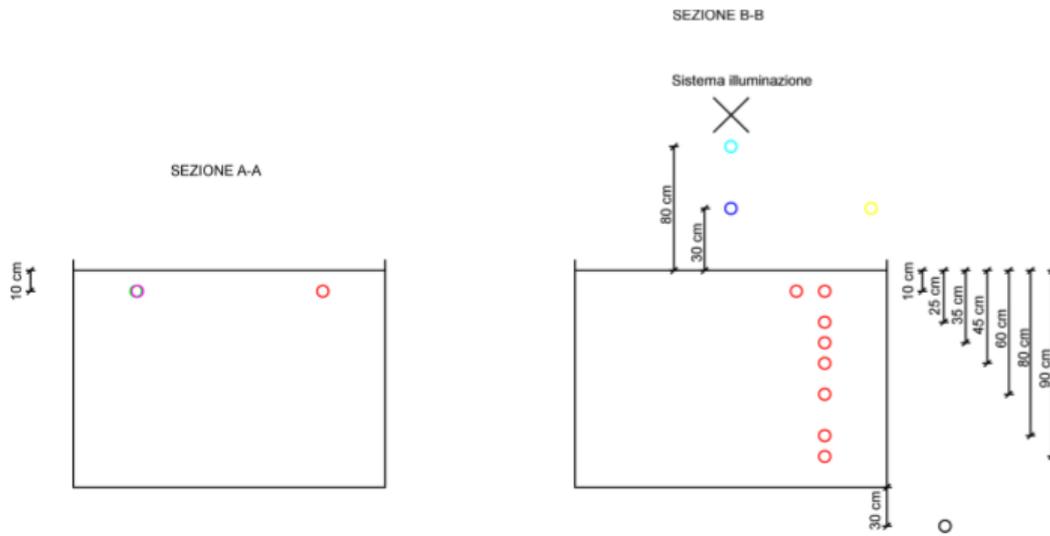


Figura 1.5 Sezioni del lisimetro



(a) Bilancia



(c) Sonda di umidità Tm5



(b) Indicatore della bilancia



(d) Piattino misuratore flusso calore

Figura 1.6 Strumentazione



(a) Radiometro visto dall'alto



(c) Termoigrometro



(b) Termocamera durante misurazione



(d) Pluviometro

Figura 1.7 Strumentazione



Figura 1.8 Porometro (a sinistra) e lampada ai raggi IR e UV (a destra)

La lampada a raggi infrarossi e ultravioletti è prodotta dal marchio TOPLANET, ha una potenza di 300 Watt ed emette radiazioni con lunghezze d'onda appartenenti alla banda dell'ultravioletto, del visibile (tra 430 nm e 660 nm) e dell'infrarosso. I raggi UV contribuiscono ad annientare eventuali batteri, mentre quelli infrarossi favoriscono la divisione cellulare e la produttività.

Strumento: Pluviometro (Young 52202)		
Variabile misurata: Percolazione profonda	Accuratezza: 2% fino a 25 mm/h, 3% fino a 50 mm/h	U.M.: mm <sup>3</sup>
Strumento: Termoigrometro (Campbell Scientific HMP155A-L)		
Variabile misurata: Temperatura e umidità dell'aria	Accuratezza: tra -20°C e +40°C: ±0.8%	U.M.: °C e %
Strumento: Radiometro (Kipp e Zonen CNR4)		
Variabile misurata: Radiazione entrante e uscente	Accuratezza: ±5% sul totale giornaliero	U.M.: W/m <sup>2</sup>
Strumento: Sonda di umidità (Decagon 5Tm)		
Variabile misurata: Umidità e temperatura del suolo	Accuratezza: ±0.03 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> (±3%VWC)	U.M.: m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Strumento: Piattino del flusso di calore (Hukseflux HFP01)		
Variabile misurata: Flusso di calore nel terreno e temperatura	Accuratezza: ±3%	U.M.: W/m <sup>2</sup>
Strumento: Termocamera (FLIR T450sc)		
Variabile misurata: Temperatura superficiale	Accuratezza: 0.1°C	U.M.: °C
Strumento: Bilancia (Dini Argeo)		
Variabile misurata: Peso del sistema	Accuratezza: 0.5kg	U.M.: kg
Strumento: Spettrometro (Apogee SS-110)		
Variabile misurata: Spettro riflesso	Accuratezza: 3 nm	U.M.: nm
Strumento: Porometro (Decagon Devices, Inc.)		
Variabile misurata: Resistenza stomatica	Accuratezza: ±10%	U.M.: s/m

Tabella 1.1 Strumenti di misura adottati

### 1.2.2 Metodo di acquisizione dati

Tutti gli strumenti di misura, eccetto la pesa e il porometro, comunicano con un datalogger, che riceve in ingresso da ognuno un impulso elettrico in millivolt e tramite equazioni fornite dai produttori dei dispositivi calcola il valore corrispondente nell'unità di misura dello strumento, salvando il dato al suo interno. Le rilevazioni hanno un intervallo di campionamento che va dal millisecondo al minuto, e vengono mediate su finestre temporali di 10 minuti. Tale durata è stata scelta nel corso dei precedenti studi con il lisimetro, in quanto permette di valutare cambiamenti di peso e umidità in maniera sufficientemente graduale, senza eccedere nel frazionamento di intervalli di tempo.

Il datalogger (Figura 1.9) è collegato ad un computer, sul quale è possibile visualizzare in tempo reale i valori misurati dagli strumenti. Grazie a questo è stato possibile determinare

l'accensione e lo spegnimento del sistema di irrigazione sulla base dei livelli di umidità nel terreno.

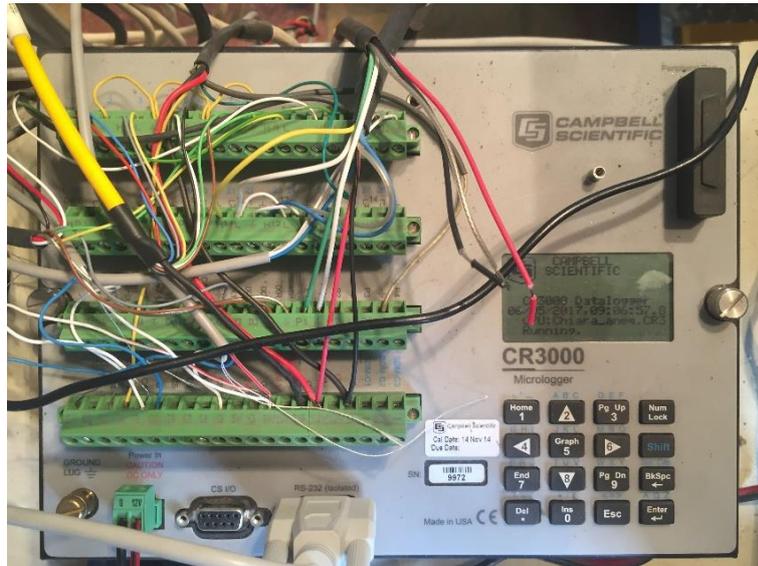


Figura 1.9 Datalogger CR3000

Anche la bilancia è stata collegata al computer sul quale, grazie a un software fornito dalla Dini Argeo, è stato possibile salvare i dati di peso. L'intervallo di campionamento era eccessivo ma non modificabile, per questo motivo è stato necessario estrarre manualmente i dati ogni 10 minuti, per renderli compatibili con le serie del datalogger.

Durante gli esperimenti è capitato che il computer si spegnesse di notte o nei fine settimana, o a causa di un blackout o per via di aggiornamenti del sistema operativo, con la conseguente mancanza di dati relativi alla bilancia per diverse ore. Tale problema è stato sopperito interpolando i dati registrati basandosi sull'esperienza dei giorni precedenti.

Il porometro invece è uno strumento usato singolarmente in occasioni specifiche, ad esempio prima e dopo l'irrigazione. I risultati, essendo pochi, sono stati trascritti manualmente.

### 1.2.3 Parametri idraulici/idrologici del terreno

Il terreno presente all'interno del cassone è un terreno di riporto di tipo argilloso-limoso, in cui sono stati rimossi la maggior parte dei grani con diametro superiore ai 5 mm. In Tabella 1.2 sono riportati i parametri idraulici/idrologici, determinati nell'ambito di precedenti studi.

- $\theta_s$  = valore di saturazione del terreno;
- FC = capacità di campo, pari alla massima altezza percentuale d'acqua capillare trattenuta da un suolo in assenza di percolazione;

- WP = punto di appassimento, pari alla minima altezza percentuale in volume che può essere utilizzata dalle piante;
- Ksat = permeabilità a saturazione.

$\theta_s$	FC	WP	Ksat
30%	26%	16%	$6.94 \cdot 10^{-6}$

Tabella 1.2 Parametri del terreno

## 1.3 Tecnica di irrigazione e Soglie di irrigazione

La metodologia adottata per le irrigazioni e quella di effettuare l'irrigazione solo al raggiungimento dell'umidità del suolo delle cosiddette soglie di stress della pianta e immettere acqua fino al raggiungimento della capacità di campo.

L'utilizzo delle soglie di irrigazione ha lo scopo di massimizzare la produttività riducendo al minimo il consumo di acqua. La disponibilità di acqua per la pianta è dettata dalla differenza tra il valore di FC e quello di WP. In assenza di un continuo contributo irriguo o di precipitazione atmosferica, il contenuto d'acqua all'interno della zona di assorbimento radicale diminuisce come conseguenza del prelievo della coltivazione e dell'evaporazione per effetto del sole. La disponibilità totale d'acqua (TAW) è definita dalla FAO in (Allen et al., 1998) come:

$$TAW = 1000(q_{FC} - q_{WP})Z_r \quad \text{Eq. (1.5)}$$

Dove:

TAW = Acqua totale disponibile (Total Available Water) in mm;

$q_{FC}$  = quantitativo d'acqua a capacità di campo ( $m^3/m^3$ );

$q_{WP}$  = quantitativo d'acqua al punto di appassimento ( $m^3/m^3$ );

$Z_r$  = profondità massima alla quale le radici possono prelevare acqua (m).

Le piante assorbono in maniera continua l'acqua disponibile nel terreno, che viene trattenuta con forza sempre maggiore dalla tensione matriciale (funzione di forze di interfaccia, coesione e gravità). Il punto di appassimento è definito nel momento in cui la pianta è impossibilitata nel prelevare acqua dal terreno.

La soglia di stress invece corrisponde a un livello di umidità del terreno superiore a quella del punto di appassimento, e viene definita come la situazione in cui la pianta non riesce ad assorbire l'acqua con velocità sufficiente per far fronte alla richiesta di traspirazione. Infatti, il prelievo di acqua è considerevolmente ridotto prima di raggiungere il punto di appassimento, perché la capacità di assorbimento delle radici non riesce a vincere le forze che trattengono l'acqua nel terreno. Se la pianta si trova in situazione di stress per un tempo sufficientemente lungo, la sua crescita può essere fortemente compromessa.

La porzione d'acqua prelevabile fino al raggiungimento della soglia di stress, avendo come condizione iniziale la capacità di campo, è data dalla Eq. (1.6) :

$$RAW = p TAW \quad \text{Eq. (1.6)}$$

Dove:

RAW = Acqua immediatamente disponibile (Readily Available Water) in mm;

p = fattore di diminuzione.

I valori del fattore di diminuzione sono stati individuati per le principali colture dalla FAO (Allen et al., 1998) e variano generalmente tra 0.3 per piante con radici superficiale ad alto tasso di ET (>8 mm/giorno) e 0.7 per piante con radici profonde a basso tasso di ET (<3 mm/giorno). Il fattore p è una funzione del potere evaporante dell'atmosfera e i valori tabulati si riferiscono a condizioni climatiche medie. Se il clima è caldo e secco, quindi l'ET è consistente, il fattore di diminuzione è inferiore del 10-25% rispetto ai valori tabulati. Al contrario, se ET è piccola, p sarà incrementato del 20%.

Per quanto riguarda l'esperimento sui pomodori è stato scelto un valore di prova di 0.52 superiore a quello tabulato, pari a 0.4. Per le erbe invece non esiste un valore tabulato e inizialmente è stato quindi preso in considerazione quello della lattuga (0.3), successivamente ridotto a 0.26. Da questi dati sono state definite le soglie di stress secondo la Eq. (1.7):

$$U_{stress} = FC - p (FC - WP) \quad \text{Eq. (1.7)}$$

Ottenendo:

$$U_{stress\ pomodori} = 0.207;$$

$$U_{stress\ erbe\ (1)} = 0.230;$$

$$U_{stress\ erbe\ (2)} = 0.234.$$

Durante l'esperimento con i pomodori, dopo circa tre settimane dal trapianto, si è notato che alcune foglie presentavano parti secche. Dal momento che nei giorni precedenti le luci erano state lasciate accese anche di notte con l'intento di velocizzare la crescita, si è pensato fosse questo il motivo dello stress, e di conseguenza si è deciso di accenderle per molte meno ore, senza cambiare la soglia di stress. Dopo questo accorgimento le piante hanno continuato a crescere, le nuove foglie erano verdi e ben idratate mentre quelle un po' secche non hanno subito cambiamenti. La fioritura purtroppo non è avvenuta, la causa non è certa. Potrebbe essere dovuto allo stress della troppa luce, di una radiazione troppo intensa, oppure a causa della scelta della soglia troppo bassa, o ancora alla mancanza di sufficienti nutrienti nel terreno. Non essendo presente il frutto, non è stato possibile fare delle valutazioni sulla produttività.

Nell'esperimento delle erbe invece, complice il fatto di aver spento due delle sei luci alogene, l'aver utilizzato una lampada a infrarossi e l'aver evitato di tenere accese le luci di notte, non si

sono riscontrati problemi di secchezza. Dopo un mese dalla semina però le foglie apparivano cascanti, per cui si è deciso di alzare da soglia di stress.

Le irrigazioni sono state definite dalle soglie di stress, ovvero si è cercato di irrigare quando la sonda di umidità superficiale #8 segnalava un'umidità pari alla soglia. Nel caso di ponti e festività si è preferito irrigare prima piuttosto che lasciare scendere l'umidità troppo al di sotto del valore prefissato.

## 1.4 Tecnica dell'irrigazione a goccia

L'irrigazione a goccia è una tecnica che somministra lentamente acqua alle piante, sia depositando l'acqua sulla superficie del terreno contigua alla pianta o direttamente alla zona della radice. La distribuzione dell'acqua avviene attraverso un sistema a rete che comprende valvole, condotte e vari tipi di gocciolatori. L'obiettivo di minimizzare l'utilizzo dell'acqua si ottiene ottimizzando le aree irrigate, che tenderanno a corrispondere alle zone dove effettivamente è presente la coltura, limitando contemporaneamente l'evaporazione dal suolo e il deflusso profondo dell'acqua irrigata essendo questa fornita sotto forma di gocce. L'irrigazione a goccia superficiale o SDI (Surface Dip Irrigation) per distribuire l'acqua fa uso di ali gocciolanti, ovvero tubi nei quali sono inseriti i gocciolatori, che possono essere rigide o flosce a seconda della loro funzione. In Figura 1.10 è riportata a titolo di esempio la disposizione delle ali gocciolatrici adottata nell'esperimento che prevedeva la coltura delle erbe.

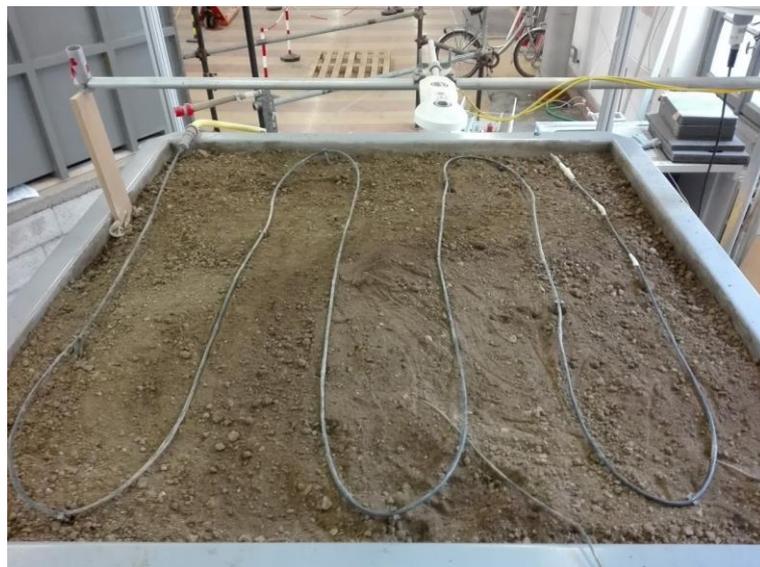


Figura 1.10 Ali gocciolatrici disposte per l'esperimento delle erbe

Un sistema molto avanzato d'irrigazione a goccia, ma ancora poco diffuso in Italia, prevede l'interramento delle ali. In questo modo i gocciolatori si possono trovare a diretto contatto con l'apparato radicale e allo stesso tempo in superficie non sono presenti tubi che possono essere d'intralcio durante le operazioni colturali.

Un impianto di irrigazione a goccia ben progettato è in grado di esplicitare notevoli vantaggi, come ad esempio una migliore uniformità di distribuzione dell'acqua, un maggior contenimento degli sprechi, la possibilità di sfruttare l'impianto per diffondere concimi (fertirrigazione), una minore compattazione del terreno, la possibilità di veicolare alcuni particolari tipi di fitofarmaci nell'acqua irrigua evitando che questi vengano a contatto con le piante o si disperdano nell'aria e la possibilità di applicare piccole dosi di acqua molto frequentemente, andando maggiormente incontro alle esigenze delle piante.

In quelle regioni dove le forniture d'acqua sono fortemente limitate possono non esservi risparmi consistenti ma un aumento della produzione a parità della quantità d'acqua utilizzata. In questi casi si conseguirà un maggiore rendimento di utilizzazione dell'acqua (quintali di produzione agricola/metri cubi di acqua consumati) rispetto alla distribuzione a pioggia e ancor maggiore rispetto a quella per infiltrazione da solchi o a scorrimento.

In regioni molto aride oppure nei suoli sabbiosi, con l'irrigazione a goccia si possono distribuire dosi molto basse di acqua frequentemente, conseguendo dei buoni risparmi idrici.

## 1.5 Evapotraspirazione

La valutazione del valore di evapotraspirazione è centrale nell'analisi dell'equazione del bilancio idrologico Eq. (1.1). All'interno del nostro sistema non sono presenti alcuni dei flussi idrologici presenti in natura, quali ruscellamento superficiale, pioggia, portate sotterranee in ingresso e in uscita. Nel corso di entrambi gli esperimenti le sonde di umidità posizionate a una profondità superiore a 25 cm hanno rilevato dati poco variabili, come si nota in Figura 1.17 e in Figura 1.33, pertanto si può supporre invariata la quantità di acqua stoccata al di sotto di tale profondità.

Questo porta a una notevole semplificazione del bilancio di massa del ciclo idrologico che può essere scritto come nella Eq. (1.8):

$$P - ET - \Delta S_s - \varepsilon = 0 \quad \text{Eq. (1.8)}$$

Dove

P = precipitazione, in questo caso rappresentata dalle irrigazioni;

ET = evapotraspirazione;

$\Delta S_s$  = acqua stoccata negli strati superficiali.

Ad eccezione dei brevi periodi in cui avveniva l'irrigazione, dove il termine P non è nullo, le variazioni di peso evidenziate dalla bilancia rappresentavano le variazioni di peso degli strati superficiali, ed indicano dunque il valore di ET.

È stata calcolata l'evapotraspirazione potenziale secondo la formula di Penman-Monteith (Eq. (1.9)), che è stata poi inserita come input in AquaCrop nella seconda parte della tesi.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Eq. (1.9)}$$

Dove:

$ET_0$  = evapotraspirazione di riferimento [mm/giorno];

$R_n$  = radiazione netta sulla superficie della coltura [ $\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$ ];

$G$  = densità del flusso di calore nel suolo [ $\text{MJ m}^{-2} \text{giorno}^{-1}$ ];

$T$  = temperatura media giornaliera a 2 metri di altezza [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$u_2$  = velocità del vento a due metri d'altezza [m/s];

$e_s$  = pressione di vapore saturo [kPa];

$e_a$  = pressione di vapore effettiva [kPa];

$e_s - e_a$  = deficit di pressione di vapore saturo [kPa];

$\Delta$  = pendenza della curva di pressione di vapore [ $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ];

$\gamma$  = costante psicrometrica [ $\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$ ].

Nei nostri esperimenti, essendo in laboratorio, la velocità del vento era praticamente nulla; pertanto questa componente è stata trascurata.

La costante psicrometrica è stata calcolata con le Eq. (1.10) e Eq. (1.11):

$$\gamma = 0.665 \cdot 10^{-3} P \quad \text{Eq. (1.10)}$$

$$P = 101.3 \left( \frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad \text{Eq. (1.11)}$$

Con  $z=130$ .

La pendenza della curva di pressione di vapore è calcolata con l'Eq. (1.12):

$$\Delta = 4098 \frac{e_s}{(T + 273.3)^2} \quad \text{Eq. (1.12)}$$

## 1.6 FV e LAI

Durante gli esperimenti le piante sono cresciute modificandosi in forma e dimensione. Per determinare in maniera oggettiva questo processo sono stati valutati i parametri FV e LAI.

La FV (Frazione di Vegetazione) e il LAI (Leaf Area Index) sono due parametri adimensionali che identificano rispettivamente la copertura da parte della vegetazione di un'area in esame e una misura della superficie fogliare per unità di superficie del suolo.

Il valore di FV è stato determinato tramite l'analisi delle fotografie del visibile, eseguite dalla termocamera posta al di sopra delle piante per tutta la durata degli esperimenti. Le fotografie sono state processate tramite codice Matlab per determinare la porzione di terreno coperto da vegetazione. La zona fotografata è un rettangolo di 60 cm per 35 cm, nell'esperimento dei pomodori all'interno dell'area era presente una sola pianta, mentre in quello delle erbe un numero imprecisato di piante. Il LAI è correlato in modo univoco al valore di FV secondo l'Eq. (1.13) derivata dallo studio di (Choudhury, 1987).

$$LAI = \frac{-\ln(1 - FV)}{0.3} \quad \text{Eq. (1.13)}$$

I valori ottenuti sono riportati nei sottocapitoli dedicati agli specifici esperimenti.

## 1.7 Proprietà dello spettro fogliare

Oltre a FV e LAI, un'informazione sulla crescita delle piante è data anche variazione della riflettanza lungo la durata dell'esperimento.

All'interno dello spettro del visibile la riflettanza di una foglia, secondo (Corbin et al., 2015), è largamente influenzata dal contenuto di acqua e clorofilla i cui coefficienti di assorbimento variano significativamente all'interno dello spettro, come indicato in Figura 1.11 presa a riferimento dell'articolo (Hoffer, 1978). Come rappresentato in figura, la clorofilla assorbe maggiormente nelle regioni dei 400 e 700 nm. Valori compresi tra 700 e 1300 fanno riferimento alla materia cellulare. Lo spettrometro utilizzato per determinare lo spettro di radiazione riflessa delle foglie è stato il modello SS-110 della Apogee Instruments, avente come estremi delle misurazioni valori di radiazione pari a 340 e 820 nm. Lo strumento non era disponibile durante l'esperimento con i pomodori, le osservazioni sono pertanto riportate solo nel sottocapitolo relativo all'esperimento con le erbe.

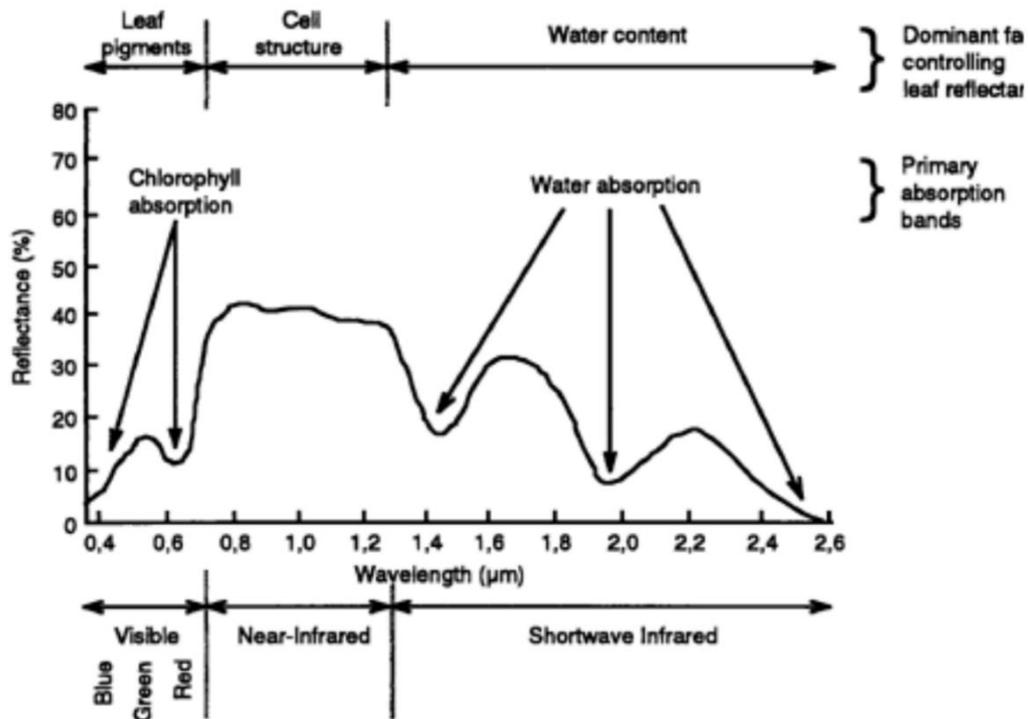


Figura 1.11 Spettro fogliare tipo e caratteri determinanti lo spettro

È stato inoltre calcolato, con la Eq. (1.14), il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), un indice multispettrale fortemente correlato al contenuto di clorofilla e utilizzato per quantificare la crescita delle piante.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{Eq. (1.14)}$$

dove NIR e RED rappresentano la riflettanza delle bande dell'infrarosso vicino e del rosso. L'indice NDVI varia tra -1 e +1, ma l'assenza di foglie verdi dà un valore vicino allo zero, mentre valori di 0.8/0.9 indicano la più alta densità possibile di foglie verdi.

Lo spettro del visibile relativo al colore rosso coinvolge le lunghezze d'onda da 620 nm a 750 nm, mentre il vicino infrarosso quelle tra 750 nm e 1400 nm. Per il calcolo dell'indice sono state considerate lunghezze d'onda fino a 820 nm, in quanto è il limite dello spettrometro.

## 1.8 Resistenza stomatale

Nel corso di questo studio si è fatto uso di uno strumento, il porometro, che misura la conduttanza stomatale delle foglie, ovvero del tasso di passaggio della CO<sub>2</sub> o dell'acqua attraverso gli stomi. La conduttanza stomatale è funzione della densità, della dimensione e del grado di apertura degli stomi, pori dall'apertura regolabile che hanno la funzione di assorbire

ed espellere CO<sub>2</sub> e umidità. Il porometro misura la conduttanza stomatale ponendo la conduttanza della foglia in serie con due elementi a conduttanza nota. Lo strumento misura l'umidità in tre punti, ovvero dentro la foglia e nelle posizioni dei due sensori di umidità, e con i valori rilevati calcola il flusso di vapore acqueo. A questo punto può determinare la conduttanza stomatale, misurando la resistenza tra la foglia e il primo sensore di umidità e tra il primo e il secondo, secondo lo schema di Figura 1.12.

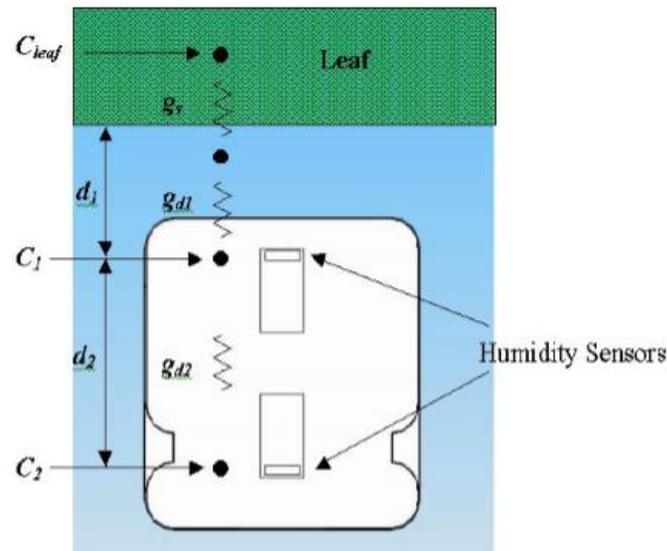


Figura 1.12 Schematizzazione del funzionamento del porometro

Lo strumento è in grado di fornire misure in mmol/m<sup>2</sup>s, m<sup>2</sup>s/mol e s/m, quest'ultima è l'unità di misura utilizzata e rappresenta la resistenza stomatale.

Lo strumento può operare in un ambiente tra i 5 e i 40 °C, che abbia dall'1 al 100% di umidità. Ha un'accuratezza del 10% e il range di misure si estende da 0 a 1000 mmol/m<sup>2</sup>s.

La parte fondamentale del porometro è la testa, capace di raccogliere informazioni come pressione di vapore e umidità, necessarie al porometro per calcolare la conduttanza stomatale della foglia.

La conduttanza stomatale della foglia dipende dalla quantità di luce e ombra che questa riceve, dalla sua età e dalla sua posizione sulla pianta. Per ottenere una conduttanza media è importante fare misure su diverse foglie.

Quando si prendono le misure è importante tener conto dei seguenti fattori:

- Luce  
La quantità di CO<sub>2</sub> necessaria alla pianta dipende dalla quantità di luce disponibile: più ce n'è, più la pianta richiede CO<sub>2</sub> e gli stomi rimangono aperti. Le foglie in ombra hanno quindi solitamente resistenza maggiore di quelle in piena luce;
- Temperatura

Per la maggior parte delle piante se l'ambiente è molto caldo o molto freddo la fotosintesi rallenta o si ferma, e gli stomi si aprono pochissimo o rimangono chiusi per prevenire perdite di acqua.

- Umidità  
Se l'umidità dell'ambiente cresce, gli stomi si aprono;
- Anidride carbonica  
Uno dei compiti degli stomi è regolare l'uso di CO<sub>2</sub> da parte della foglia, azione importante per mantenere l'idratazione delle foglie. Un aumento della CO<sub>2</sub> provoca la chiusura degli stomi.

## 1.9 Primo esperimento: i pomodori

Il primo esperimento è iniziato con il trapianto di nove piantine di pomodori il 22 maggio 2017 ed è terminato il 28 luglio 2017. Per l'irrigazione è stato utilizzato un tubo flessibile provvisto di gocciolatori in numero superiore a quello delle piante, per cui non è stato possibile far corrispondere ognuno di essi a un fusto. La condotta è stata fissata al terreno mediante dei picchetti, disponendola a serpentina in modo da formare tre ali gocciolatrici. È stata considerata una soglia di stress pari a 0.207. Dal 7 al 19 giugno (giorni giuliani 158 e 170) sono state lasciate le luci accese anche di notte, tranne nei fine settimana. Il 19 giugno si è notato che alcune foglie presentavano parti secche, perciò si è deciso di evitare un'esposizione così prolungata alla radiazione delle lampade.

Gli andamenti dell'umidità nella porzione superficiale del terreno sono visibili in Figura 1.13. Le irrigazioni, riportate in Tabella 1.3, sono state eseguite quando l'umidità rilevata dalla sonda #8 era prossima alla soglia.

Come si può notare sia dalla figura che dalla tabella sottostanti, nella seconda parte dell'esperimento e soprattutto nei giorni finali, si è data alle piante un minor quantità di acqua rispetto alla prima parte. Il motivo risiede nel fatto che si è cercato di ridurre l'evapotraspirazione (in realtà già molto minore rispetto all'inizio in quanto le luci rimanevano accese per solo poche ore) senza però mandare le piante in condizioni di stress.

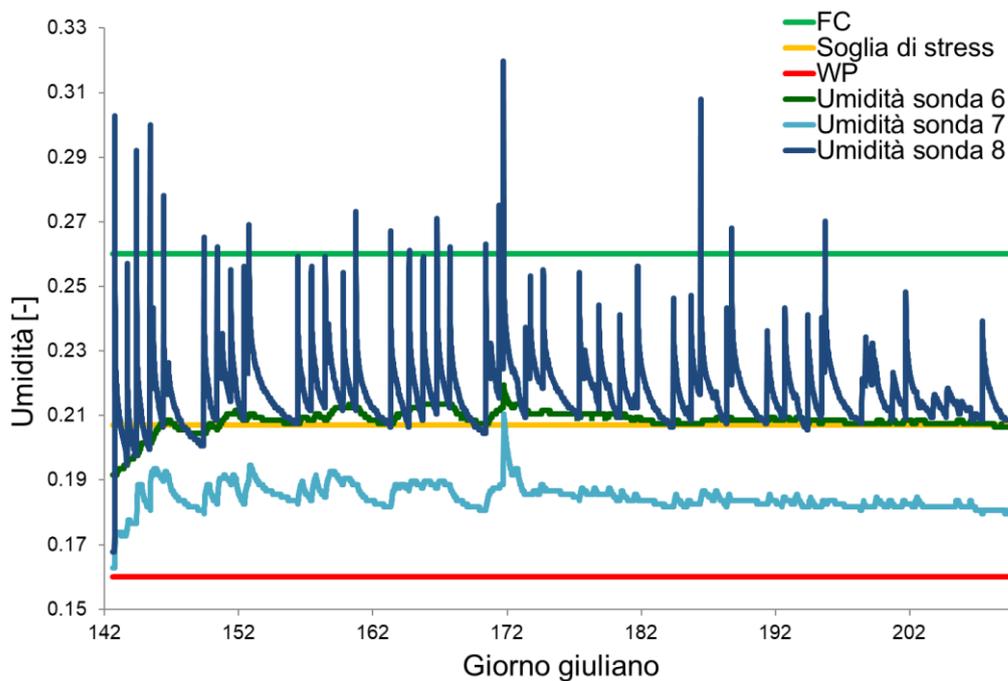


Figura 1.13 Profili di umidità del terreno: esperimento #1

Tabella 1.3 Irrigazioni pomodori e relative umidità

#	G. giuliano	U iniziale 7	U iniziale 8	Durata [min]	Δpeso [kg]	U finale 7	U finale 8
#1	142	0.182	0.167	37	25	0.163	0.300
#2	143	0.182	0.196	13	6	0.175	0.260
#3	144	0.183	0.187	9	9.5	0.176	0.290
#4	145	0.183	0.199	13	9.5	0.167	0.300
#5	145	0.183	0.218	6	4	0.193	0.243
#6	146	0.182	0.207	18	9.5	0.190	0.278
#7	146	0.192	0.216	9	4	0.192	0.225
#8	149	0.180	0.201	24	9.5	0.180	0.264
#9	150	0.184	0.209	20	8	0.182	0.263
#10	150	0.191	0.221	4	3.5	0.195	0.235
#11	151	0.190	0.214	43	9.5	0.189	0.252
#12	152	0.183	0.208	25	8	0.183	0.263
#13	152	0.189	0.223	10	5	0.189	0.250
#14	152	0.191	0.233	18	4	0.191	0.269
#15	156	0.184	0.207	33	7.5	0.189	0.223

#16	157	0.184	0.211	43	8	0.184	0.256
#17	158	0.185	0.213	33	7.5	0.185	0.259
#18	158	0.191	0.226	19	3	0.191	0.238
#19	159	0.189	0.211	26	9.5	0.189	0.254
#20	160	0.189	0.211	19	9.5	0.189	0.273
#21	163	0.182	0.207	15	6.5	0.182	0.267
#22	164	0.188	0.207	34	11	1.880	0.261
#23	165	0.188	0.208	22	10.5	0.189	0.259
#24	166	0.188	0.210	33	11	0.188	0.271
#25	167	0.188	0.212	26	10	0.188	0.262
#26	170	0.182	0.206	14	7.5	0.182	0.263
#27	170	0.187	0.214	9	3.5	0.187	0.232
#28	171	0.188	0.215	19	8	0.188	0.275
#29	171	0.187	0.214	15	10	0.195	0.320
#30	173	0.186	0.209	15	5	0.186	0.237
#31	173	0.185	0.221	10	4	0.186	0.253
#32	174	0.188	0.217	7	5	0.188	0.255
#33	177	0.185	0.209	8	5.5	0.185	0.254
#34	177	0.187	0.221	7	2.5	0.187	0.230
#35	178	0.186	0.212	12	4.5	0.186	0.244
#36	180	0.184	0.209	21	4.5	0.185	0.241
#37	181	0.184	0.212	10	1.5	0.186	0.216
#38	181	0.185	0.213	14	5	0.185	0.256
#39	184	0.182	0.207	16	4.5	0.182	0.246
#40	185	0.183	0.208	10	4.5	0.183	0.247
#41	185	0.183	0.208	10	4.5	0.183	0.247
#42	186	0.184	0.217	10	5.5	0.184	0.270
#43	188	0.182	0.207	15	4.5	0.183	0.243
#44	188	0.184	0.219	14	4.5	0.184	0.268
#45	191	0.182	0.207	13	4	0.183	0.236
#46	192	0.185	0.209	12	4.5	0.185	0.243
#47	192	0.185	0.209	12	4.5	0.185	0.243
#48	194	0.182	0.206	16	5	0.182	0.241
#49	195	0.182	0.210	18	5	0.183	0.240

#50	195	0.183	0.223	15	5	0.183	0.270
#51	198	0.181	0.207	9	3	0.182	0.221
#52	198	0.183	0.220	7	1.5	0.183	0.221
#53	198	0.182	0.219	10	2	0.182	0.234
#54	199	0.182	0.219	10	2	0.182	0.232
#55	200	0.183	0.209	15	3	0.183	0.223
#56	201	0.183	0.210	15	5.5	0.183	0.248
#57	202	0.183	0.212	15	2	0.183	0.215
#58	203	0.182	0.210	15	2	0.182	0.216
#59	204	0.182	0.212	15	2	0.182	0.218
#60	205	0.183	0.210	15	2.5	0.182	0.215
#61	207	0.180	0.208	30	5	0.181	0.239

### 1.9.1 Andamento delle variabili idrometeorologiche

In Figura 1.14, Figura 1.15, Figura 1.16 e Figura 1.17 sono riportati i grafici delle principali variabili idrologiche e meteorologiche misurate durante l'esperimento. Come precedentemente spiegato, tra i giorni giuliani 158 e 170 le luci sono rimaste accese anche di notte, e spente solo nei fine settimana, come si può notare dai grafici della radiazione lunga e della temperatura del suolo. Dal giorno 173 le ore di luce sono state considerevolmente ridotte fino a 4/5 per evitare di produrre ulteriore stress alle piante.

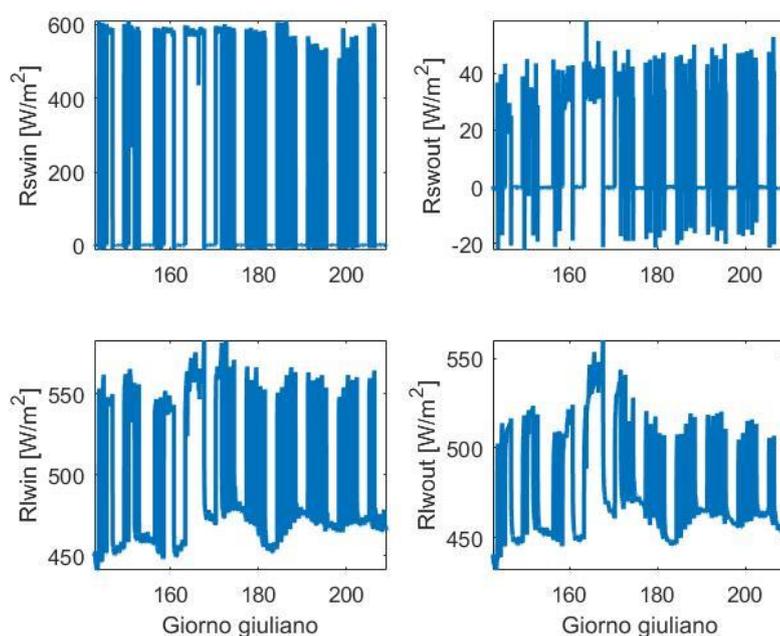


Figura 1.14 Radiazione corta e lunga, entrante e uscente

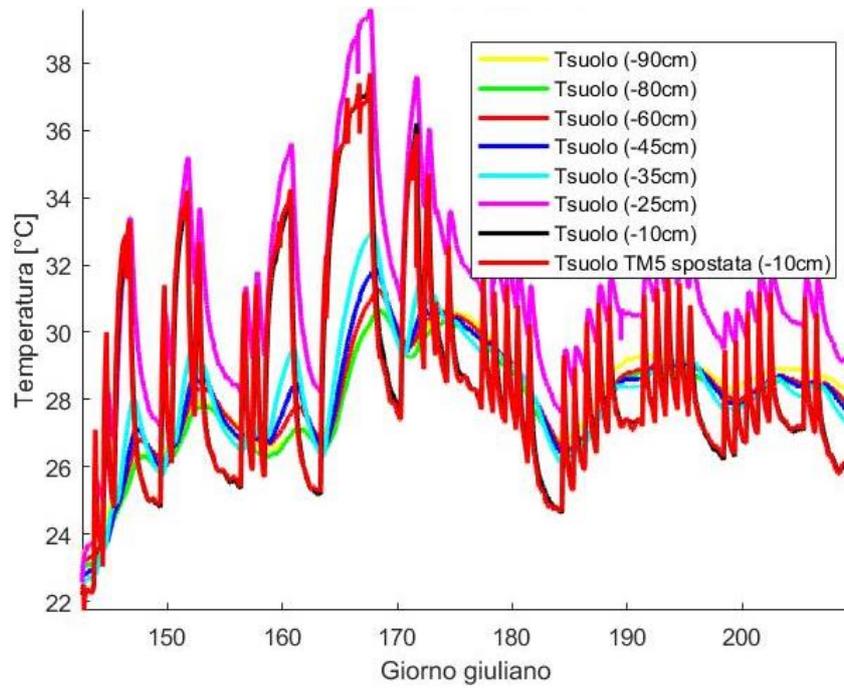


Figura 1.15 Profili di temperatura del suolo

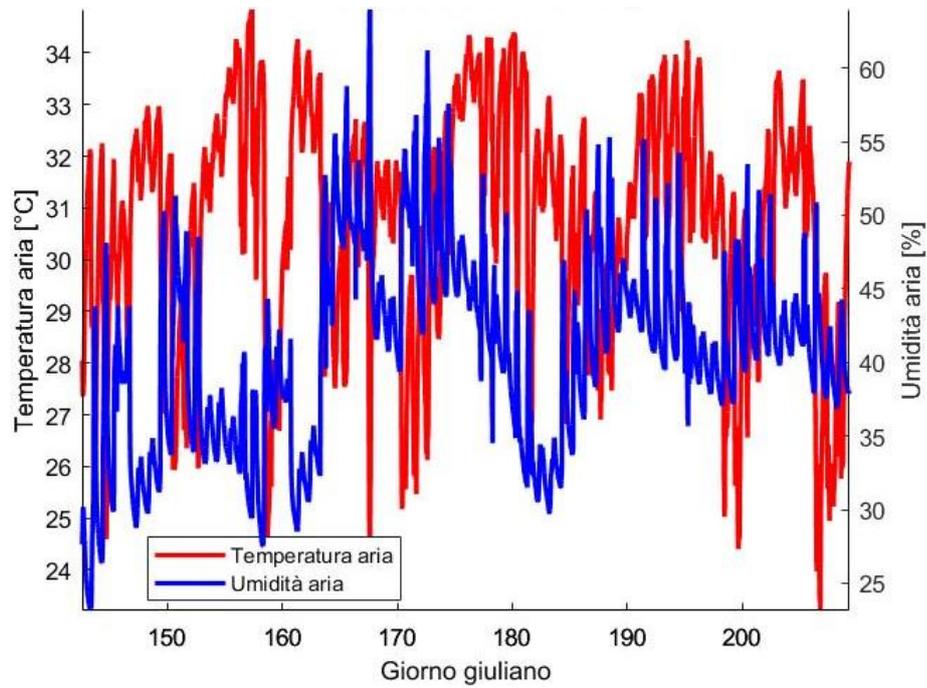


Figura 1.16 Temperatura e umidità dell'aria

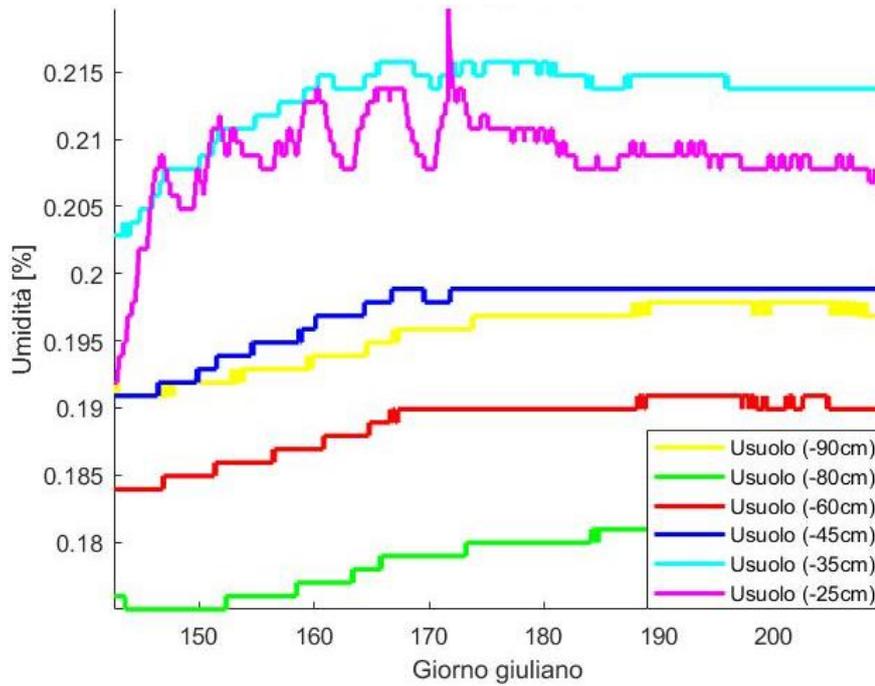


Figura 1.17 Profili di umidità del suolo

In Figura 1.18 si mostra il confronto dell'evapotraspirazione cumulata effettiva e potenziale calcolata con la formula di Penman-Monteith. In particolare il grafico evidenzia come il divario tra le due ET cresca nella prima fase dell'esperimento, per poi mantenersi circa costante nella seconda fase, che per le condizioni imposte di luce e irrigazione risulta più equilibrata.

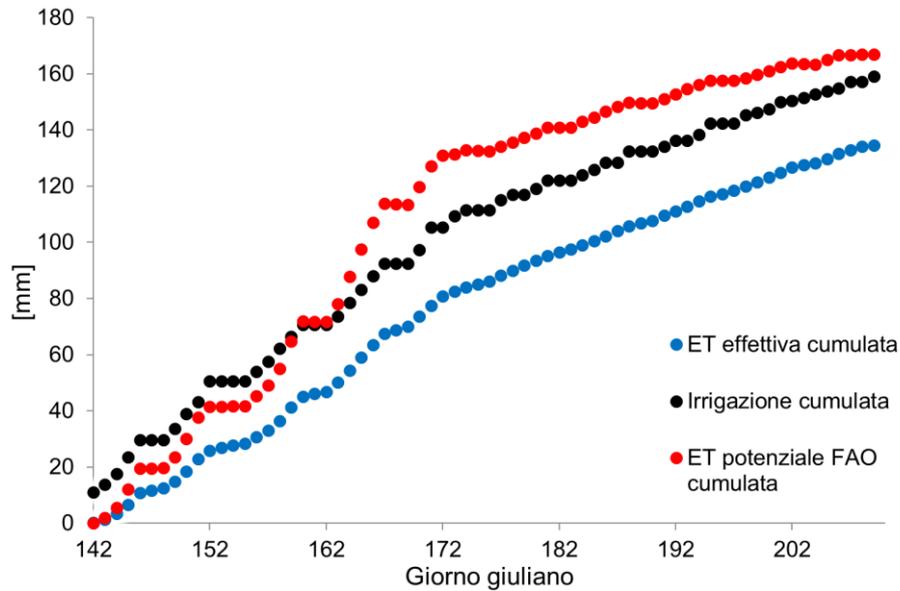


Figura 1.18 Confronto tra ET effettiva e cumulata e irrigazione fornita

## 1.9.2 Chiusura del bilancio

I dati raccolti da tutti gli strumenti collegati al datalogger sono stati elaborati tramite un codice Matlab sviluppato nel corso dei precedenti lavori di tesi inerenti a questo progetto. Tramite l' Eq. (1.8) è stato calcolato il termine  $\epsilon$  per ogni giorno dell'esperimento. I suoi valori sono mostrati in Figura 1.19. Si nota che l'errore di chiusura del bilancio di massa è abbastanza consistente. La causa si trova probabilmente nell'imprecisione del calcolo del volume d'acqua stoccato all'interno del terreno, come evidenzia la Figura 1.20 .

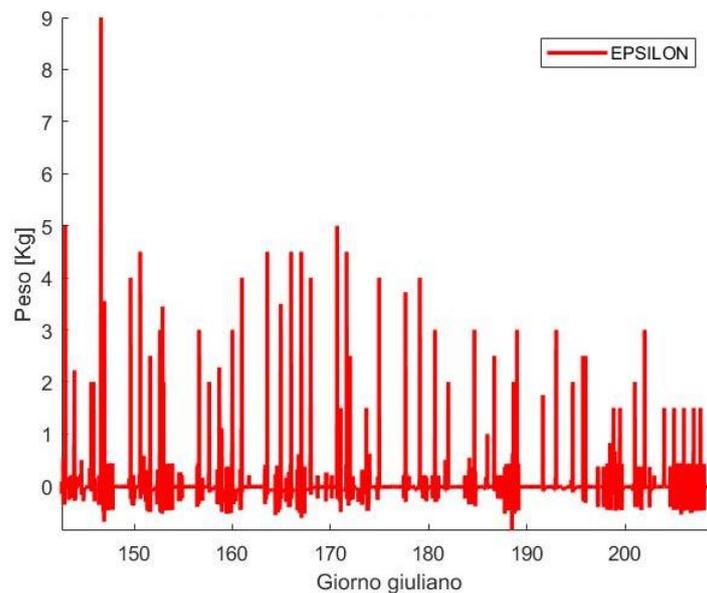


Figura 1.19 Termine di chiusura del bilancio

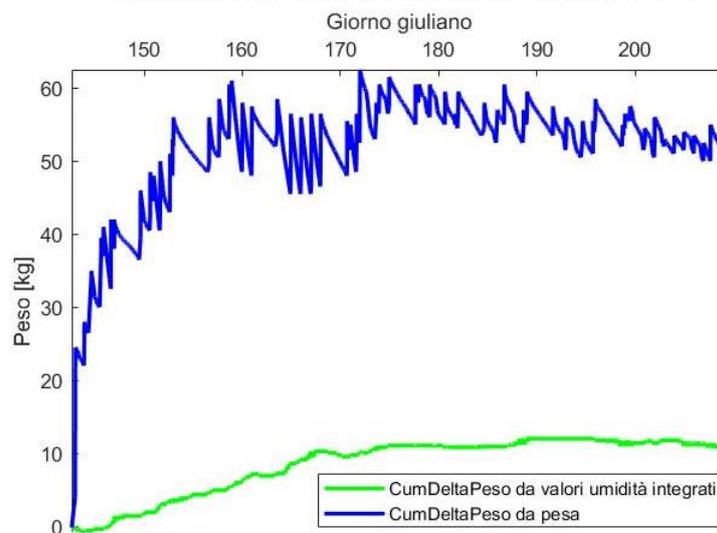


Figura 1.20 Confronto variazioni di peso

L'evaporazione è stata calcolata sia con il bilancio di massa che con il quello energetico. In Figura 1.21 il è rappresentato il confronto.

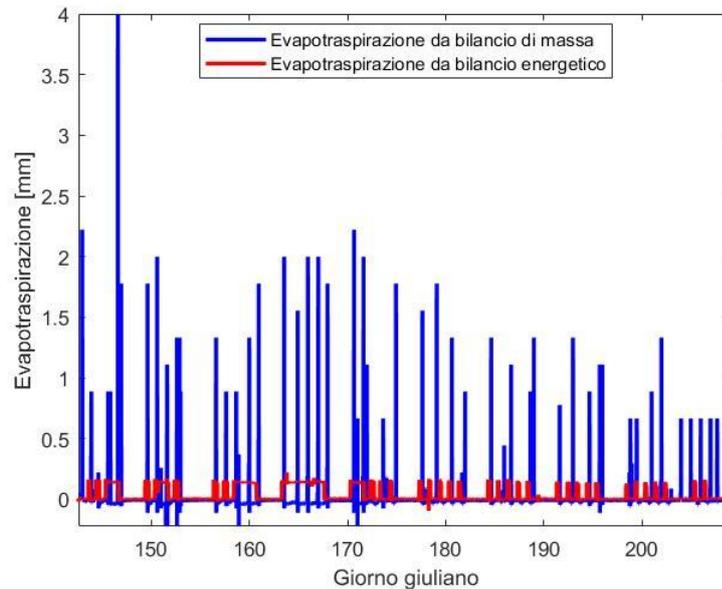


Figura 1.21 Confronto evapotraspirazione da bilancio di massa e da bilancio energetico

### 1.9.3 Altri dati osservati

In Figura 1.22 è riportato l'andamento dell'altezza media delle piante. Il tipo di pomodoro trapiantato è largamente usato in Puglia dove è coltivato senza supporto per la crescita in altezza. Anche in questo esperimento non sono stati utilizzati paletti a cui legare le piante, anche per l'impossibilità di poter garantire un adeguato sviluppo verticale, data la presenza di strumenti e oggetti sopra il lisimetro. Per questo motivo si può osservare una naturale diminuzione dell'altezza delle piante dopo un certo momento, a circa metà esperimento. Questo non significa che le piante abbiano smesso di crescere, al contrario proprio perché il peso generale è cresciuto, il fusto non è più stato in grado di sostenersi.

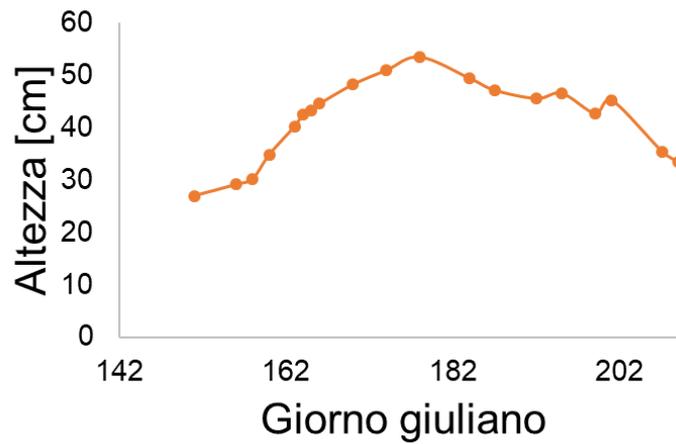


Figura 1.22 Andamento dell'altezza delle piante di pomodoro

La Figura 1.23 indica la crescita del fattore di vegetazione (FV) e del leaf area index (LAI). Dal giorno 182 fino alla fine dell'esperimento la pianta inquadrata dalla termocamera ha continuato a crescere, ma fuori dall'area di ripresa. Per questo motivo nel grafico è presente il tratto orizzontale. La Figura 1.24 e la Figura 1.25 rappresentano la crescita delle piante nel corso dell'esperimento. In particolare, la seconda riporta, a titolo di esempio, due immagini di ottenute tramite processamento Matlab, dalla quali sono stati ricavati FV e LAI.

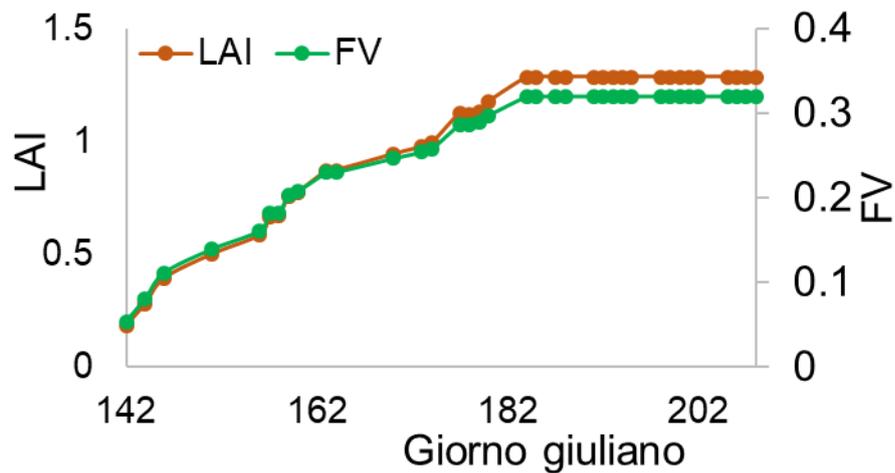


Figura 1.23 FV e LAI pomodori



24/05/2017



09/06/2017

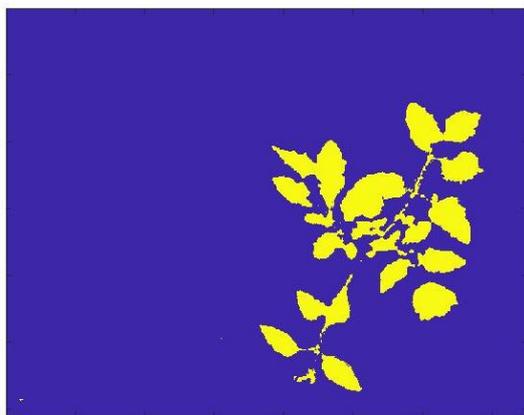


28/06/2017

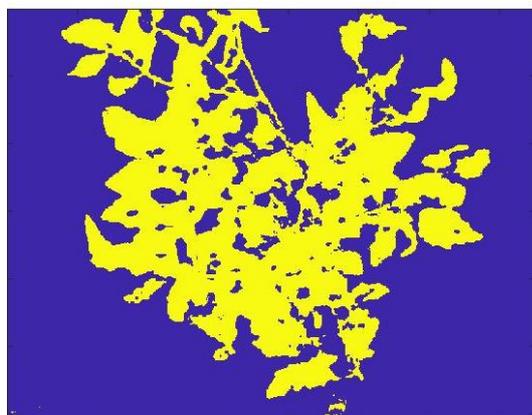


26/07/2017

Figura 1.24 Crescita delle piante di pomodoro nel tempo



24/05/2017



03/07/2017

Figura 1.25 Crescita delle piante di pomodoro nel tempo (immagini processate)

Nelle seguenti figure sono riportate le resistenze medie ottenute dalle misurazioni con il porometro effettuate su diverse foglie di due piante di pomodoro. Le osservazioni sono state suddivise in due grafici, rispettando le due suddivisioni dell'esperimento: la prima con piantine sane e tante ore con le luci accese e la seconda con segnali di sofferenza (foglie secche) e molte meno ore di luce.

In Figura 1.26 sono riportate le misure ottenute nella prima fase. Possiamo notare come la resistenza media rispecchi il comportamento che ci si aspettava, ovvero maggior resistenza per valori inferiori di umidità del terreno (è stata presa come riferimento la sonda #8). Si noti anche come il dato di resistenza relativa alla luce spenta sia maggiore degli altri, anche questo rispecchia perfettamente la teoria.

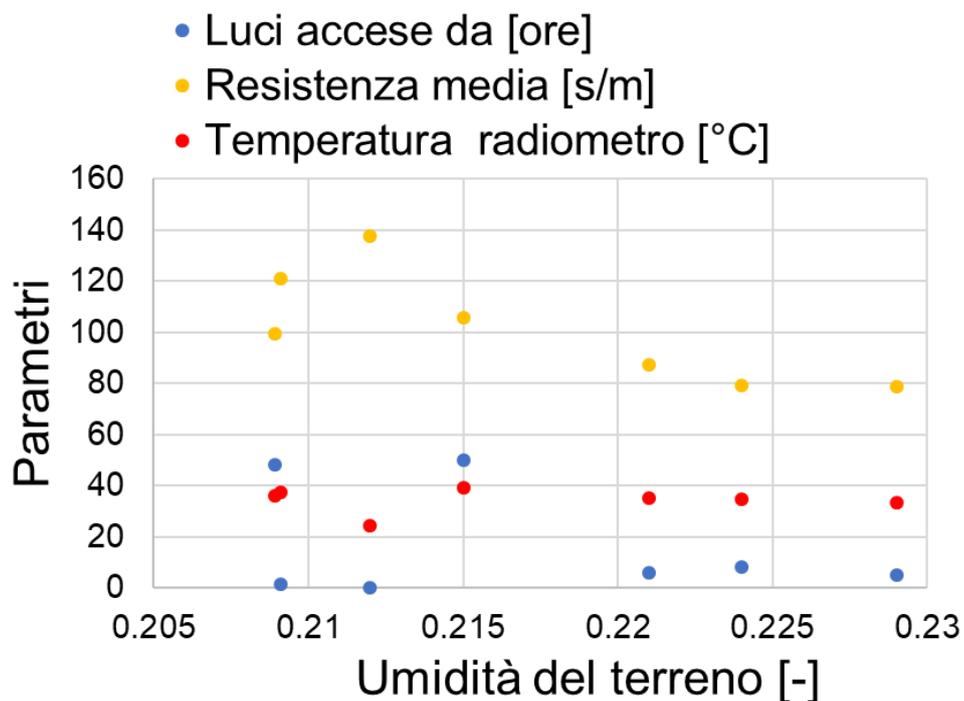


Figura 1.26 Resistenza stomatale e altri parametri osservati fino al giorno 170

In Figura 1.27 invece sono riportate le osservazioni relative alla seconda fase dell'esperimento. Si nota un comportamento anomalo, ma in ogni caso i valori di resistenza sono molto più alti, sia ad indicare lo stress che stavano subendo le piante, sia perché molte misure sono state effettuate a luce spenta.

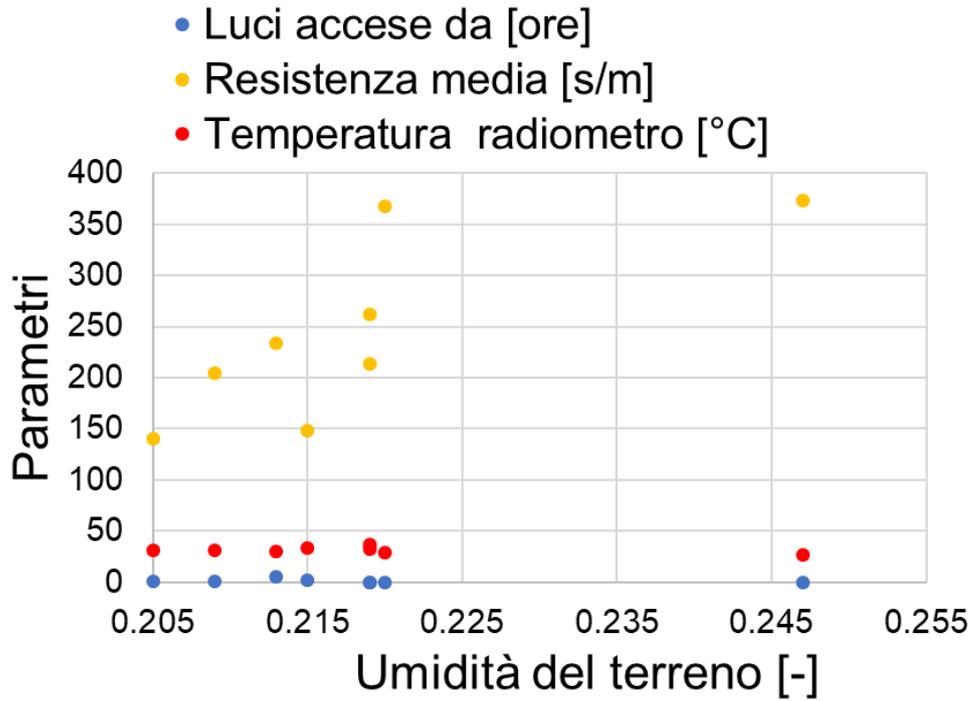


Figura 1.27 Resistenza stomatale e altri parametri osservati dal giorno 170

## 1.10 Secondo esperimento: le erbe

Il secondo esperimento è iniziato con la semina delle erbe il 17 ottobre 2017, dopo aver smosso i primi 7 cm circa di terreno che nel corso del tempo si era molto compattato, ed è terminato il 20 dicembre 2017 con la loro raccolta (Figura 1.28).



Semina

Raccolta

Figura 1.28 Semina e raccolta erbe

Per l'irrigazione è stato utilizzato un tubo flessibile provvisto di gocciolatori, disposto a serpentina con l'aiuto di picchetti in modo da formare sei ali gocciolatrici. Inizialmente è stata considerata una soglia di stress pari a 0.24, che è stata poi alzata a 0.324 dal 20 novembre, in quanto le piantine apparivano flosce alla vista. Per tutta la durata dell'esperimento, eccezione fatta per ponti e festività, si è cercato di mantenere un ciclo luce/buio il più possibile costante, accendendo le lampade alle 9 circa e spegnendole tra le 17:30 e le 18.

Gli andamenti dell'umidità nella porzione superficiale del terreno sono visibili in Figura 1.29. I primi giorni dell'esperimento si è preferito non dare troppa acqua per evitare di annegare i semi, dal 25 al 30 ottobre (giorni giuliani 297 e 304) si è irrigato in modo automatico 3 kg/giorno a causa dell'impossibilità di presenziare in laboratorio. Dal 31 ottobre le irrigazioni sono state eseguite quando l'umidità rilevata dalla sonda #8 era prossima alla soglia e fino alla capacità di campo salvo due eccezioni. Le irrigazioni sono riportate in Tabella 1.4.

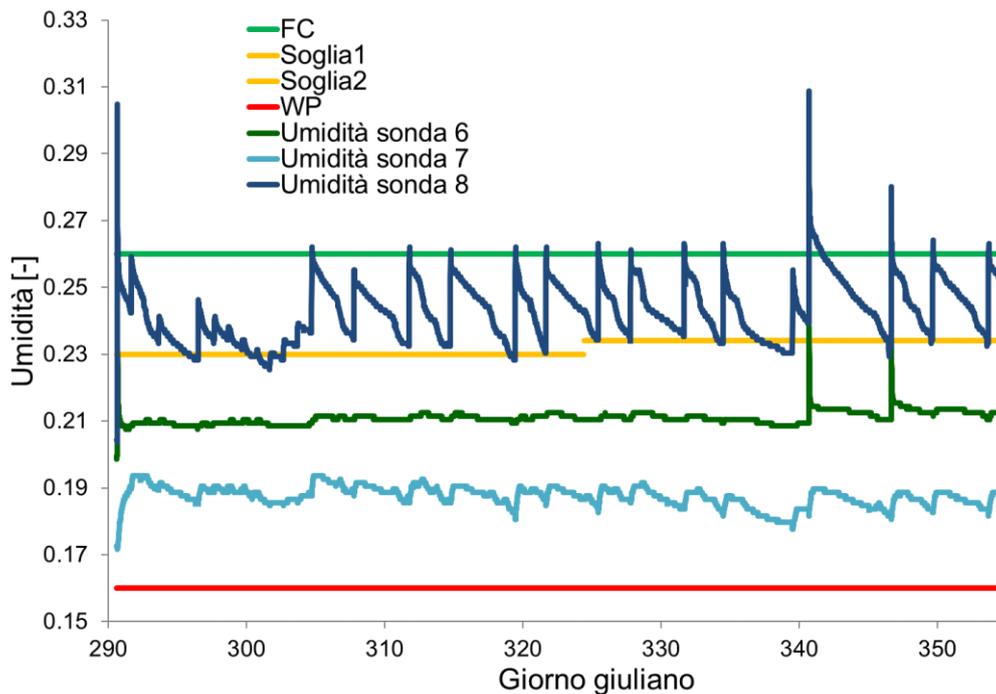


Figura 1.29 Profili di umidità del terreno: esperimento #2

Tabella 1.4 Irrigazioni erbe e relative umidità

#	G. giuliano	U iniziale 7	U iniziale 8	Durata [min]	Δpeso [kg]	U finale 7	U finale 8
#1	290	0.172	0.204	26.0	21.5	0.172	0.305
#2	291	0.191	0.242	36.0	7.5	0.190	0.259

#3	293	0.191	0.233	21.0	4.5	0.191	0.241
#4	296	0.187	0.228	36.0	8.5	0.187	0.246
#5	297	0.190	0.233	15.0	4.5	0.191	0.241
#6	298	0.191	0.234	15.0	3.0	0.191	0.238
#7	299	0.189	0.231	15.0	3.0	0.191	0.234
#8	300	0.189	0.229	15.0	3.0	0.189	0.231
#9	301	0.186	0.225	15.0	3.0	0.186	0.230
#10	302	0.186	0.228	15.0	3.0	0.186	0.234
#11	303	0.186	0.232	15.0	3.0	0.187	0.239
#12	304	0.189	0.236	45.0	11.0	0.190	0.262
#13	307	0.189	0.234	47.0	10.0	0.192	0.255
#14	311	0.186	0.232	60.0	13.0	0.192	0.262
#15	314	0.187	0.232	58.0	13.0	0.191	0.261
#16	319	0.181	0.228	54.0	14.0	0.191	0.262
#17	321	0.186	0.230	64.0	16.0	0.191	0.262
#18	325	0.185	0.234	47.0	10.5	0.191	0.263
#19	327	0.184	0.234	52.0	11.5	0.191	0.263
#20	331	0.184	0.235	52.0	11.5	0.189	0.263
#21	334	0.182	0.233	51.0	11.0	0.188	0.263
#22	339	0.179	0.230	43.0	9.5	0.184	0.255
#23	340	0.183	0.239	40.0	12.0	0.190	0.309
#24	346	0.183	0.232	12.0	12.5	0.189	0.280
#25	349	0.184	0.234	48.0	11.0	0.189	0.264
#26	353	0.184	0.233	66.0	11.5	0.189	0.263

Confrontando la Tabella 1.4 con la Tabella 1.4 si nota che, sebbene gli esperimenti abbiano durata quasi uguale (66 giorni il primo, 65 il secondo), quello relativo ai pomodori ha richiesto un numero molto maggiore di irrigazioni. Ne sono state infatti eseguite 61 contro le 26 dell'esperimento delle erbe. Il motivo si deve al fatto che ogni coltura è idro-esigente in modo diverso (Allen et al., 1998), come si nota dai valori del coefficiente colturale tabulati dalla FAO. Ad esempio, per il pomodoro si ha un Kc iniziale di 0.6, quello intermedio di 1.15 e quello finale di 0.8/0.9, mentre per gli spinaci (la coltura tabulata più simile alle erbe) il Kc iniziale è di 0.7, quello intermedio di 1 e quello finale di 0.95. Inoltre, alle erbe l'acqua è stata data molto più lentamente e la sonda di umidità non ha segnalato rapidi incrementi e altrettanto rapide picchiate di valori di umidità che si sono verificati durante il primo esperimento, come si nota confrontando la Figura 1.13 e Figura 1.29. Ai pomodori sono stati dati 362 kg di acqua

in 1030 minuti, per una media di 0.35 kg/min, mentre alle erbette 242.5 kg in 963 minuti, per una media di 0.25 kg/min. Un altro motivo che spiega la grande differenza nel numero di irrigazioni risiede nel fatto che nel secondo esperimento si è osservata una temperatura minore dell'ambiente, in quando è stato eseguito in autunno mentre l'altro in primavera, e sono state utilizzate due lampade in meno, e di conseguenza è evaporata una quantità minore di acqua.

### 1.10.1 Andamento delle variabili idrometeorologiche

In Figura 1.30, Figura 1.31, Figura 1.32 e Figura 1.33 sono riportati i grafici delle principali variabili idrologiche e meteorologiche misurate durante l'esperimento. Come precedentemente detto, per tutta la durata dell'esperimento, eccezione fatta per ponti e festività, si è cercato di mantenere un ciclo luce/buio il più possibile costante, accendendo le lampade alle 9 circa e spegnendole tra le 17:30 e le 18.

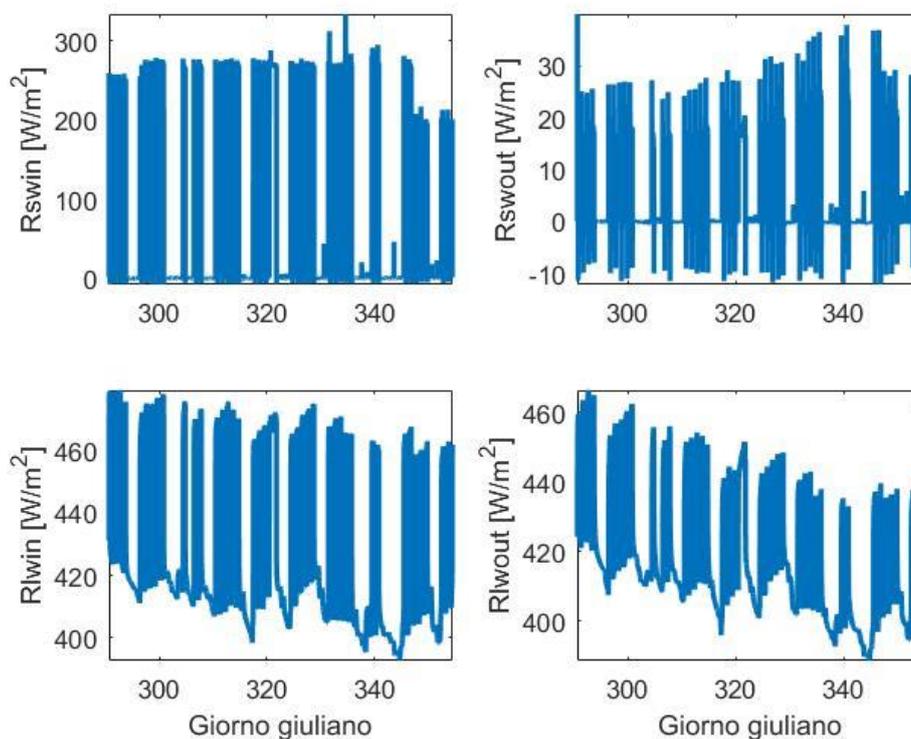


Figura 1.30 Radiazione corta e lunga, entrante e uscente

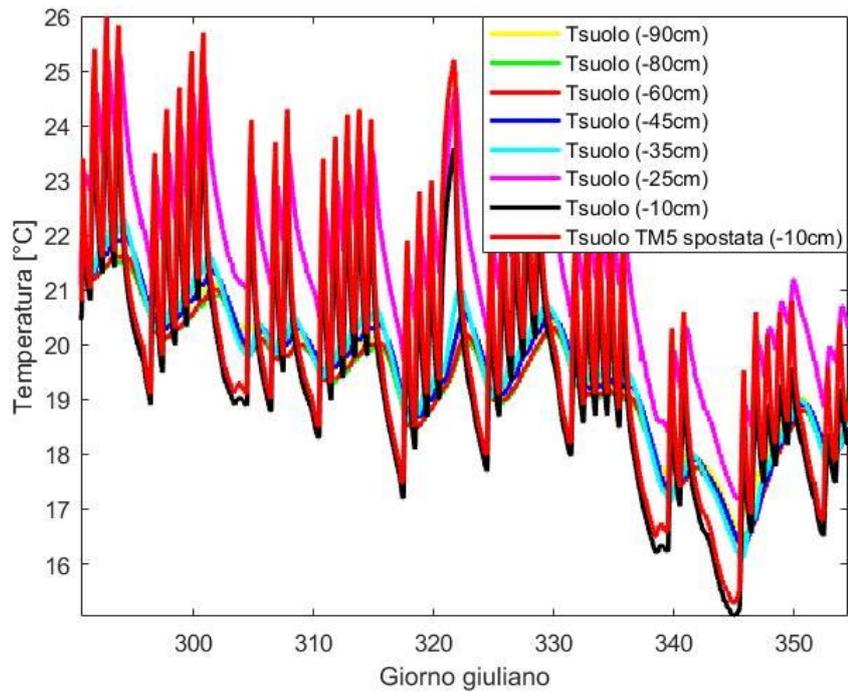


Figura 1.31 Profili di temperatura del suolo

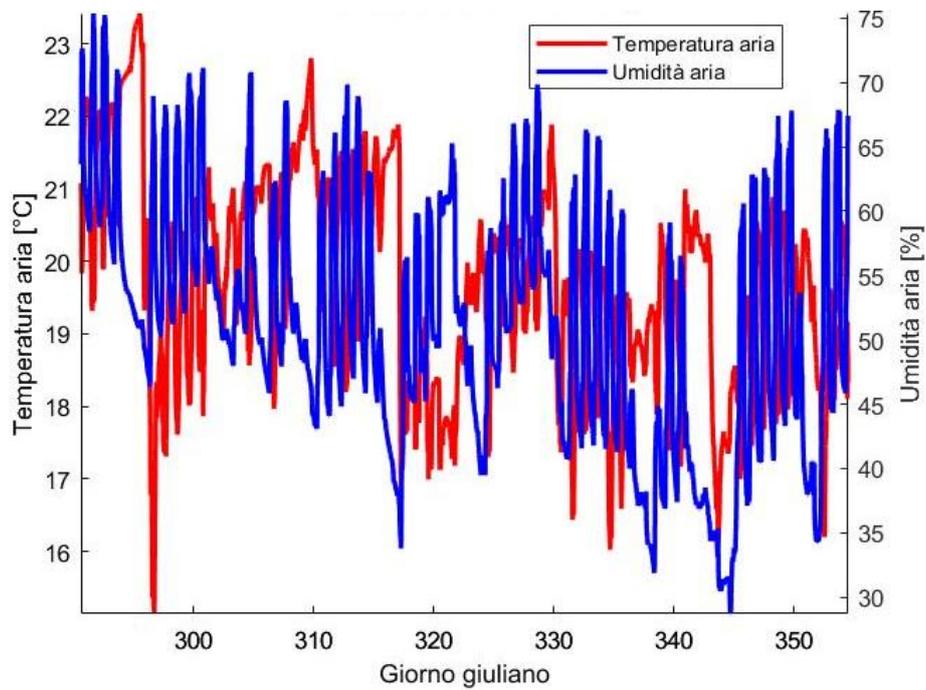


Figura 1.32 Temperatura e umidità dell'aria

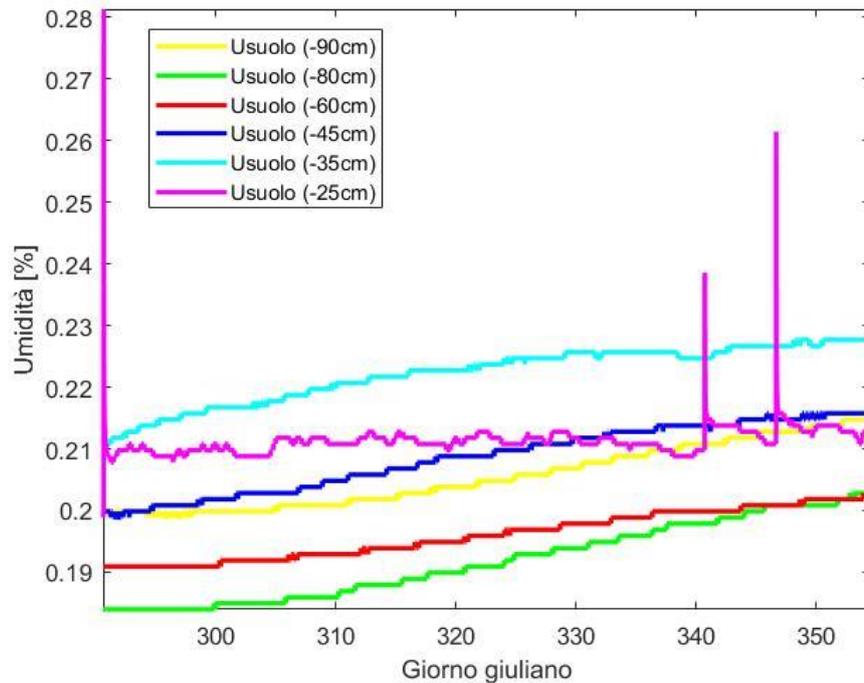


Figura 1.33 Profili di umidità del suolo

La Figura 1.30 evidenzia un andamento crescente della radiazione corta in uscita, a causa dell'aumento della copertura del suolo. Questa radiazione infatti dipende dall'albedo, e all'inizio dell'esperimento il suolo è nudo, mentre verso la fine la presenza delle piante lo copre quasi interamente, dunque cambia il potere riflettente della superficie. Nella stessa figura si nota un andamento decrescente della radiazione lunga in uscita. Questa radiazione dipende dalla temperatura della superficie, che risulta essere minore in presenza delle piante rispetto al caso di suolo nudo.

Come si nota dalle Figura 1.31 e Figura 1.32, durante l'arco dell'esperimento le temperature sono in diminuzione, per il semplice fatto dell'avvicinarsi dell'inverno e del conseguente calo delle temperature.

In Figura 1.34 si mostra il confronto dell'evapotraspirazione cumulata effettiva e potenziale calcolata con la formula di Penman-Monteith, che risultano abbastanza simili.

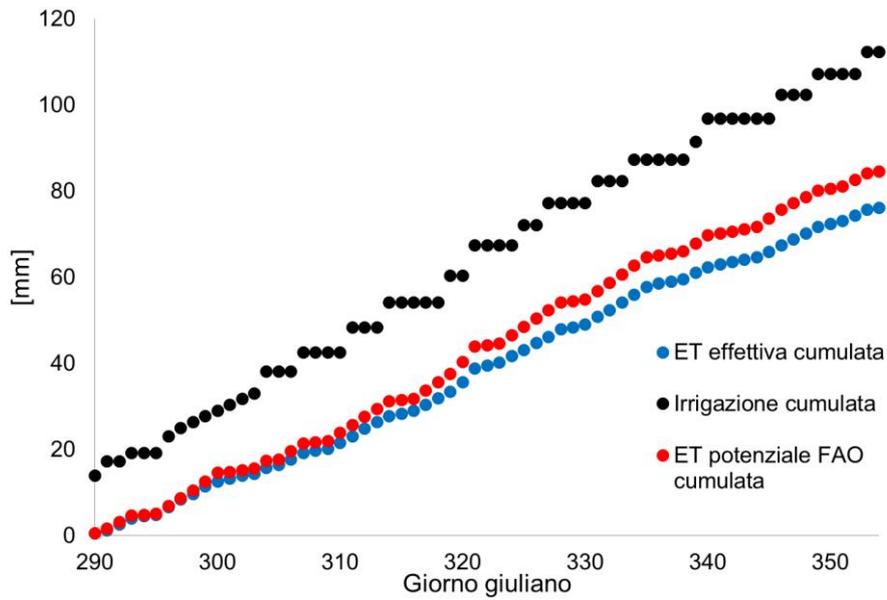


Figura 1.34 Confronto tra ET effettiva e cumulata e irrigazione fornita

### 1.10.2 Chiusura del bilancio

Anche per questo esperimento tramite l' Eq. (1.8) è stato calcolato il termine  $\epsilon$  e per ogni giorno dell'esperimento. I suoi valori sono mostrati in Figura 1.35. Si nota che l'errore di chiusura del bilancio di massa è inferiore all'esperimento precedente. La causa si trova probabilmente in una migliore precisione del calcolo del volume d'acqua stoccato all'interno del terreno, come evidenzia la Figura 1.36.

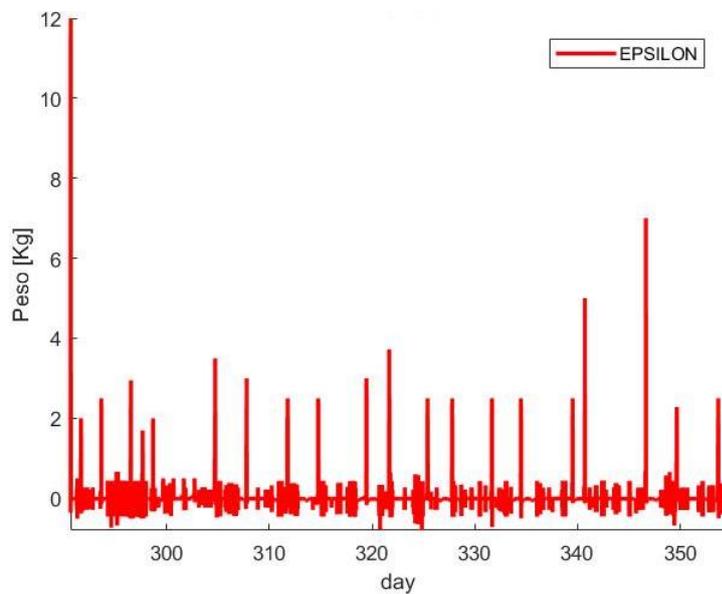


Figura 1.35 Termine di chiusura del bilancio

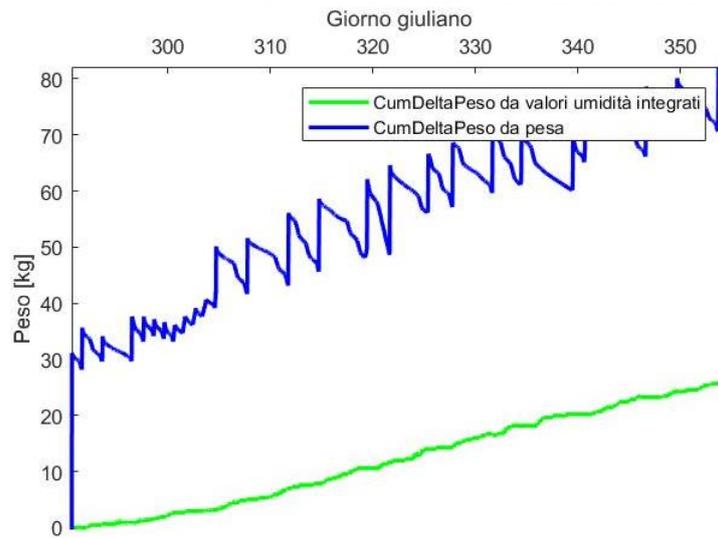


Figura 1.36 Confronto variazioni di peso

L'evaporazione è stata calcolata sia con il bilancio di massa che con il quello energetico. In Figura 1.37 il è rappresentato il confronto.

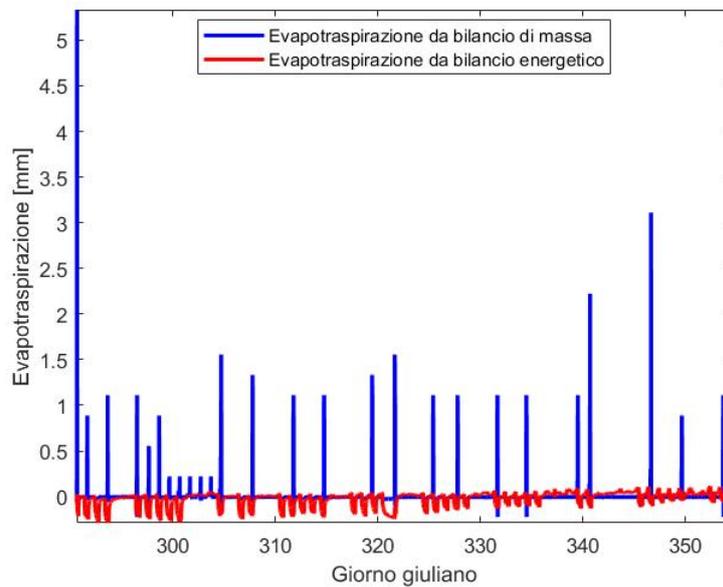


Figura 1.37 Confronto evapotraspirazione da bilancio di massa e da bilancio energetico

### 1.10.3 Altri dati osservati

In Figura 1.38 è riportato l'andamento dell'altezza media delle piante.

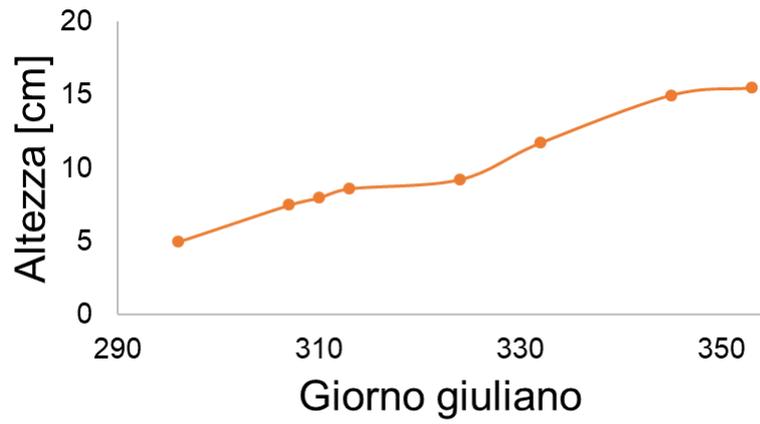


Figura 1.38 Andamento dell'altezza delle erbe

La Figura 1.39 indica la crescita del fattore di vegetazione(FV) e del leaf area index (LAI).

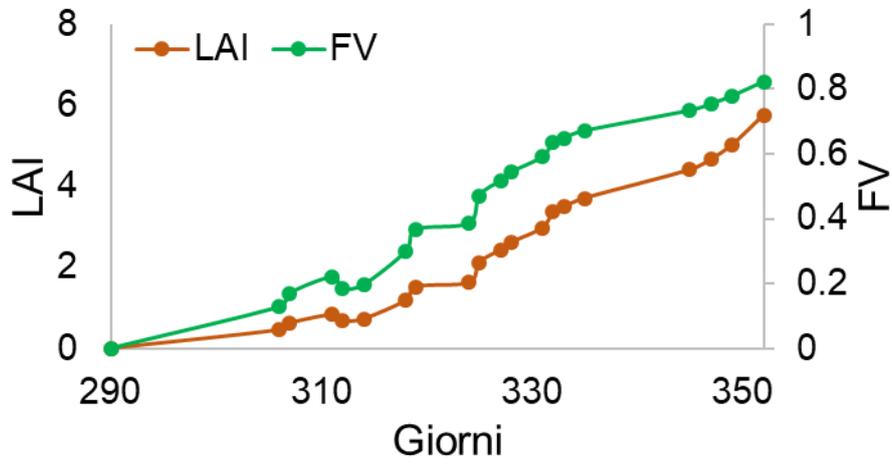


Figura 1.39 FV e LAI erbe



18/10/2017



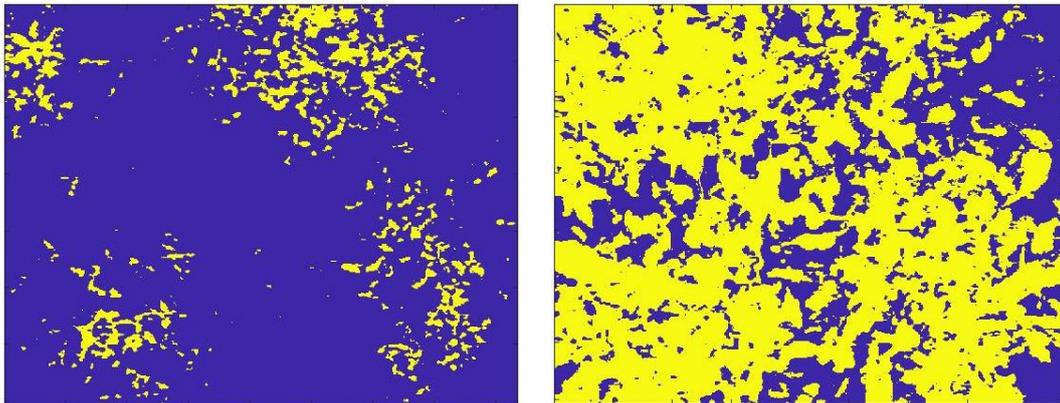
03/11/2017



22/11/2017

19/12/2017

Figura 1.40 Crescita delle erbetto nel tempo



03/11/2017

18/12/2017

Figura 1.41 Crescita delle erbetto nel tempo (immagini processate)

In Figura 1.42 sono riportate le medie delle osservazioni fatte dal 6 novembre (20 giorni dopo la semina) fino alla fine dell'esperimento. Non si nota un trend nelle misure di resistenza, il che ci suggerisce che probabilmente la soglia fissata era troppo alta e le piante non hanno subito alcuno stress. Questa ipotesi è avvalorata anche dalla poca differenza riscontrata tra la l'evapotraspirazione effettiva e quella potenziale.

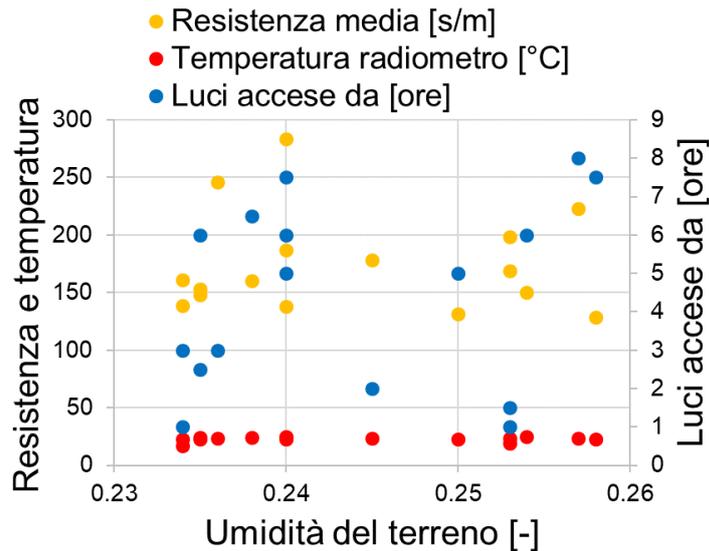


Figura 1.42 Resistenza stomatale e altri parametri osservati

Alcune resistenze medie sono state suddivise in due gruppi e poi plottate in funzione del giorno giuliano, per verificare o meno l'esistenza di una linea di tendenza attinente alla crescita e allo sviluppo delle erbe. I due gruppi sono *stress* e *benessere* e in essi sono raccolte le resistenze relative a uno stato di umidità rispettivamente vicino alla soglia di stress ( $SM < 0.239$ ) o vicino alla capacità di campo ( $SM > 0.252$ ). Il risultato riportato in Figura 1.43 non evidenzia nessun trend. Sarebbe stato interessante prolungare l'esperimento per consentire il pieno sviluppo delle piantine e approfondire lo studio.

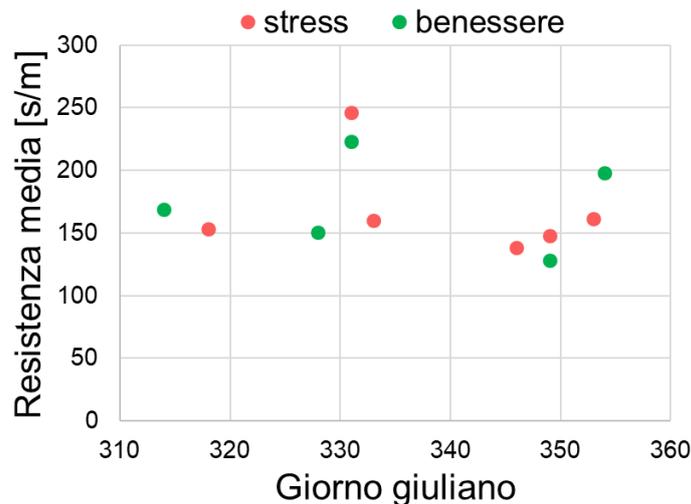


Figura 1.43 Resistenza media in condizioni di stress e benessere lungo la durata da dell'esperimento

In Figura 1.44 sono riportati gli spettri della radiazione riflessa, ottenuti da misurazioni effettuate in diversi giorni durante l'esperimento. Gli spettri sono stati riscaldati secondo il

proprio massimo, in quanto sono state incontrate difficoltà durante la calibrazione dello strumento. Il picco si ha in corrispondenza della lunghezza d'onda di 550 nm, che è relativa alla componente verde della luce. Il picco si alza durante l'esperimento, ad indicare che con il tempo è presente una maggiore quantità di materiale riflettente questa lunghezza d'onda, ovvero le foglie. Il suo innalzamento è dunque sinonimo di crescita sana delle erbe. Relativamente alla radiazione riflessa è stato calcolato l'indice NDVI, che assume circa lo stesso valore di 0.26 durante le misurazioni effettuate nei giorni 17, 27 e 30 novembre e 11 e 19 dicembre.

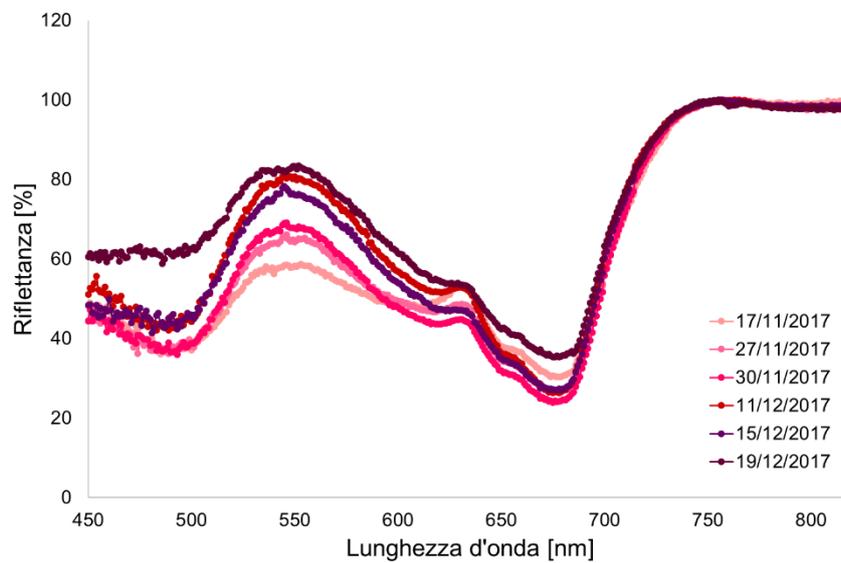


Figura 1.44 Spettri di riflettanza

# **CAPITOLO 2**

## **LA MODELLAZIONE CON AQUACROP**

Il presente capitolo fa riferimento alla seconda parte della tesi, ovvero la modellazione tramite il software AquaCrop di dati osservati nell'ambito di diversi casi studio. Sono stati presi in esame due campi di pomodoro in Puglia, due campi di mais in Lombardia, nelle località di Livraga e Calcinato, e le tre colture studiate in laboratorio. L'obiettivo di questo studio è valutare la congruenza dei dati di produttività reali con quelli risultanti dalla calibrazione, valutare la risposta del sistema alle irrigazioni ottimali calcolate nell'ambito del progetto SIM, e calcolare gli indici relativi a flussi idrici e produzione sia per il caso reale che per quelli simulati. È stato interessante trattare con diverse tipologie di coltura e suolo, e toccare con mano la difficoltà di elaborare dati di campo, spesso incompleti. Prima della modellazione infatti è stato necessario ripulire i dati da valori non realistici, completare le osservazioni meteo confrontando le stazioni Arpa vicine e mediare i dati a scala giornaliera, ovvero quella utilizzata da AquaCrop.

### **2.1 AquaCrop**

AquaCrop è un modello di crescita delle colture sviluppato dalla Land and Water Division della FAO per valutare l'effetto dell'ambiente e della gestione del campo sulla produttività della coltura. AquaCrop simula la risposta della produttività di colture erbacee alla disponibilità d'acqua, ed è particolarmente adatto a far fronte a condizioni dove l'acqua è un fattore limitante nella formazione del prodotto. Il modello è stato progettando in modo tale da far collimare equilibrio e semplicità, accuratezza e robustezza. Per poter essere largamente applicabile, AquaCrop usa un numero relativamente piccolo di parametri espliciti, alcuni dei quali facilmente determinabili. D'altra parte, le procedure di calcolo sono fondate su basilari e

spesso complessi processi biofisici per garantire un'accurata simulazione della risposta della coltura nel sistema pianta-suolo.

La risposta della produttività alla disponibilità d'acqua descrive la relazione tra la produttività della coltura e lo stress idrico come risultato di un'insufficiente fornitura d'acqua da parte di pioggia o irrigazione durante il periodo di crescita. Nel Irrigation & Drainage Paper n.33 (Doorenbos e Kassam, 1979) è usata una funzione empirica della produzione per valutare la risposta della produttività alla disponibilità d'acqua:

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Dove  $Y_x$  e  $Y$  sono la produttività massima e attuale,  $(1-Y/Y_x)$  la relativa diminuzione della produttività,  $ET_x$  ed  $ET$  l'evapotraspirazione massima e attuale,  $(1-ET/ET_x)$  il relativo stress idrico, e  $K_y$  il fattore di proporzionalità tra la diminuzione della produttività relativa e la riduzione relativa di evapotraspirazione (Figura 2.1).

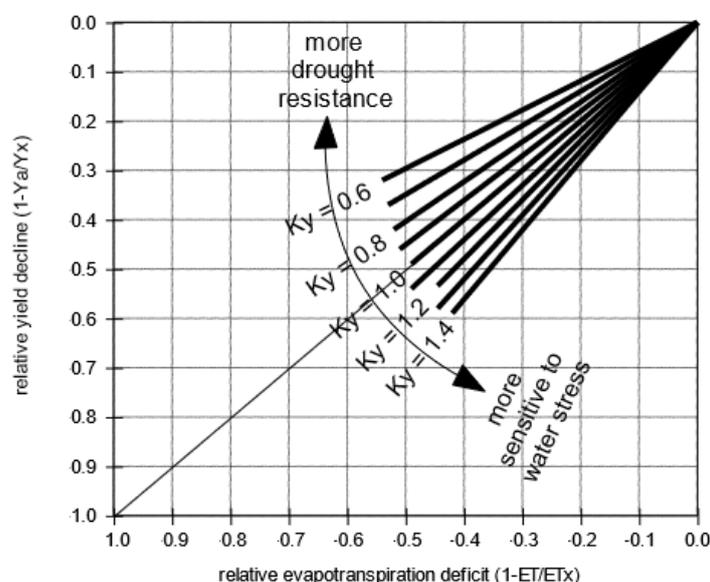


Figura 2.1 Relazione tra diminuzione della produttività relativa e deficit di evapotraspirazione relativa per diversi valori del fattore stagionale di risposta della produttività

AquaCrop supera l'approccio del  $K_y$  separando l'evapotraspirazione ( $ET$ ) nelle sue componenti, evaporazione del suolo ( $E$ ) e traspirazione della coltura ( $Tr$ ), Eq. (2.2), e la produttività finale ( $Y$ ) in biomassa ( $B$ ) e Harvest Index ( $HI$ ), Eq. (2.3):

$$ET = E + Tr \quad \text{Eq. (2.2)}$$

$$Y = HI \cdot B \quad \text{Eq. (2.3)}$$

La separazione della ET in evaporazione del suolo e traspirazione della vegetazione evita un'erronea valutazione dell'uso consuntivo e non predittivo dell'acqua (evaporazione). Questo è importante specialmente quando la copertura del suolo è incompleta. La separazione della produttività in biomassa e Harvest Index permette la partizione delle relazioni funzionali corrispondenti come risposta alle condizioni ambientali. Queste risposte infatti sono fondamentalmente diverse e la loro separazione permette di valutare correttamente B e HI in presenza di stress idrico. I cambiamenti descritti portano alla Eq. (2.4), ovvero il cuore del motore di crescita secondo AquaCrop:

$$B = WP \cdot \sum Tr \quad \text{Eq. (2.4)}$$

Dove Tr è la traspirazione della coltura (in mm) e WP è la il parametro di produttività dell'acqua (kg di biomassa per m<sup>2</sup> e per mm di acqua traspirata cumulata sul periodo di tempo in cui la biomassa è prodotta).

AquaCrop è strutturato in componenti quali: suolo, con il suo bilancio idrico; coltura, con il suo sviluppo, crescita e processo di produzione; e atmosfera, con il suo regime termico, pioggia, evaporazione e concentrazione di CO<sub>2</sub>. Inoltre, permette di considerare aspetti gestionali come irrigazione, fertilizzazione, infestazione, ecc, che hanno effetti sui processi considerati. AquaCrop è anche in grado di simulare lo sviluppo delle colture in scenari di cambiamento climatico. Le relazioni tra le diverse componenti del modello sono rappresentate in Figura 2.2.

AquaCrop si distingue dagli altri modelli colturali per diversi motivi: pone l'attenzione sull'acqua, usa la canopy cover invece del leaf area index, utilizza valori di produttività dell'acqua normalizzati, presenta un'interfaccia facile da usare ed è applicabile a diversi sistemi agricoli presenti in tutto il mondo.

Sebbene il modello sia relativamente semplice, enfatizza i processi fondamentali coinvolti nella formazione del prodotto della coltura e nelle risposte al deficit idrico, da un punto di vista sia fisiologico che agronomico.

Esistono altri modelli che simulano la risposta della produttività alla disponibilità d'acqua, ma sono usati soprattutto da scienziati, laureati e utenti avanzati che lavorano per aziende agricole altamente commerciali. AquaCrop invece è stato progettato per essere accessibile a più persone, alle associazioni che gestiscono l'uso dell'acqua, agli ingegneri, ai gestori dell'irrigazione e delle aziende agricole, pianificatori ed economisti.

Lo schema di calcolo generale è illustrato in Figura 2.3.

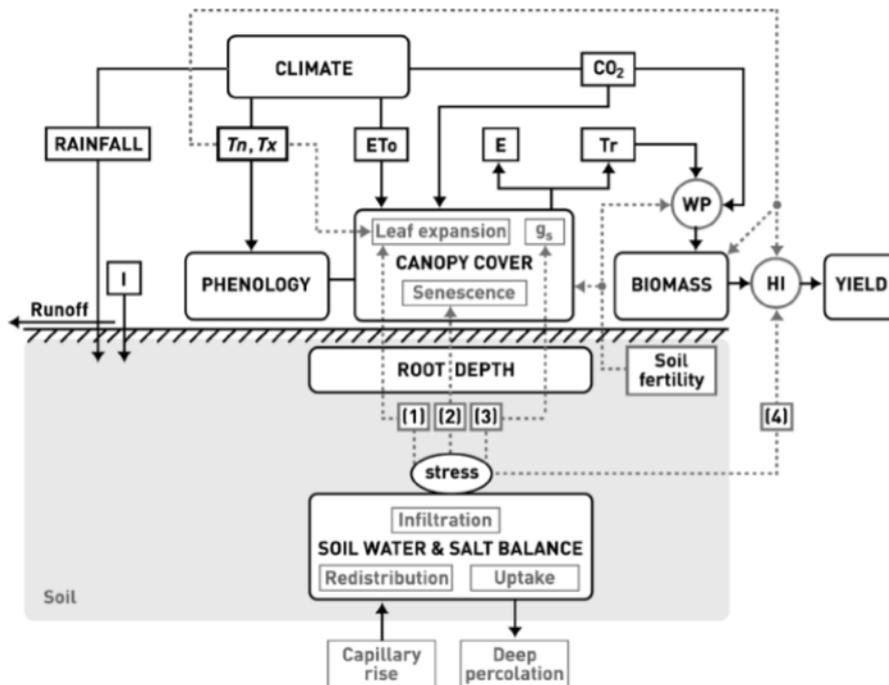


Figura 2.2 Schema rappresentativo delle componenti di AquaCrop e dei parametri utilizzati. Le linee continue indicano connessioni dirette, quelle tratteggiate indicano un feedback

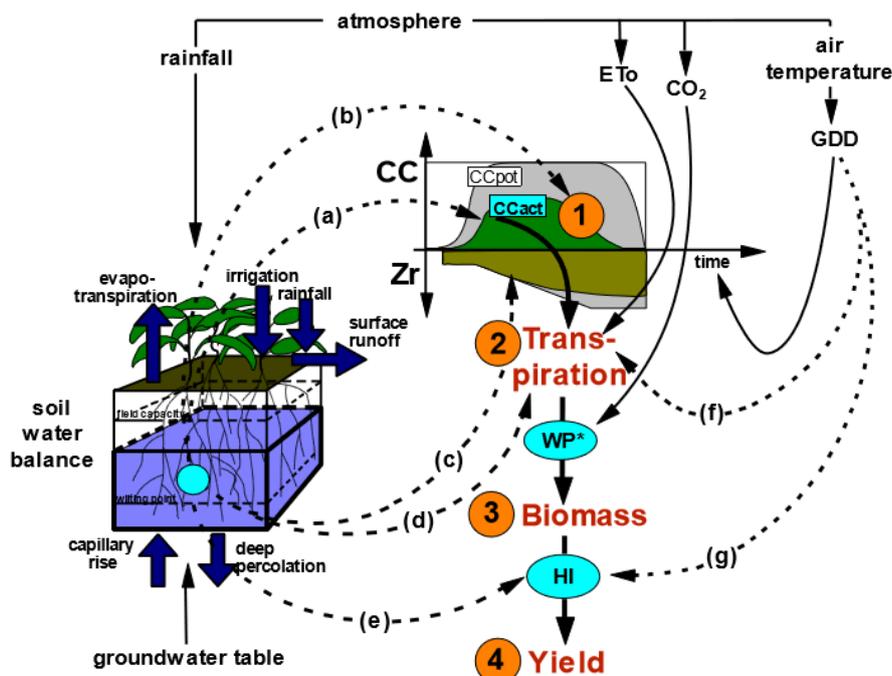


Figura 2.3 Schema di calcolo. I processi a-e sono influenzati dallo stress idrico, quelli da f-g dallo stress termico. CC è la canopy cover simulata, CCpot quella potenziale, Zr la profondità delle radici, ETo l'evapotraspirazione di riferimento, GDD i growing degree days, WP\* la crop water productivity normalizzata e HI l'Harvest Index.

La quantità d'acqua immagazzinata nella zona radicale è simulata tenendo conto dei flussi idrici in entrata e in uscita. Questa determina l'importanza dello stress idrico che influenza l'espansione della copertura vegetale, la sua senescenza e diminuzione, il tasso con cui e radici raggiungono maggiori profondità, la conduttanza stomatale e quindi la traspirazione e l'Harvest Index.

Il modello simula con passo giornaliero i seguenti processi, che verranno discussi in seguito: sviluppo della copertura vegetale, traspirazione, generazione della biomassa sopra la superficie e formazione del prodotto.

Lo stress idrico è descritto dal coefficiente di stress  $K_s$ , il cui valore è pari a 1 in assenza di stress idrico, assume valori compresi tra 0 e 1 se il contenuto d'acqua nella zona radicale scende sotto una prima soglia ed è uguale a 0 sotto la soglia inferiore (Figura 2.4). In quest'ultimo caso i processi sono completamente fermi.

L'effetto dello stress idrico differisce a seconda del processo, quindi ognuno ha il proprio  $K_s$  e i propri valori di soglia.

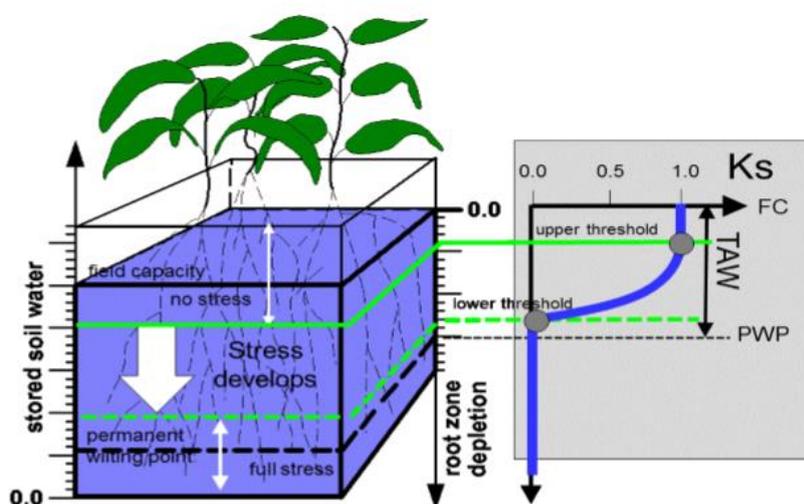


Figura 2.4 Coefficiente di stress idrico per vari gradi di svuotamento della zona radicale

## ***Sviluppo della copertura vegetale***

Lo sviluppo della copertura vegetale in condizioni ottime è descritto da alcuni parametri: copertura al 90% dell'emergenza ( $CC_0$ ), copertura massima in pieno sviluppo ( $CC_x$ ), coefficiente di crescita della copertura (CGC) e coefficiente di riduzione della copertura, usato per descrivere la senescenza (CDC).

In condizione di assenza di stress, l'espansione dall'emergenza allo sviluppo completo del canopy segue la crescita esponenziale durante la prima metà del ciclo e una decrescita

esponenziale nella seconda metà. L'Eq. (2.5) descrive la fase di crescita, mentre l' Eq. (2.6) quella di decrescita. Il tempo  $t$  è espresso in giorni o in gradi giorni.

$$CC = CC_0 e^{t CGC} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_0} e^{-t CGC} \quad \text{Eq. (2.6)}$$

L'effetto dello stress idrico sull'espansione della copertura è simulato moltiplicando il CGC per il relativo  $K_s$ . Altri fattori di stress che interessano la copertura vegetale sono: temperatura dell'aria, carenza di nutrienti minerali e elevata salinità dell'acqua.

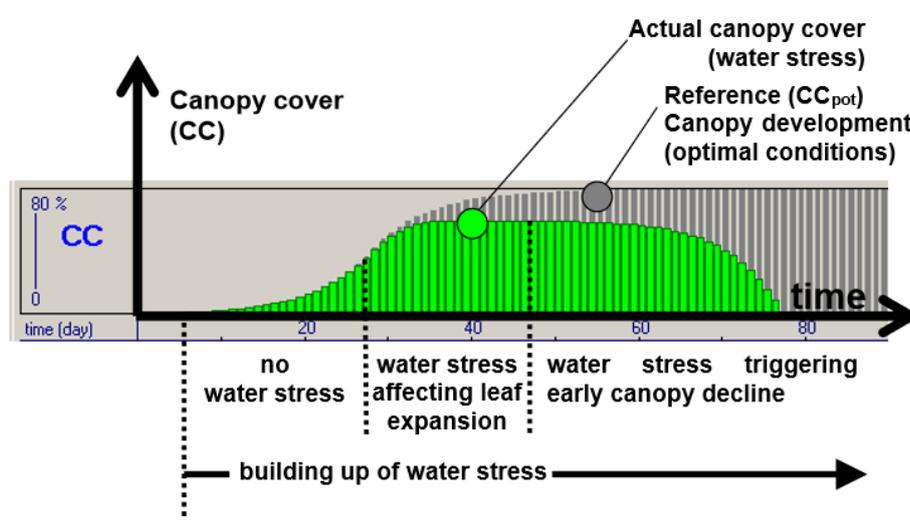


Figura 2.5 Simulazione della CC in condizioni di stress (verde) in riferimento alla situazione senza stress (grigio)

## Traspirazione

La traspirazione ( $Tr$ ) è calcolata secondo la Eq. (2.7) moltiplicando il potere evaporante dell'atmosfera con il coefficiente culturale  $K_{cTr}$  (Eq. (2.8)) e considerano gli stress idrico ( $K_s$ ) e termico ( $K_{sTr}$ ):

$$Tr = K_s K_{sTr} (K_{cTr,x} CC^*) ET_o \quad \text{Eq. (2.7)}$$

$$K_{cTr} = K_{cTr,x} CC^* \quad \text{Eq. (2.8)}$$

Dove il potere evaporante dell'atmosfera è espresso come l'evapotraspirazione di riferimento determinata dall'equazione di Penman-Monteith.

La simulazione della traspirazione di una coltura affetta da stress idrico durante il ciclo culturale è presentata in Figura 2.6.

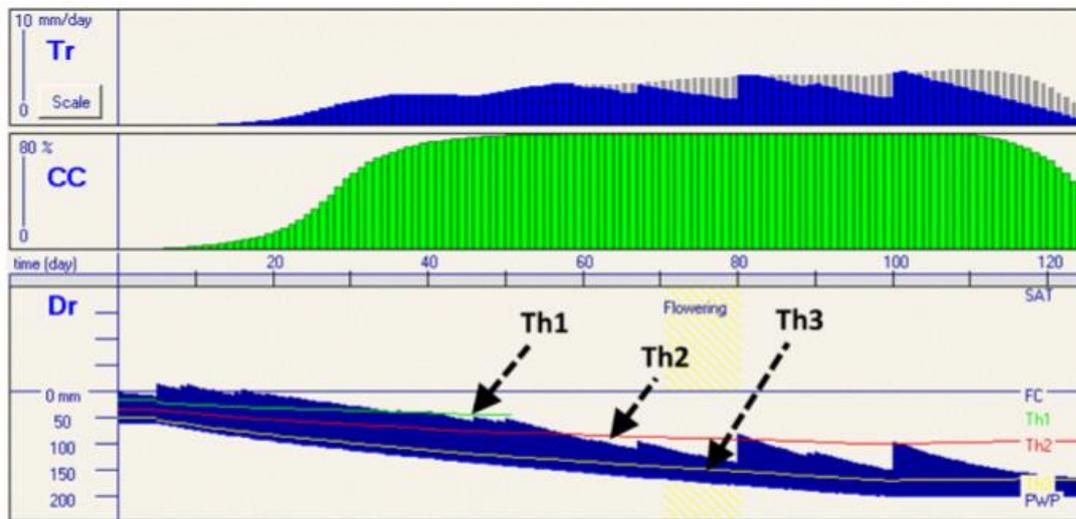


Figura 2.6 Simulazione dello svuotamento della zona radicale (Dr), della copertura vegetale (CC) e della traspirazione (Tr) durante il ciclo colturale con indicazione delle soglie di stress idrico che interessano lo sviluppo della copertura (Th1), la chiusura degli stomi (Th2) e la senescenza precoce (Th3)

### ***Produzione di biomassa***

La produttività dell'acqua della coltura (WP) indica la quantità di materia secca prodotta sopra il suolo per unità di area per unità di acqua traspirata. Molti esperimenti hanno dimostrato che la relazione tra biomassa prodotta e acqua consumata da una data coltura è altamente lineare per date condizioni climatiche, come si vede dalla Figura 2.7. AquaCrop usa la produttività dell'acqua normalizzata (WP\*) per la concentrazione di CO<sub>2</sub> e ETo, al fine di estenderne l'applicabilità a diversi luoghi e stagioni.

La produzione di biomassa sopra la superficie per ogni giorno del ciclo colturale è ottenuta moltiplicando la WP\* con il rapporto tra la traspirazione e l'evapotraspirazione di riferimento per quel giorno, come indicato dall' Eq. (2.9) :

$$B = WP^* \cdot \sum_i \frac{Tr}{ET_{0i}} \quad \text{Eq. (2.9)}$$

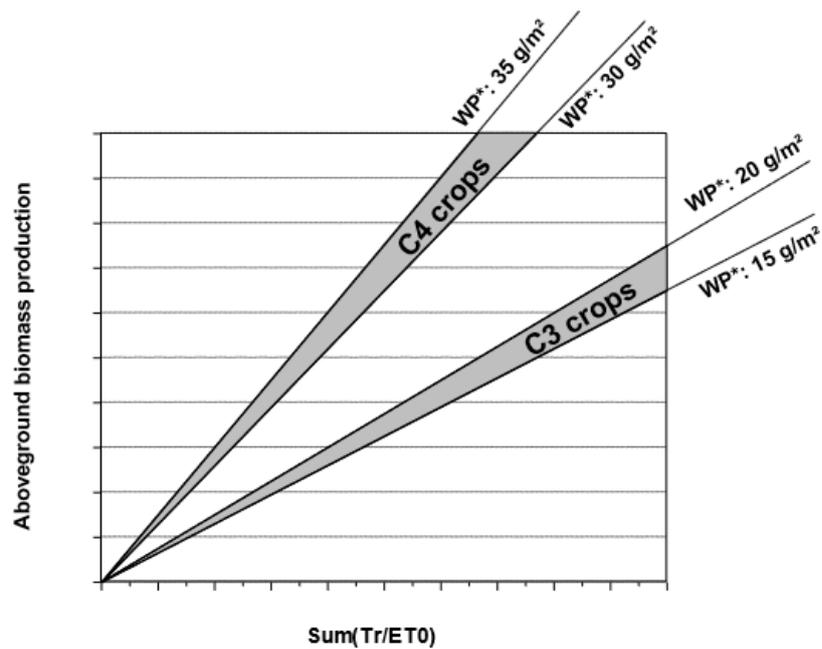


Figura 2.7 Relazione tra biomassa prodotta sopra la superficie e totale di acqua traspirata per colture di tipo C3 e C4 dopo la normalizzazione per CO<sub>2</sub> e ET<sub>0</sub>

### ***Produzione della coltura***

La produzione è data, secondo l'Eq. (2.10), dal prodotto della biomassa sopra la superficie con l'Harvest Index effettivo, che può essere inferiore a quello di riferimento a causa di eventuali stress, oppure maggiore:

$$Y = f_{HI} HI_0 B \quad \text{Eq. (2.10)}$$

In Figura 2.8 è rappresentata la crescita dell'HI per colture cerealicole e alberi da frutto. Per gli ortaggi a foglia, in assenza di condizioni di stress, HI comincia a crescere subito dopo la germinazione e raggiunge rapidamente il valore di riferimento.

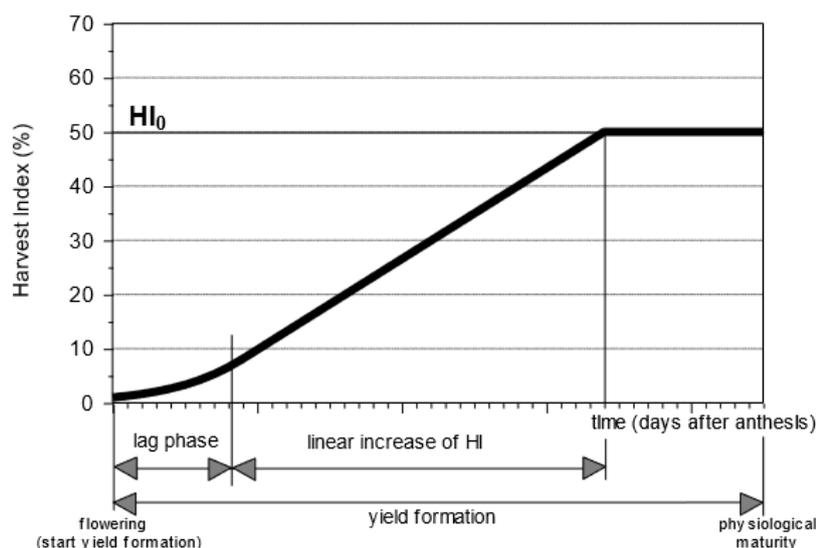


Figura 2.8 Costruzione dell'HI dalla fioritura fino alla maturazione fisiologica per alberi da frutto e colture cerealicole

### ***Variabili di input del modello***

Le caratteristiche dell'atmosfera in cui è inserita la coltura sono descritte dalle componenti climatiche di AquaCrop. Esse sono riconducibili a cinque variabili di input: temperatura dell'aria giornaliera minima e massima, precipitazione giornaliera, richiesta giornaliera di evaporazione dell'atmosfera espressa dall'evapotraspirazione di riferimento ( $ET_0$ ) e la media annuale di concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera. Nel caso degli esperimenti di laboratorio erano disponibili tutti questi dati, l' $ET_0$  è stata calcolata applicando la formula di Penman-Monteith. Per gli altri casi studio invece molte serie di dati erano incomplete, ed è stato necessario completarle quando possibile con le osservazioni rilevate dalle stazioni Arpa vicine. In questi casi l' $ET_0$  è stata calcolata direttamente da AquaCrop, fornendo come input la velocità del vento, l'umidità relativa, la temperatura minima e massima e la radiazione netta o in ingresso a seconda del dato disponibile, preferendo la prima in caso fossero state rilevate entrambe.

In AquaCrop la coltura è caratterizzata da cinque componenti principali a cui sono associate altrettante risposte dinamiche: fenologia, canopy cover (CC), profondità delle radici, produzione di biomassa e formazione del prodotto. Tutte le dinamiche sopraelencate sono relazionate tra loro e si sviluppano in dipendenza l'una dell'altra. L'unica eccezione è per la formazione del prodotto, legata alla biomassa dalla semplice equazione lineare Eq. (2.10).

Anche se il modello AquaCrop utilizza un parametro di Harvest Index (HI), non calcola le suddivisioni della biomassa nei vari organi (foglie, radici, ecc.). La produzione di biomassa è dipendente esclusivamente dell'espansione del canopy e della profondità delle radici (Steduto et al. 2008).

Il ciclo fenologico delle colture è funzione del tempo termico, rappresentato dalla somma termica (Growing Degree Day, GDD) per mezzo della seguente equazione:

$$GDD = \frac{T_{Max} - T_{min}}{2} - T_{base} \quad \text{Eq. (2.11)}$$

Dove GDD è il valore in gradi della somma termica,  $T_{Max}$  e  $T_{min}$  sono rispettivamente la temperatura giornaliera massima e minima e  $T_{base}$  è la temperatura basale, ovvero quella sotto la quale lo sviluppo della pianta si arresta. AquaCrop considera anche una temperatura massima di soglia, sopra la quale lo sviluppo non progredisce.

AquaCrop distingue 3 tipi di colture principali: colture di frutta o cereali, produzione di radici o tuberi, coltivazioni di vegetali a foglia. Ognuno di questi tipi ha le sue corrispondenti fasi del ciclo di sviluppo e crescita. La variazione genetica delle specie e delle coltivazioni può essere implementata nel modello attraverso la variazione delle varie fasi di sviluppo, o anche attraverso la velocità di espansione del canopy e dello sviluppo delle radici, il parametro di produttività di acqua e altri fattori di risposta alle condizioni ambientali.

Il suolo nel modello AquaCrop è configurato come un sistema di profondità variabile, e si possono indicare fino a 5 strati di diversa tessitura lungo il profilo. Di default il modello include tutte le tessiture classiche incluse nel triangolo USDA, l'utente può tuttavia modificare le variabili di input a suo piacimento. Per ogni tessitura del terreno il modello associa alcune caratteristiche idrauliche mentre nel caso di combinazioni inserite dall'utente le stima attraverso funzioni di pedotrasferimento. Le caratteristiche idrauliche includono: il coefficiente di drenaggio ( $\tau$ ), conduttività idraulica a saturazione ( $k_{sat}$ ), contenuto di acqua volumetrico a saturazione ( $\theta_{sat}$ ), alla capacità di campo ( $\theta_{FC}$ ) e al punto di appassimento ( $\theta_{WP}$ ).

In AquaCrop le componenti inerenti alla gestione possono essere suddivise in due categorie: gestione di campo e gestione dell'acqua, nella prima sono incluse tutte le informazioni relative alla fertilità, che però non è stata considerata nei casi analizzati, mentre nella seconda sono incluse tutte le variabili l'irrigazione.

## 2.2 Cenni sul progetto SIM

Il progetto SIM, sviluppato dal Politecnico di Milano, è finanziato dall'EU nell'ambito del WaterWorks2014 – Water Joint Programming Initiative ed ha lo scopo di sviluppare uno strumento per la previsione in tempo reale della richiesta d'irrigazione da parte di una coltura. Lo scopo è quello di supportare la gestione parsimoniosa della risorsa idrica e ottimizzare la

pianificazione delle irrigazioni fornendo valori dell'umidità del suolo in tempo reale e prevedendone il comportamento futuro ad alta risoluzione spaziale e temporale, con un orizzonte di previsione fino a 30 giorni.

Questo studio tratta dei vantaggi derivanti dall'accoppiamento di modelli per il bilancio idrico del suolo basati su misure da satellite e previsioni meteorologiche che fungono da supporto per l'irrigazione di precisione. Nell'ambito del progetto sono stati considerati diversi casi studio in Italia, Olanda, Cina e Spagna, caratterizzati da differenti condizioni climatiche, disponibilità d'acqua, tipologie di coltura, tecniche di irrigazione e regole per la distribuzione della risorsa idrica. In Italia il progetto è stato implementato in due aziende agricole nel meridione, dove è presente un clima semi arido, e in due campi di mais in Lombardia dove la disponibilità d'acqua è maggiore.

Il sistema combina modelli matematici e nuove tecnologie per il monitoraggio ambientale, combinando dati osservati al suolo con i dati Earth Observation da LANDSAT, MODIS e SENTINEL, considerando la differente risoluzione spaziale e temporale necessaria per ogni caso di studio.

## 2.3 Indici statistici e indicatori riassuntivi

Al fine di riassumere e confrontare i risultati ottenuti, sono stati utilizzati degli indici statistici per valutare la bontà delle calibrazioni e alcuni indicatori riassuntivi per sintetizzare le informazioni relative ai flussi idrici.

Indici statistici calcolati, dove  $P_i$  è il valore stimato,  $O_i$  quello osservato e  $\bar{O}$  è la media degli osservati:

- Errore assoluto medio:  $MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n}$ ;
- Deviazione standard:  $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$ ;
- Efficienza della modellazione:  $EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$ . Il valore ottimale per EF è 1, valori maggiori di 0 indicano che le stime del modello sono migliori della media delle osservazioni, mentre valori negativi ci informano che la media delle osservazioni è predittore migliore del modello.

Indicatori riassuntivi utilizzati:

- Water use efficiency [ton/m<sup>3</sup>]:  $WUE = \frac{Fresh\ yield}{ET}$ ;
- Irrigation water use efficiency [ton/m<sup>3</sup>]:  $IWUE = \frac{Fresh\ yield}{Irrigation}$ ;
- Evaporation deficit [mm]:  $ED = ET_{potenziale} - ET$ ;

- Precipitation deficit [mm]:  $PD = P - ET_{potenziale}$  dove P è la precipitazione;
- Relative soil water deficit [-]:  $RSWD = 1 - \frac{SM-WP}{FC-WP}$  dove SM è l'umidità del terreno;
- Relative ET deficit [-]:  $RETD = 1 - \frac{ET}{ET_{potenziale}}$ ;
- Indice di percolazione [-]:  $IP = \frac{Pioggia+Irrigazione-Percolazione}{Pioggia+Irrigazione}$ ;
- Efficienza irrigua [-]:  $EI = \frac{ET}{Pioggia+Irrigazione}$ ;
- Temperatura dell'aria [°C];
- Precipitazione nella stagione irrigua[mm];
- Volume irriguo [m<sup>3</sup>/ha].

Nelle pagine successive, per ogni caso di studio, verranno mostrate le tabelle contenenti i valori degli indici e degli indicatori appena descritti.

## 2.4 Analisi di sensibilità

Prima di effettuare le calibrazioni per i diversi casi studio trattati, è stata eseguita un'analisi di sensibilità del modello basata su alcuni parametri indentificati da (Silvestro, 2017), scelti proprio in quanto responsabili di importanti differenze negli output della modellazione. I parametri sono: WP\* (produttività dell'acqua normalizzata), HI (harvest index), Kc (coefficiente colturale), flo (GDD fra trapianto e fioritura) e RTX (lunghezza delle radici). Inoltre, sono stati presi in considerazione anche il numero di piante al m<sup>2</sup>, il tipo di irrigazione e il tipo di terreno.

L'analisi è stata effettuata sui dati del primo dei due campi di pomodori in Puglia analizzati ed è stata eseguita facendo variare un valore di riferimento per ogni parametro. I risultati più significativi sono stati raggruppati in due grafici, il primo raffigurante l'effetto della variazione dei parametri sulla produttività (Figura 2.9) e il secondo sull'evapotraspirazione cumulata (Figura 2.10).

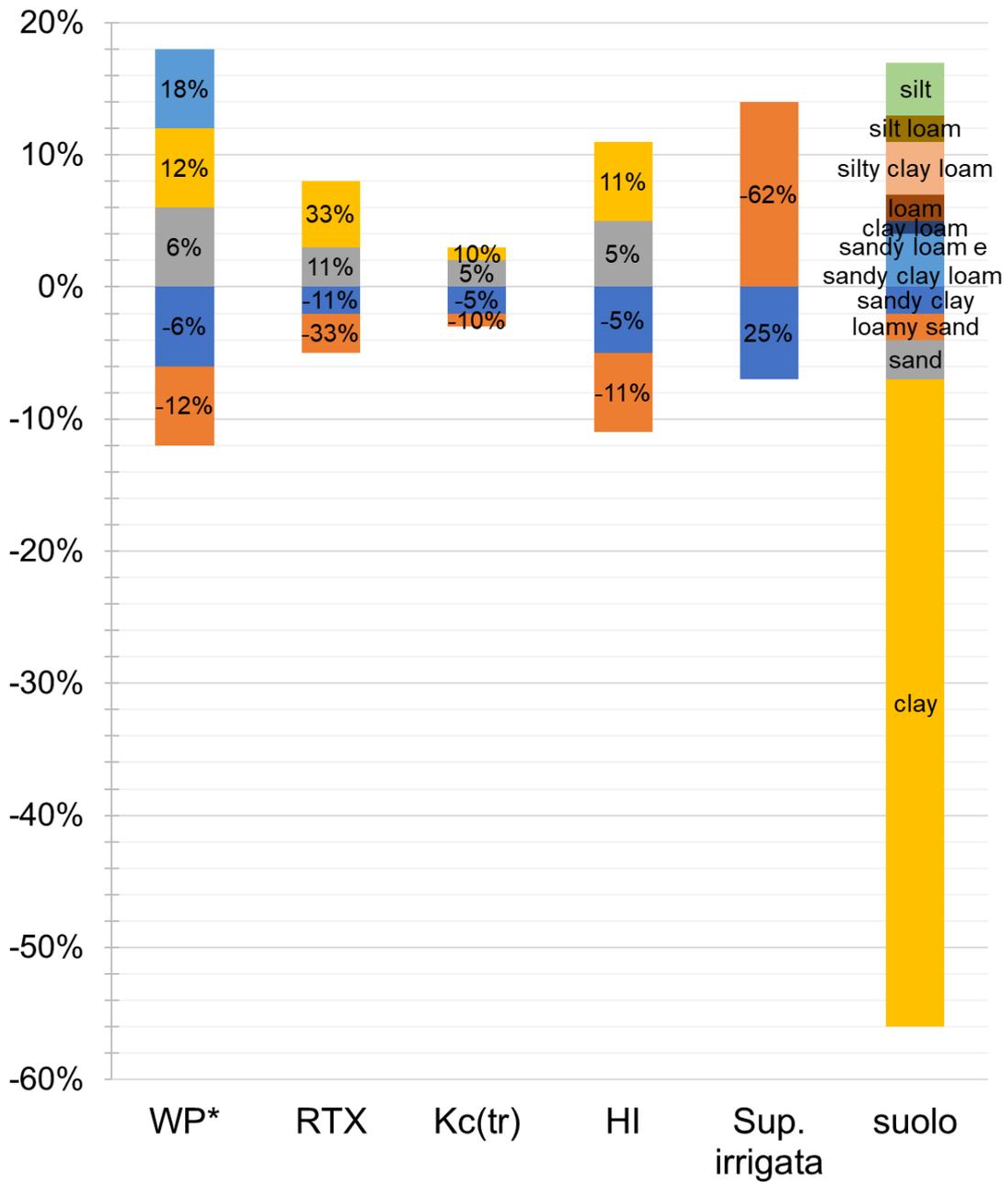


Figura 2.9 Variazione della produttività al variare dei parametri più influenti

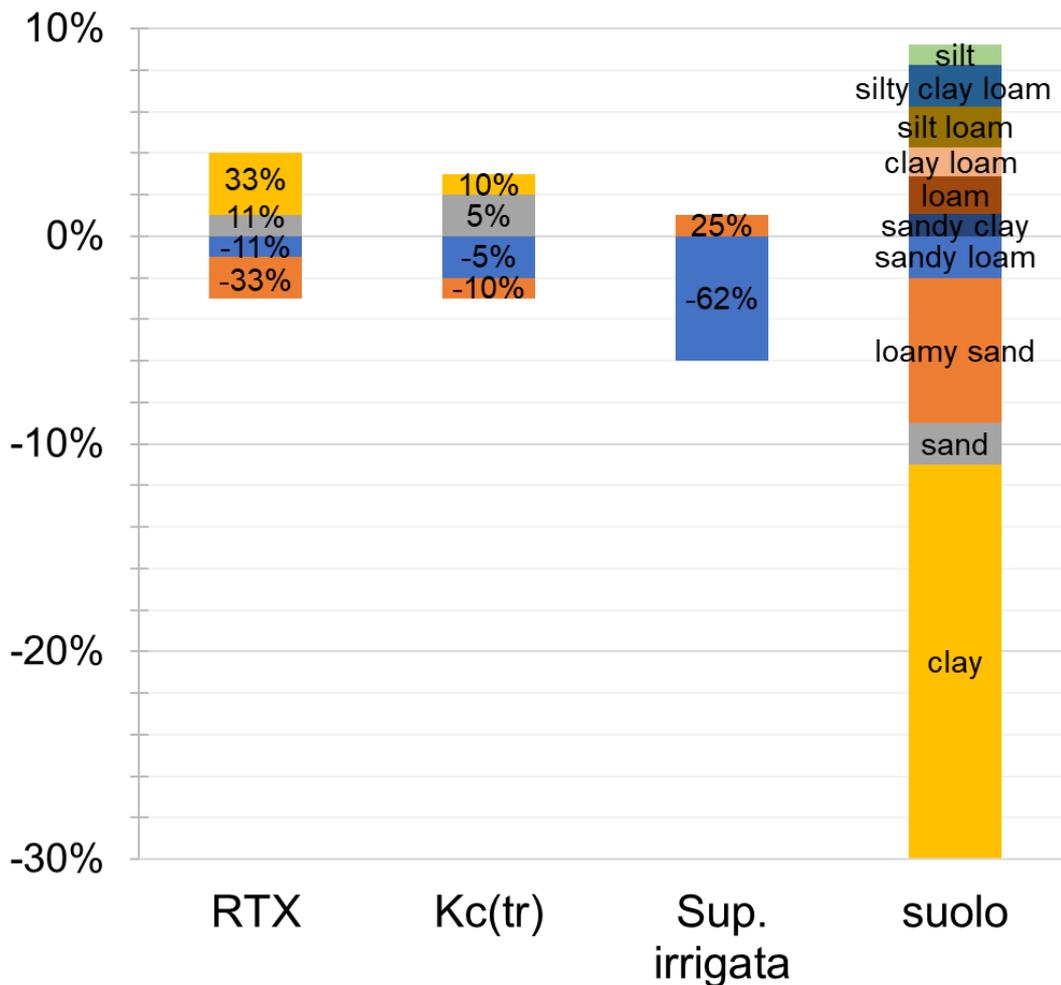


Figura 2.10 Variazione dell'ET cumulata al variare dei parametri più influenti

I parametri di riferimento sono stati i seguenti:

WP=17

RTX=0.45 m

Kc(tr)=1.3

Flo=496

HI=65

Superficie irrigata=80% (Irrigazione superficiale a solchi)

Suolo=Silty clay.

In Figura 2.10 non sono stati rappresentati WP\* e HI in quanto questi parametri non hanno alcun effetto sulla evapotraspirazione ma influenzano soltanto la produttività (Eq. (2.3). e Eq. (2.4)).

I valori percentuali indicati nei blocchi dei grafici indicano di quanto il parametro di riferimento è stato modificato (nel caso del suolo viene indicato il tipo di terreno selezionato),

mentre sulle ordinate si legge la corrispondente variazione di produttività o evapotraspirazione cumulata.

Di seguito l'analisi dei grafici:

- Dal primo grafico si nota che modificando WP\* e HI la produttività varia in maniera lineare, come ci si aspettava dalle equazioni appena ricordate;
- Aumentando la profondità delle radici aumenta sia la produttività che l'evapotraspirazione, diminuendola della stessa quantità la variazione è minore;
- Aumentando Kc aumentano, ovviamente, traspirazione e produttività;
- Le tipologie di irrigazioni selezionabili in AquaCrop sono: a pioggia, a goccia e di superficie, che a sua volta si divide in laterale, di bacino e a solchi. In realtà ciò che importa nella modellazione di AquaCrop è la superficie irrigata, infatti le tre irrigazioni a pioggia, di bacino e laterale, bagnando tutte il 100% della superficie hanno portato allo stesso output. Dal primo grafico (Figura 2.9) si nota che aumentando la superficie bagnata si riduce la produttività, mentre dal secondo grafico deduciamo che aumenta l'evapotraspirazione.
- Per suoli sabbiosi e per l'argilla, caratterizzati da un basso valore di TAW, si hanno valori bassi di produttività ed evapotraspirazione, mentre terreni con TAW più elevata presentano produttività ed evapotraspirazione maggiori.

I parametri "flo" e "piante al m<sup>2</sup>" non sono stati inseriti nel grafico in quando non hanno portato a variazioni così significative dell'output. Per completezza si riportano in Tabella 2.1 e Tabella 2.2 i relativi risultati.

Tabella 2.1 Variazioni relative al parametro "Flo"

$\Delta$ parametro	$\Delta$ ETcum	$\Delta$ Yield
-10%	0%	+1.8‰
-5%	0%	+1.4‰
+5%	0%	-0.5%
+10%	0%	-1.5‰

Tabella 2.2 Variazioni relative al numero di piante al m<sup>2</sup>

$\Delta$ parametro	$\Delta$ ETcum	$\Delta$ Yield
-10%	-3‰	-9‰
-5%	-2‰	-4‰
+5%	+2‰	+4‰
+10%	+4‰	+9‰

Nell'ambito dell'analisi di sensibilità è stato interessante anche visualizzare l'andamento dell'umidità del terreno al variare dei parametri sopra menzionati. Si riportano i risultati più

significativi, ovvero le curve di umidità relative a diversi valori di  $K_c$  (Figura 2.11) e alle diverse tipologie di terreno (Figura 2.12):

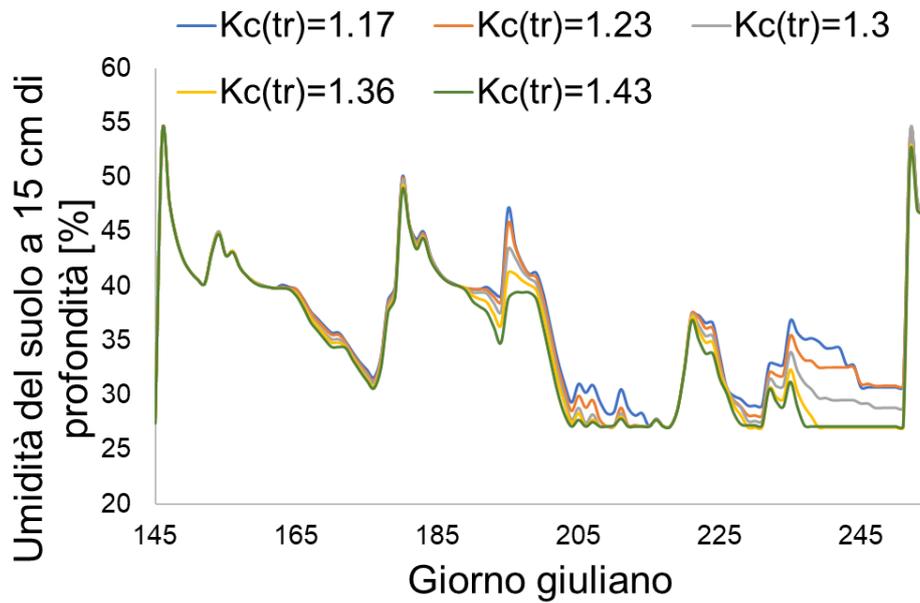


Figura 2.11 Andamento dell'umidità del terreno al variare di  $K_c$

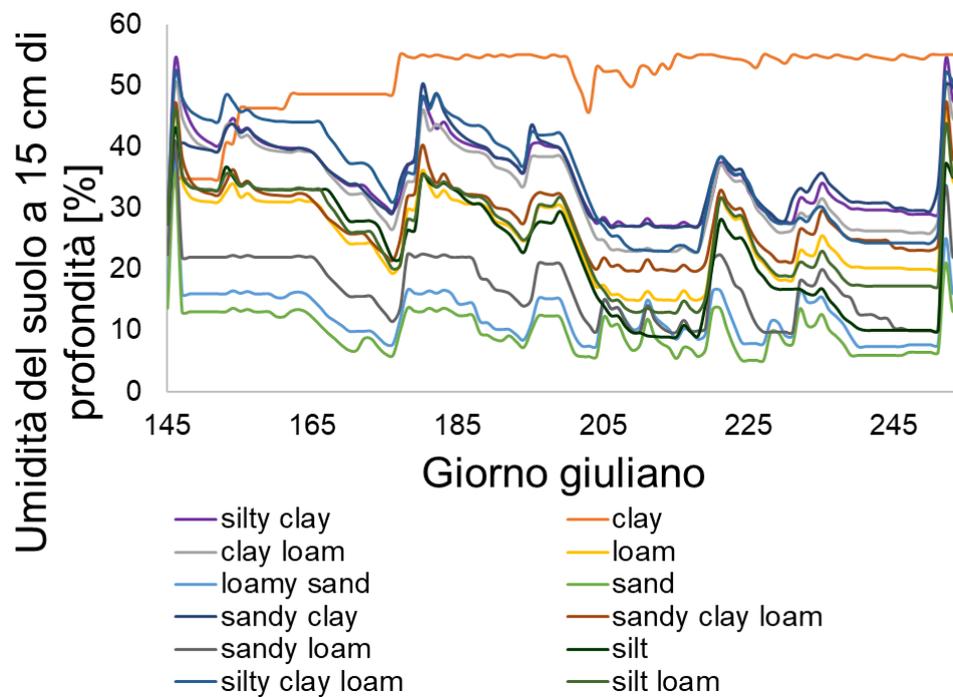


Figura 2.12 Andamento dell'umidità del terreno al variare della tipologia di suolo

Maggiore è il coefficiente culturale, maggiore è la traspirazione e di conseguenza cala l'umidità del terreno. Si noti come il divario tra le curve sia presente solo dopo un certo periodo, a

significare che all'inizio del ciclo colturale, quando la coltura è al principio del suo sviluppo, l'umidità del terreno è governata dall'evaporazione del terreno. Con lo sviluppo della coltivazione, la traspirazione guadagna peso nel bilancio idrico ed ha effetti sul contenuto idrico del suolo.

Cambiando il tipo di terreno si assiste a grandi variazioni dell'umidità in esso presente, in particolare il valore medio è molto legato alla Field Capacity e l'andamento generale al valore di saturazione e alla permeabilità.

## 2.5 Calibrazioni

Una volta terminata l'analisi di sensibilità si è passato alla calibrazione dei casi studio, che ricordiamo essere sette: due campi di pomodoro in Puglia, due di mais in Lombardia e i tre esperimenti condotti nell'EnvLab su basilico, pomodori ed erbe.

Più precisamente per i due campi di mais sono stati analizzati più anni: per il campo lodigiano lo studio è stato fatto sul tre anni diversi, mentre per quello bresciano su due anni.

### 2.5.1 Pomodori: Puglia

#### *Campo #1*



Figura 2.13 Primo campo pugliese analizzato e relativa strumentazione

Il primo campo pugliese calibrato è situato a poca distanza da Foggia, è coltivato a pomodori e irrigato a domanda con il metodo a goccia (Figura 2.13). I dati sono relativi all'anno 2016, il trapianto è avvenuto il 23 maggio e la raccolta il 10 settembre. Di questo terreno si conosce la Field Capacity, pari a 0.396, e il Wilting Point, pari a 0.272, che fanno ricadere il suolo nella categoria "argilla sabbiosa". La soglia di stress calcolata col metodo FAO è 0.346.

Le serie di dati sono complete, tranne per il calore latente, e il campionamento è avvenuto ogni mezz'ora. Non avendo tutti i dati relativi al calore latente non è stato possibile determinare l'ET. Una volta calcolati i valori giornalieri è stato possibile iniziare la calibrazione.

La Figura 2.14 riporta il grafico che rappresenta il valore di umidità osservato a 20 cm di profondità (nero), quello simulato con la prima calibrazione (grigio) e quello con la calibrazione migliore (marrone), la Field Capacity (verde), il Wilting Point (rosso) e la soglia di stress (arancione). La FC e il WP rappresentati sono relativi alla migliore calibrazione. La linea fucsia indica l'andamento che avrebbe avuto l'umidità, secondo il modello, se si fosse irrigato secondo SIM.

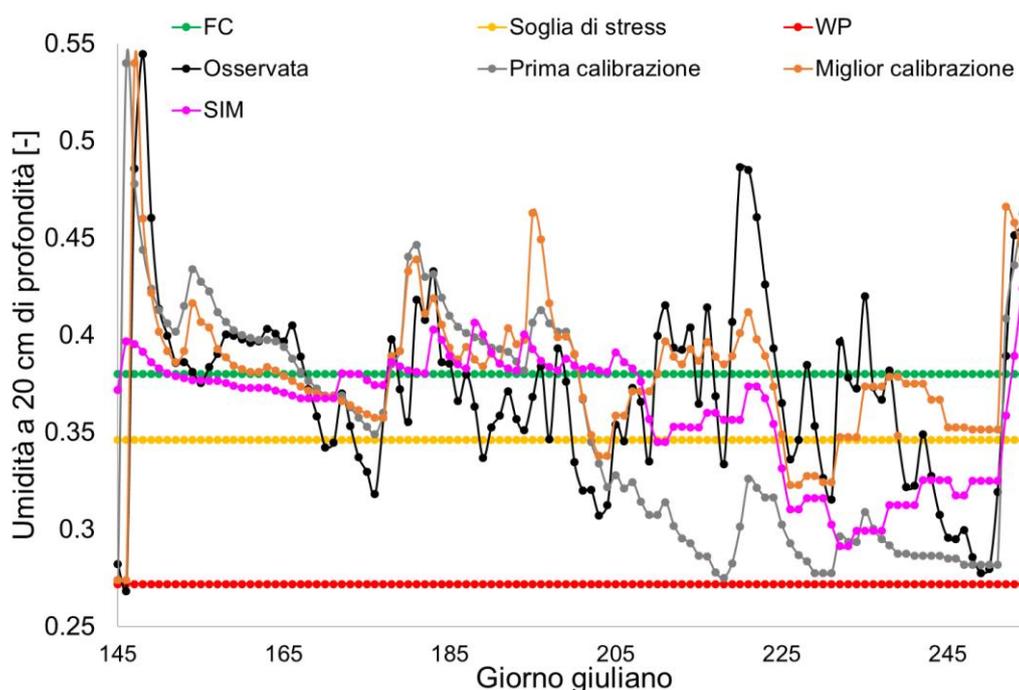


Figura 2.14 Andamento dell'umidità (campo #1 Puglia)

La Figura 2.15 riporta l'andamento dell'evapotraspirazione cumulata. Non avendo a disposizione la serie completa di dati relativi al calore latente, è stata presa come riferimento l'evapotraspirazione calcolata dal FEST-EWB all'interno del progetto SIM.

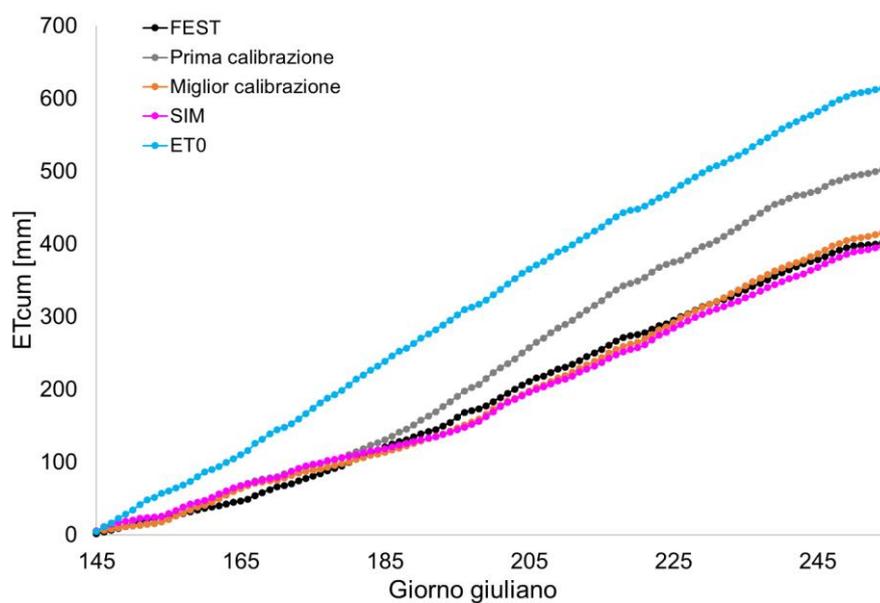


Figura 2.15 Andamento dell'evapotraspirazione cumulata (campo #1 Puglia)

In Tabella 2.3 vengono elencati i parametri che sono stati cambiati tra la prima e l'ultima calibrazione. Altri valori sono rimasti invariati, ovvero:

Numero di piante al m<sup>2</sup> = 12;

GDD from transplanting to maturity = 1532;

HI<sub>0</sub> = 0.65;

WP = 0.272;

SAT (umidità del terreno a saturazione) = 0.54;

Superficie bagnata = 30%:

CN = 82;

REW = 8 mm.

Tabella 2.3 Tabella dei parametri modificati (campo #1 Puglia)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
<b>CROP</b>		
Kc	1.3	1.08
Max CC	70%	65%
Canopy size transplanting seedlings [cm <sup>2</sup> /plant]	20	15
CC <sub>o</sub>	2.40%	1.80%
GDD from transplanting to recovery	62	63
GDD from transplanting to max canopy	967	1278
GDD from transplanting to max rooting depth	726	835
GDD from transplanting to senescence	1261	1278
GDD from transplanting to flowering	434	508
Duration of flowering [GDD]	189	688
Length building up HI [GDD]	756	787
Max rooting depth [m]	0.3	0.4
WP* [g/m <sup>2</sup> ]	17	20.5
<b>SOIL</b>		
FC	0.396	0.38
Ksat [mm/day]	100	150

In Tabella 2.4 sono mostrati gli indici statistici relativi all'umidità del suolo per la prima calibrazione e per quella migliore. Quelli riferiti all'evapotraspirazione non sono stati calcolati in quanto il non erano presenti sufficienti dati osservati.

Tabella 2.4 Indici statistici (campo #1 Puglia)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.045	0.027
RMSE [-]	0.063	0.034
EF [-]	-0.775	0.483

AquaCrop fornisce come output la quantità di prodotto secco, per ottenere la produzione fresca quella secca è stata divisa per un coefficiente pari a 0.055 che rappresenta la percentuale di peso secco del frutto (Rinaldi et al., 2011). Le produttività fresche sono:

reale: 110 ton/ha;

miglior calibrazione: 99.8 ton/ha;

calibrazione SIM: 92.9 ton/ha.

L'errore tra la produzione simulata e osservata è del 9%.

Per l'irrigazione sono stati usati 516 mm di acqua, mentre SIM prevede l'utilizzo di 322 m, ovvero un risparmio del 37.6% che porta però alla perdita del 7% in termini di produzione.

In Tabella 2.5 sono trascritti gli indicatori riassuntivi relativi a questo primo caso di studio:

Tabella 2.5 Indicatori riassuntivi (campo #1 Puglia)

	Osservato	Aquacrop	Aquacrop SIM	Generici
WUE [ton/m <sup>3</sup> ]		0.024	0.023	
IWUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0.020	0.018	0.029	
Evaporation deficit [mm]		91.1	116.9	
Precipitation deficit [mm]		-371.7	-379.6	
Relative soil water deficit [-]	0.081	-0.012	0.169	
Relative ET deficit [-]		0.180	0.227	
Indice percolazione [-]		0.838	1.000	
Efficienza irrigua [-]		0.608	0.869	
T air media [°C]				23.1
Pioggia nella stagione irrigua [mm]				134.6
Volume irriguo [m <sup>3</sup> /ha]	5479	5479	3223	
Numero irrigazioni	27	27	15	

L'indicatore relativo all'efficienza IWUE e l'efficienza irrigua sono maggiori nel caso SIM, a dimostrare che l'irrigazione SIM sarebbe stata migliore di quella effettivamente imposta. Inoltre, l'indice di percolazione pari a 1 mostra che nel caso SIM non ci sarebbe stata percolazione.

Non avendo a disposizione i dati osservati di evapotraspirazione, i relativi indicatori non sono stati calcolati.

## ***Campo #2***



Figura 2.16 Secondo campo pugliese analizzato e relativa strumentazione

Anche il secondo campo pugliese studiato è situato a poca distanza da Foggia, è coltivato a pomodori e irrigato a domanda con il metodo a goccia (Figura 2.16). I dati sono relativi all'anno 2016, il trapianto è avvenuto il 10 maggio e la raccolta il 29 agosto. Di questo terreno si conosce la Field Capacity, pari a 0.318, e il Wilting Point, pari a 0.197, che fanno ricadere il suolo nella categoria sabbiosa. La soglia di stress è 0.264. Le serie di dati sono complete, tranne per il calore latente, e il campionamento è avvenuto ogni mezz'ora. Non avendo tutti i dati relativi al calore latente non è stato possibile determinare l'ET. Una volta calcolati i valori giornalieri è stato possibile iniziare la calibrazione. I risultati di AquaCrop relativi all'evapotraspirazione sono stati confrontati con quelli del modello FEST.

La Figura 2.17 riporta il grafico che rappresenta il valore di umidità osservato a 20 cm di profondità (nero), quello simulato con la calibrazione migliore (marrone), la Field Capacity (verde), il Wilting Point (rosso) e la soglia di stress (arancione). La linea fucsia indica l'andamento che avrebbe avuto l'umidità se si fosse irrigato secondo SIM. I valori di FC e WP rappresentati sono quelli dati.

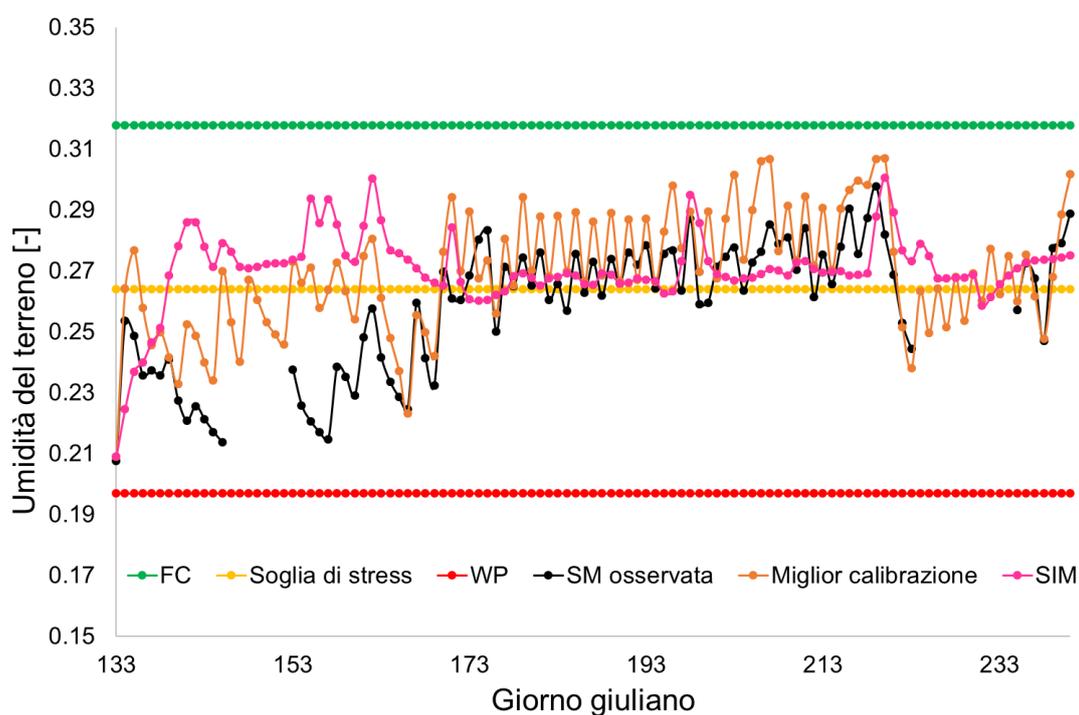


Figura 2.17 Andamento dell'umidità (campo #2 Puglia)

La Figura 2.18 riporta l'andamento dell'evapotraspirazione cumulata. Non avendo a disposizione la serie completa di dati relativi al calore latente, è stata presa come riferimento l'evapotraspirazione calcolata dal FEST-EWB. Dal grafico si nota che l'evapotraspirazione stimata da AquaCrop è molto maggiore di quella modellata dal FEST-EWB.

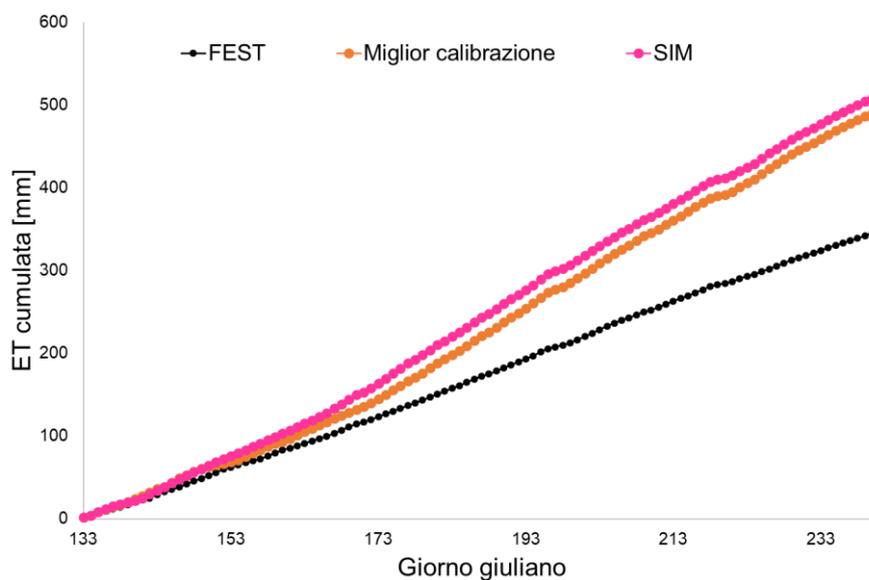


Figura 2.18 Andamento dell'evapotraspirazione cumulata (campo #2 Puglia)

In Tabella 2.6 vengono elencati i parametri che sono stati cambiati tra la prima e l'ultima calibrazione. Altri valori sono rimasti invariati, ovvero:

Canopy size transplanting seedlings = 15 cm<sup>2</sup>/plant;

Numero di piante al m<sup>2</sup> = 10;

CC<sub>0</sub> = 1.5%;

GDD from transplanting to max rooting depth = 748;

GDD from transplanting to senescence = 1225;

GDD from transplanting to maturity = 1505;

GDD from transplanting to flowering = 506;

Duration of flowering = 599 GDD;

Length of building up HI = 829 GDD;

Max rooting depth = 0.3 m;

WP\* = 19.5 g/m<sup>2</sup>;

HI<sub>0</sub> = 65%;

Superficie bagnata = 30%;

CN = 72;

REW = 9 mm

Tabella 2.6 Tabella dei parametri modificati (campo #2 Puglia)

	Prima calibrazione	Calibrazione migliore
<b>CROP</b>		
Kc	1.04	0.9
Max CC	69%	80%
GDD from transplanting to recovery	38	38
GDD from transplanting to max canopy	800	847
<b>SOIL</b>		
WP	0.197	0.15
FC	0.318	0.26
SAT	0.47	0.43
Ksat [mm/day]	225	600

In Tabella 2.7 sono mostrati gli indici statistici relativi all'umidità del suolo per la prima calibrazione e per quella migliore. Quelli riferiti all'evapotraspirazione non sono stati calcolati in quanto il non erano presenti sufficienti dati osservati.

Tabella 2.7 Indici statistici - umidità (campo #1 Puglia)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.084	0.015
RMSE [-]	0.009	0.002
EF [-]	-14.978	0.238

Come per il primo campo pugliese, anche in questo caso la produttività secca fornita da AquaCrop è stata moltiplicata per il coefficiente di conversione 0.055 per ottenere quella fresca. Le produttività fresche sono dunque:

reale: 110 ton/ha;

miglior calibrazione: 111.1 ton/ha;

calibrazione SIM: 113.2 ton/ha.

L'errore tra la produzione simulata e osservata è inferiore all'1%.

Per l'irrigazione sono stati usati 646.6 mm di acqua, mentre SIM prevede l'utilizzo di 590 m, ovvero un risparmio del 8.7% che porta inoltre al guadagno del 2.7% in termini di produzione.

In Tabella 2.8 sono trascritti gli indicatori riassuntivi relativi a questo secondo caso di studio:

Tabella 2.8 Indicatori riassuntivi (campo #2 Puglia)

	Osservati	Aquacrop	Aquacrop SIM	Generici
WUE [ton/m <sup>3</sup> ]		0.026	0.025	
IWUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0.017	0.017	0.019	
Evaporation deficit [mm]		29.3	5.4	
Precipitation deficit [mm]		-324.2	-321.4	
Relative soil water deficit	0.015	-0.087	-0.096	
Relative ET deficit		0.064	0.012	
Indice percolazione		0.636	0.719	
Efficienza irrigua		0.551	0.623	
T air media [°C]				22.97
Pioggia nella stagione irrigua [mm]				136.8
Volume irriguo [m <sup>3</sup> /ha]		6466	5900	
Numero di irrigazioni	43	43	98	

L'indicatore relativo all'efficienza IWUE, l'efficienza irrigua e l'indice di percolazione sono maggiori nel caso SIM, a dimostrare che l'irrigazione SIM sarebbe stata migliore di quella effettivamente imposta.

Non avendo a disposizione i dati osservati di evapotraspirazione, i relativi indicatori non sono stati calcolati

### ***Confronto degli indicatori***

Negli istogrammi di Figura 2.19 sono raggruppati gli indicatori riassuntivi dei due campi di pomodoro pugliesi analizzati. I due campi sono rappresentati con due colori diversi (blu e verde), la tonalità più chiara indica il caso modellato con le irrigazioni parsimoniosa calcolate con SIM. Per entrambi i campi, ovviamente, nel caso SIM il volume d'acqua utilizzato per le irrigazioni diminuisce, così come il WUE seppur in maniera minima, mentre IWUE, l'indice di percolazione e l'efficienza irrigua aumentano. Il confronto evidenzia come la tipologia di suolo influenzi gli indicatori: l'analisi dei due campi (geograficamente vicini) infatti è stata effettuata per la stessa stagione colturale, e quindi le forzanti atmosferiche sono praticamente le stesse. Interessante notare che SIM per il secondo campo analizzato prevede un numero molto maggiore di irrigazioni. Questo perché il suolo è di tipo sabbioso e per tanto non è in grado di trattenere molta acqua. Per questo è preferibile aumentare il numero di irrigazioni diminuendo la quantità d'acqua fornita con ognuna di esse.

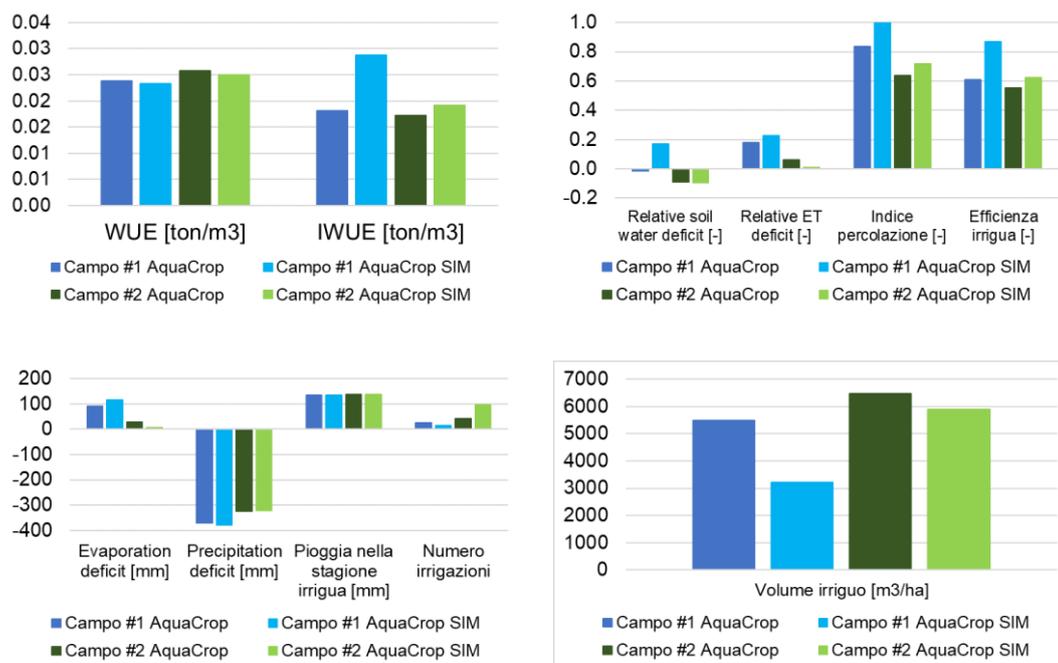


Figura 2.19 Indicatori a confronto (campi pugliesi)

## 2.5.2 Mais: Livraga

Uno dei due campi di mais studiati si trova a Livraga (LO), nel comprensorio irriguo della Muzza (Figura 2.20). Il terreno franco limoso ha una capacità di campo pari a 0.33, una soglia di stress di 0.23 e un punto di appassimento di 0.133. L'irrigazione a scorrimento superficiale è disponibile a turni fissati di 15 giorni, ma il terreno viene effettivamente irrigato solo due/tre volte durante il ciclo colturale. L'analisi è stata condotta su tre anni: 2010, 2011 e 2012.



Figura 2.20 Campo di Livraga e relativa strumentazione

La calibrazione è stata eseguita prendendo come riferimento la media delle umidità del terreno alle profondità di 10, 35 e 60 cm, in quanto qui le radici del mais arrivano fino a 70/80 cm. Per calcolare la produzione fresca partendo da quella secca fornita da AquaCrop, è stato utilizzato un coefficiente di conversione pari a 0.8, che rappresenta la percentuale di contenuto secco della pannocchia. Per i tre anni la produttività considerata è quella osservata dall'ISTAT ([http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSP\\_COLTIVAZ#](http://dati.istat.it/Index.aspx?DataSetCode=DCSP_COLTIVAZ#)) per la provincia di Lodi e pari a 12 ton/ha di granella.

## 2010

La semina è avvenuta il 26 aprile e la raccolta l'11 ottobre. Le irrigazioni sono state fornite il 16 giugno, 7 luglio e 31 luglio. Le serie di dati disponibili partono dal 26 maggio, pertanto è stato necessario integrarle con le osservazioni delle stazioni ARPA vicine.

La Figura 2.21 riporta il grafico che rappresenta il valore di umidità medio delle osservazioni alle tre profondità sopra indicate (nero), quello simulato con la prima calibrazione (grigio) e quello con la calibrazione migliore (marrone), la Field Capacity (verde), il Wilting Point (rosso) e la soglia di stress (arancione). La FC e il WP rappresentati sono relativi alla migliore calibrazione.

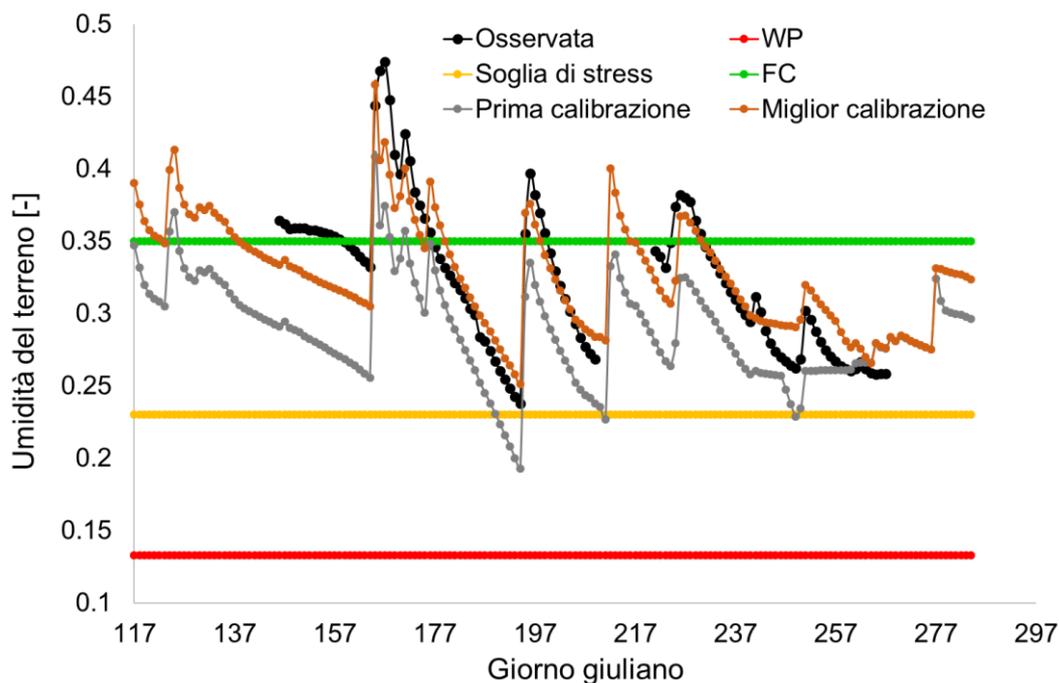


Figura 2.21 Andamento dell'umidità (Livraga, 2010)

La Figura 2.22 riporta l'andamento dell'evapotraspirazione cumulata. Non avendo a disposizione la serie completa di dati relativi al calore latente, al fine di fare un confronto, l'ET simulata è stata posta nulla in corrispondenza dei giorni di cui non si aveva il valore osservato.

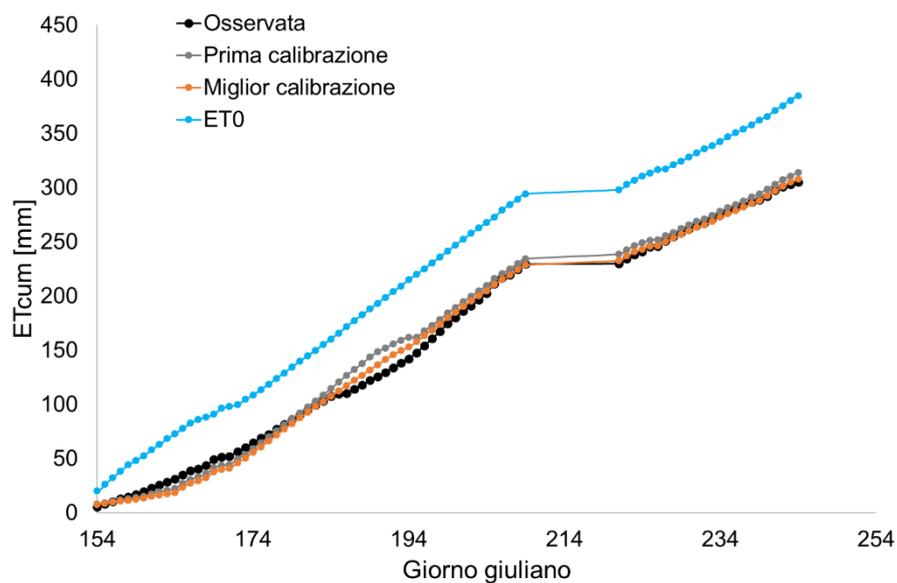


Figura 2.22 Andamento dell'evapotraspirazione cumulata (Livraga, 2010)

In Tabella 2.9 vengono elencati i parametri che sono stati cambiati tra la prima e l'ultima calibrazione. Altri valori sono rimasti invariati, ovvero:

Max CC = 96%;

Canopy size transplanting seedlings = 6.5 cm<sup>2</sup>/plant;

Numero di piante al m<sup>2</sup> = 7.5;

CC<sub>0</sub> = 0.49%;

GDD from sowing to flowering = 880;

Ksat = 575 mm/giorno;

Superficie bagnata = 100%;

CN = 61;

REW = 11 mm.

Tabella 2.9 Tabella dei parametri modificati (Livraga, 2010)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
<b>CROP</b>		
Kc	1.05	1.1
GDD from sowing to emergence	80	96
GDD from sowing to max canopy	705	1008
GDD from sowing to max rooting depth	1409	1716
GDD from sowing to senescence	1400	1800
GDD from sowing to maturity	2064	2069
Duration of flowering [GDD]	180	240
Length building up HI [GDD]	1140	1128
Max rooting depth [m]	2.3	0.65
WP* [g/m <sup>2</sup> ]	33.7	31
HI <sub>o</sub>	48%	45%
<b>SOIL</b>		
WP	0.13	0.133
FC	0.33	0.35
SAT	0.46	0.49

In Tabella 2.10 sono mostrati gli indici statistici relativi all'umidità del suolo per la prima calibrazione e per quella migliore. Quelli riferiti all'evapotraspirazione sono mostrati in Tabella 2.11. L'evapotraspirazione cumulata osservata è pari a 305.15 mm, mentre quella simulata con la miglior calibrazione è di 307.9 presentando quindi un errore percentuale inferiore all'1%.

Tabella 2.10 Indici statistici - umidità (Livraga, 2010)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.046	0.020
RMSE [-]	0.057	0.023
EF [-]	0.174	0.794

Tabella 2.11 Indici statistici - evapotraspirazione (Livraga, 2010)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	1.176	0.957
RMSE [-]	1.556	1.235
EF [-]	0.014	0.379

La produttività secondo la miglior calibrazione è di 14.6 ton/ha di prodotto fresco, ovvero il 21.75% in più del valore ISTAT.

In Tabella 2.12 sono trascritti gli indicatori riassuntivi relativi a questo caso di studio:

Tabella 2.12 Indicatori riassuntivi (Livraga, 2010)

	Osservato	Aquacrop	Generici
WUE [ton/m <sup>3</sup> ]		0.003	
IWUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0.004	0.005	
Evaporation deficit [mm]		148	
Precipitation deficit [mm]		-284.3	
Relative soil water deficit [-]		0.104	
Relative ET deficit [-]		0.238	
Indice percolazione [-]		0.726	
Efficienza irrigua [-]		0.743	
T air media [°C]			20.3
Pioggia nella stagione irrigua [mm]			337
Volume irriguo [m <sup>3</sup> /ha]			3000
Numero di irrigazioni			3

Non avendo a disposizione la serie completa dei dati di umidità e calore latente osservati, non è stato possibile calcolare alcuni indicatori ed essi relativi.

## **2011**

La semina è avvenuta il 9 aprile e la raccolta il 20 agosto. Le irrigazioni sono state fornite il 14 e il 29 giugno. Le serie di dati disponibili coprono il ciclo colturale con alcune interruzioni, che risultano abbastanza numerose nel caso del calore latente. Per questo motivo l'evapotraspirazione cumulata ottenuta non rappresenta solo parte di quella reale.

La Figura 2.23 riporta il grafico che rappresenta il valore di umidità medio delle osservazioni alle tre profondità sopra indicate (nero), quello simulato con la prima calibrazione (grigio) e quello con la calibrazione migliore (marrone), la Field Capacity (verde), il Wilting Point (rosso) e la soglia di stress (arancione). La FC e il WP rappresentati sono relativi alla migliore calibrazione.

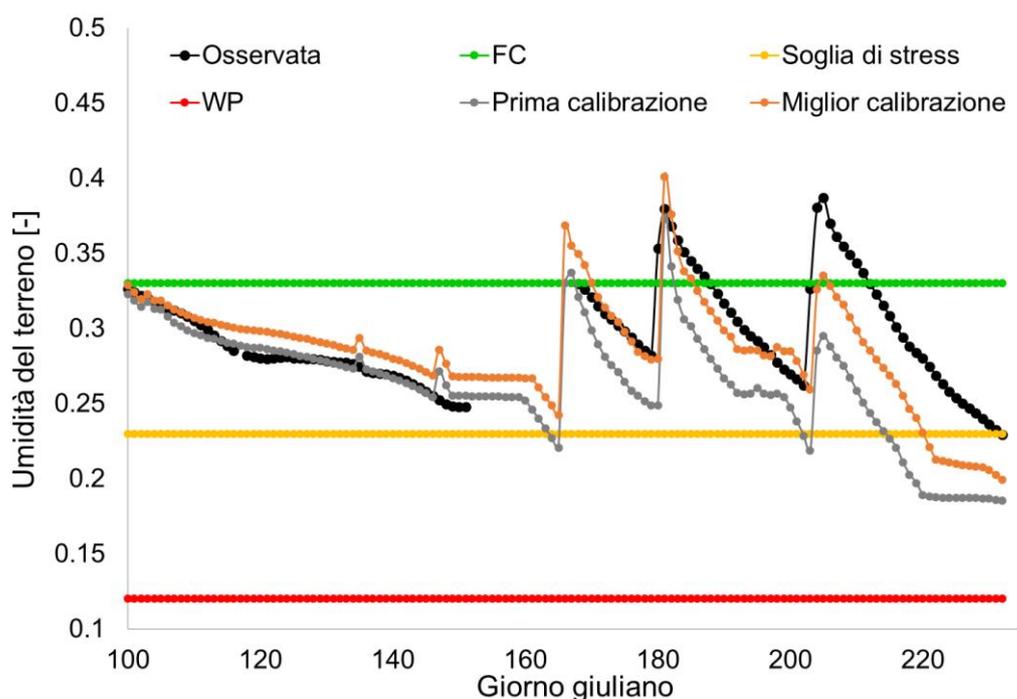


Figura 2.23 Andamento dell'umidità (Livraga, 2011)

La Figura 2.24 riporta l'andamento dell'evapotraspirazione cumulata. Non avendo a disposizione la serie completa di dati relativi al calore latente, al fine di fare un confronto, l'ET simulata è stata posta nulla in corrispondenza dei giorni di cui non si aveva il valore osservato.

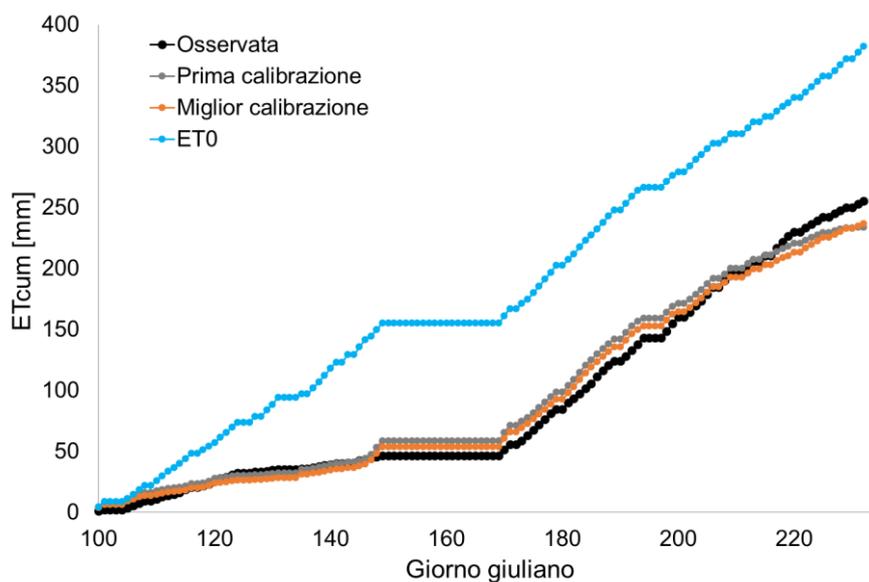


Figura 2.24 Andamento dell'evapotraspirazione cumulata (Livraga, 2011)

In Tabella 2.13 vengono elencati i parametri che sono stati cambiati tra la prima e l'ultima calibrazione. Altri valori sono rimasti invariati, ovvero:

Kc = 1.05;  
 Max CC = 99%;  
 Canopy size transplanting seedlings = 6.5 cm<sup>2</sup>/plant;  
 Numero di piante al m<sup>2</sup> = 7.5;  
 CC<sub>o</sub> = 0.49%;  
 GDD from sowing to emergence = 80;  
 GDD from sowing to max canopy = 702;  
 GDD from sowing to max rooting depth = 1400;  
 GDD from sowing to maturity = 1663;  
 GDD from sowing to flowering = 660;  
 Duration of flowering = 180 GDD;  
 Length of building up HI = 986 GDD;  
 Max rooting depth = 0.7 m;  
 FC = 33;  
 Ksat = 575 mm/day;  
 Superficie bagnata = 100%;  
 CN = 61;  
 REW = 11 mm.

Tabella 2.13 Tabella dei parametri modificati (Livraga, 2011)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
<b>CROP</b>		
GDD from sowing to senescence	1384	1536
WP* [g/m <sup>2</sup> ]	33.7	34.3
HI <sub>o</sub>	48%	51%
<b>SOIL</b>		
WP	13.3	12
SAT	46	50

In Tabella 2.14 sono mostrati gli indici statistici relativi all'umidità del suolo per la prima calibrazione e per quella migliore. Quelli riferiti all'evapotraspirazione sono mostrati in Tabella 2.15. L'evapotraspirazione cumulata parziale osservata è pari a 255.4 mm, mentre quella simulata con la miglior calibrazione è di 236.6 mm presentando quindi un errore percentuale del 7.4%.

Tabella 2.14 Indici statistici - umidità (Livraga, 2011)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.032	0.020
RMSE [-]	0.045	0.026
EF [-]	-0.695	0.451

Tabella 2.15 Indici statistici - evapotraspirazione (Livraga, 2011)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	1.112	1.010
RMSE [-]	1.485	1.408
EF [-]	0.285	0.358

La produttività secondo la miglior calibrazione è di 11.88 ton/ha di prodotto fresco, ovvero 0.9% in meno del valore ISTAT.

In Tabella 2.16 sono trascritti gli indicatori riassuntivi relativi a questo caso di studio:

Tabella 2.16 Indicatori riassuntivi (Livraga, 2011)

	Osservato	Aquacrop	Generici
WUE [ton/m <sup>3</sup> ]		0.003	
IWUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0.006	0.006	
Evaporation deficit [mm]		270.6	
Precipitation deficit [mm]		-525.6	
Relative soil water deficit [-]	0.166	0.207	
Relative ET deficit [-]		0.425	
Indice percolazione [-]		0.905	
Efficienza irrigua [-]		1.176	
T air media [°C]			19.23
Pioggia nella stagione irrigua [mm]			111.8
Volume irriguo [m <sup>3</sup> /ha]			2000
Numero di irrigazioni			2

Avendo a disposizione una serie di dati del calore latente molto incompleta, non è stato possibile calcolare alcuni indicatori ed esso relativi.

## 2012

La semina è avvenuta il 20 aprile e la raccolta il 25 agosto. Le irrigazioni sono state fornite il 29 giugno, 14 luglio e 5 agosto. Le serie di dati disponibili coprono il ciclo colturale, anche se sono presenti alcuni buchi.

La Figura 2.25 riporta il grafico che rappresenta il valore di umidità medio delle osservazioni alle tre profondità sopra indicate (nero), quello simulato con la prima calibrazione (grigio) e

quello con la calibrazione migliore (marrone), la Field Capacity (verde), il Wilting Point (rosso) e la soglia di stress (arancione). La FC e il WP rappresentati sono relativi alla migliore calibrazione.

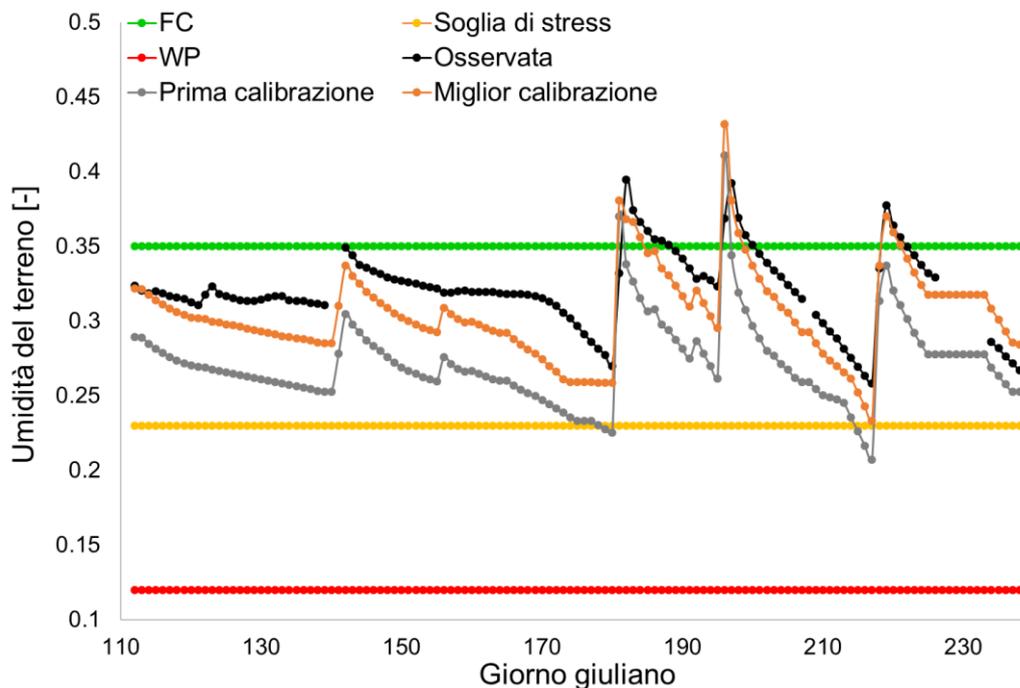


Figura 2.25 Andamento dell'umidità (Livraga, 2012)

La Figura 2.26 riporta l'andamento dell'evapotraspirazione cumulata. Non avendo a disposizione la serie completa di dati relativi al calore latente, al fine di fare un confronto, l'ET simulata è stata posta nulla in corrispondenza dei giorni di cui non si aveva il valore osservato.

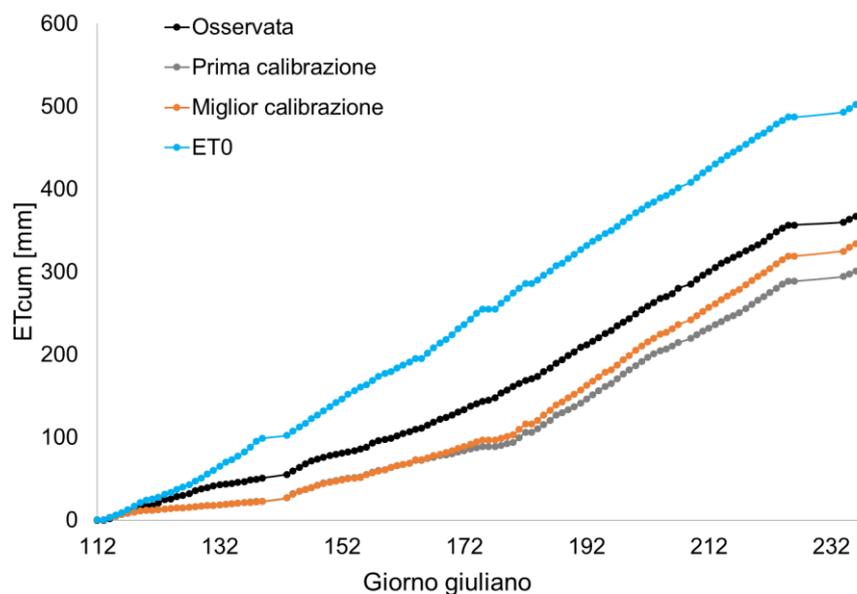


Figura 2.26 Andamento dell'evapotraspirazione cumulata (Livraga, 2012)

In Tabella 2.17 vengono elencati i parametri che sono stati cambiati tra la prima e l'ultima calibrazione. Altri valori sono rimasti invariati, ovvero:

Max CC = 91%;

Canopy size transplanting seedlings = 6.5 cm<sup>2</sup>/plant;

Numero di piante al m<sup>2</sup> = 7.5;

CC<sub>o</sub> = 0.49%;

GDD from transplanting to max rooting depth = 1500;

GDD from transplanting to senescence = 1596;

GDD from transplanting to maturity = 1693;

GDD from transplanting to flowering = 880;

Duration of flowering = 365 GDD;

Length building up HI = 692 GDD;

Max rooting depth = 0.7 m;

Superficie bagnata = 100%;

CN = 61;

REW = 11 mm.

Tabella 2.17 Tabella dei parametri modificati (Livraga, 2012)

	Prima calibrazione	Calibrazione migliore
<b>CROP</b>		
Kc	1.02	1.1
GDD from transplanting to recovery	80	90
GDD from transplanting to max canopy	1044	960
WP* [g/m <sup>2</sup> ]	33.7	34.1
HI <sub>o</sub>	0.48	0.54
<b>SOIL</b>		
WP	0.133	0.12
FC	0.33	0.35
SAT	0.46	0.445
Ksat [mm/day]	575	600

Prima del ciclo colturale, il suolo viene movimentato per creare un ambiente fisico ideale alla crescita delle piante. Per questo motivo è naturale che di anno in anno le proprietà del suolo quali FC, WP e SAT varino leggermente. Confrontando i corrispondenti valori utilizzati nelle calibrazioni dei tre anni, si nota che le variazioni sono accettabili.

In Tabella 2.18 sono mostrati gli indici statistici relativi all'umidità del suolo per la prima calibrazione e per quella migliore. Quelli riferiti all'evapotraspirazione sono mostrati in Tabella 2.19. L'evapotraspirazione cumulata osservata è pari a 373.1 mm, mentre quella simulata con la miglior calibrazione è di 342.8 mm, presentando quindi un errore percentuale dell'8%.

Tabella 2.18 Indici statistici - umidità (Livraga, 2012)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.051	0.020
RMSE [-]	0.052	0.023
EF [-]	-3.058	0.221

Tabella 2.19 Indici statistici - evapotraspirazione (Livraga, 2012)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	1.010	0.932
RMSE [-]	1.296	1.222
EF [-]	0.231	0.316

La produttività fresca simulata con la miglior calibrazione è pari a 11.25 ton/ha, inferiore del 6.25% rispetto al valore ISTAT.

In Tabella 2.20 sono trascritti gli indicatori riassuntivi relativi a questo caso di studio.

Tabella 2.20 Indicatori riassuntivi (Livraga, 2012)

	Osservato	AquaCrop	Generici
WUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0.003	0.003	
IWUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0.004	0.004	
Evaporation deficit [mm]		212.0	
Precipitation deficit [mm]	-477.2	-477.2	
Relative soil water deficit [-]	0.243	0.195	
Relative ET deficit [-]	0.329	0.381	
Indice percolazione [-]		0.885	
Efficienza irrigua [-]	0.984	0.908	
T air media [°C]			21.65
Pioggia nella stagione irrigua [mm]			79.2
Volume irriguo [m <sup>3</sup> /ha]			3000
Numero di irrigazioni			3

## **Confronto degli indicatori**

Negli istogrammi di Figura 2.27 sono raggruppati gli indicatori riassuntivi dei tre anni studiati per il campo di Livraga. L'unico indicatore non inserito, per questioni di visualizzazione, è quello relativo al numero di irrigazioni, che sono 3 per il 2010 e 2012 e 2 per il 2011. Si nota immediatamente che il WUE è circa uguale nei tre anni, mentre gli altri indicatori variano maggiormente. L'anno 2011 è quello che ha risparmiato più acqua senza perdere in produttività, al contrario il 2010 ha visto la presenza di precipitazioni importanti che hanno portato alla percolazione e alla diminuzione dell'efficienza irrigua.

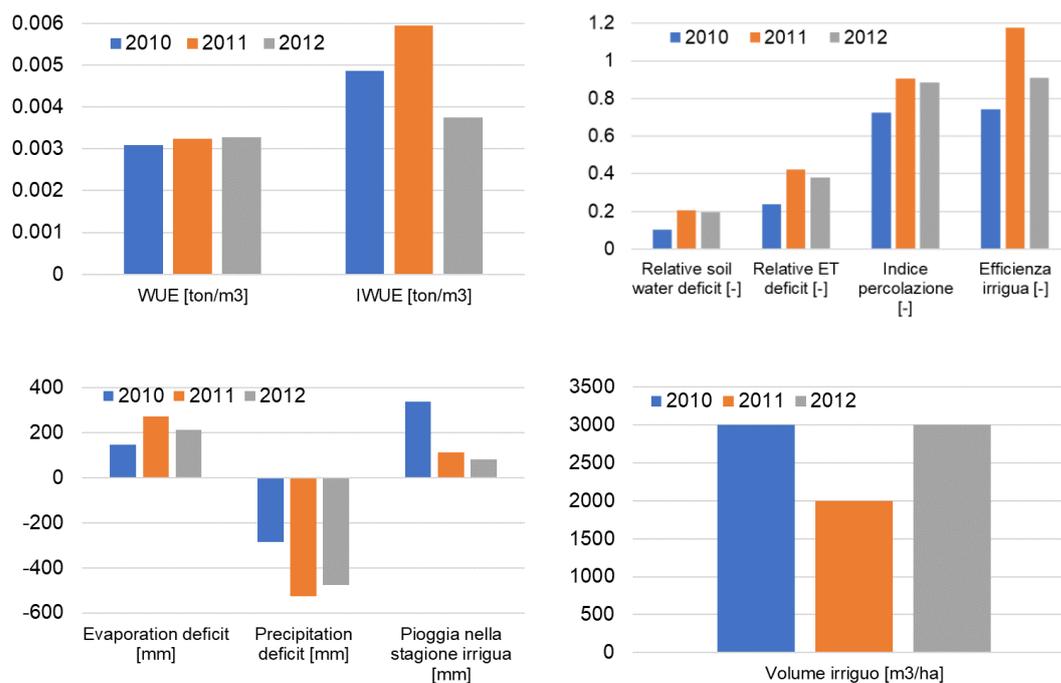


Figura 2.27 Indicatori a confronto (Livraga)

### 2.5.3 Mais: Calcinato

Il secondo campo di mais analizzato si trova nel territorio di Calcinato (BS), nel comprensorio irriguo del Chiese (Figura 2.28). Sono stati presi in esame gli anni 2016 e 2017.



Figura 2.28 Campo di Calcinato e relativa strumentazione

L'irrigazione presente è a turno ed è relativa a due diversi mappali, uno prevede 133.1 mm di acqua mentre l'altro 76.4 mm. Ogni mappale ha il turno di 8/9 giorni. Il suolo presenta una capacità di campo pari a 0.24. una soglia di stress per il mais di 0.15 secondo la FAO e un punto di appassimento di 0.08.

Secondo l'ISTAT nella provincia di Brescia nel 2011 (dato più recente) sono state prodotte 12.59 ton/ha di granella.

Per questo caso studio non è stata calcolata l'irrigazione ottimale con SIM.

## 2016

La semina del mais è avvenuta il 20 maggio e la raccolta il 7 settembre. Le serie di dati relative a pioggia, temperatura e umidità relativa presentavano moltissime lacune, quindi sono stati considerati i dati reperiti dalla stazione ARPA di Gambara.

La Figura 2.29 riporta il grafico che rappresenta il valore di umidità rilevato alla profondità di 20 cm (nero), quello simulato con la prima calibrazione (grigio) e quello con la calibrazione migliore (marrone), la Field Capacity (verde), il Wilting Point (rosso) e la soglia di stress (arancione). La FC e il WP rappresentati sono relativi alla migliore calibrazione.

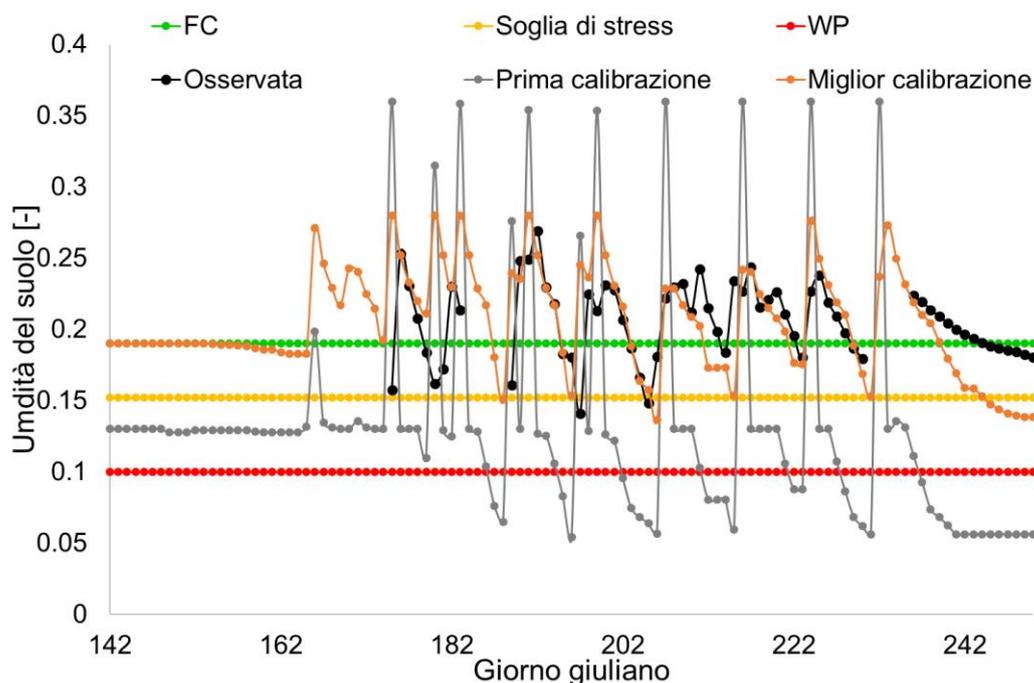


Figura 2.29 Andamento dell'umidità (Calcinato, 2016)

La serie di dati relativi al calore latente è inutilizzabile, pertanto non si è potuta calcolare l'evapotraspirazione osservata. Secondo la prima calibrazione di AquaCrop l'ET cumulata è di 414.7 mm, mentre la calibrazione migliore indica 389.2 mm.

In Tabella 2.21 vengono elencati i parametri che sono stati cambiati tra la prima e l'ultima calibrazione. Altri valori sono rimasti invariati, ovvero:

$K_c = 1.05$ ;

Max CC = 96%;

Canopy size transplanting seedlings = 6.5 cm<sup>2</sup>/plant;

Numero di piante al m<sup>2</sup> = 7.5;

CC<sub>0</sub> = 0.49%;

GDD from sowing to emergence = 98;

GDD from sowing to maturity = 1642;

GDD from sowing to flowering = 923;

Duration of flowering = 197 GDD;

Length building up HI = 690 HI;

WP\* = 33.7 g/m<sup>2</sup>;

Superficie bagnata = 100%

Tabella 2.21 Tabella dei parametri modificati (Calcinato, 2016)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
<b>CROP</b>		
GDD from sowing to max canopy	751	684
GDD from sowing to max rooting depth	1437	1248
GDD from sowing to senescence	1437	1140
Max rooting depth [m]	2.3	0.6
HI <sub>0</sub>	48%	46%
<b>SOIL</b>		
WP	0.06	0.1
FC	0.13	0.19
SAT	0.36	0.28
Ksat [mm/day]	3000	38
CN	46	77
REW [mm]	4	7

In Tabella 2.22 sono mostrati gli indici statistici relativi all'umidità del suolo per la prima calibrazione e per quella migliore. Quelli riferiti all'evapotraspirazione non sono stato calcolati per mancanza di dati osservati.

Tabella 2.22 Indici statistici - umidità (Calcinato, 2016)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.117	0.027
RMSE [-]	0.120	0.039
EF [-]	-19.140	-1.124

La produttività fresca simulata con la miglior calibrazione è pari a 12.42 ton/ha, inferiore del 1.35% rispetto al valore ISTAT.

In sono trascritti gli indicatori riassuntivi relativi a questo caso di studio.

Tabella 2.23 Indicatori riassuntivi (Calcinato, 2016)

	Osservato	Aquacrop	Generici
WUE [ton/m <sup>3</sup> ]		0.003	
IWUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0.001	0.001	
Evaporation deficit [mm]		66.8	
Precipitation deficit [mm]			-255.6
Relative soil water deficit [-]	-0.175	0.170	
Relative ET deficit [-]		0.146	
Indice percolazione [-]		0.9	
Efficienza irrigua [-]		0.260	
T air media [°C]			23.3
Pioggia nella stagione irrigua [mm]			200.4
Volume irriguo [m <sup>3</sup> /ha]			12940
Numero di irrigazioni			11

## 2017

La semina del mais è avvenuta il 26 maggio e la raccolta il 24 agosto. Le serie di dati partono dal 31 maggio, quindi per i primi giorni del ciclo colturale sono state usate le osservazioni ARPA di Padenghe sul Garda (per temperatura, vento, umidità relativa e precipitazione) e Darfo Boario Terme (per la radiazione).

La Figura 2.30 riporta il grafico che rappresenta il valore di umidità osservato a 20 cm di profondità (nero), quello simulato con la prima calibrazione (grigio) e quello con la calibrazione migliore (marrone), la Field Capacity (verde), il Wilting Point (rosso) e la soglia di stress (arancione). La FC e il WP rappresentati sono relativi alla migliore calibrazione.

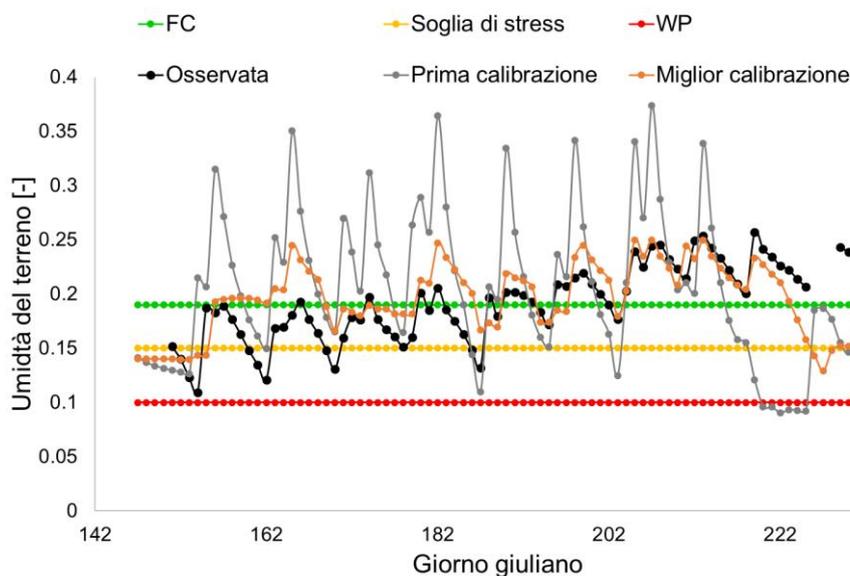


Figura 2.30 Andamento dell'umidità (Calcinato, 2017)

La serie di dati relativa al calore latente presenta molte lacune, quindi non è stato possibile calcolare l'evapotraspirazione effettiva. Secondo la prima calibrazione di AquaCrop l'ET cumulata è di 395.3 mm, mentre la calibrazione migliore indica 323.2 mm.

In Tabella 2.24 vengono elencati i parametri che sono stati cambiati tra la prima e l'ultima calibrazione. Altri valori sono rimasti invariati, ovvero:

Kc = 1.05;

Max CC = 0.96;

Canopy size transplanting seedlings = 6.5 cm<sup>2</sup>/plant;

Numero di piante al m<sup>2</sup> = 7.5;

CC<sub>0</sub> = 0.49%;

WP = 0.1;

Superficie bagnata = 100%;

REW= 7 mm.

Tabella 2.24 Tabella dei parametri modificati (Calcinato, 2017)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
<b>CROP</b>		
GDD from sowing to emergence	80	65
GDD from sowing to max canopy	769	468
GDD from sowing to max rooting depth	1298	1102
GDD from sowing to senescence	1154	1020
GDD from sowing to maturity	1391	1391
GDD from sowing to flowering	880	877
Duration of flowering [GDD]	406	184
Length building up HI [GDD]	180	420
Max rooting depth [m]	2.3	0.6
WP* [g/m <sup>2</sup> ]	33.7	34.1
HI <sub>0</sub>	0.48	0.52
<b>SOIL</b>		
FC	0.15	0.19
SAT	0.41	0.25
Ksat [mm/day]	45	20
CN	46	77

Si noti che anche in questo caso, come per il campo di Livraga, i parametri FC, WP e SAT variano di poco tra i due anni considerati.

In Tabella 2.25 sono mostrati gli indici statistici relativi alla prima calibrazione e a quella migliore. Quelli riferiti all'evapotraspirazione non sono stati calcolati in quanto il non erano presenti sufficienti dati osservati.

Tabella 2.25 Indici statistici - umidità (Calcinato, 2017)

	Prima calibrazione	Calibrazione migliore
MAE [-]	0.060	0.029
RMSE [-]	0.074	0.037
EF [-]	-3.529	-0.130

La produttività fresca secondo la miglior calibrazione è 10.96 ton/ha, ovvero il 12.95% in meno del dato ISTAT

In Tabella 2.26 sono trascritti gli indicatori riassuntivi relativi a questo caso di studio. Non avendo a disposizione i dati osservati di evapotraspirazione, i relativi indicatori non sono stati calcolati.

Tabella 2.26 Indicatori riassuntivi (Calcinato, 2017)

	Osservato	Aquacrop	Generici
WUE [ton/m <sup>3</sup> ]		0.003	
IWUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0.001	0.001	
Evaporation deficit [mm]		120.2	
Precipitation deficit [mm]			-241.8
Relative soil water deficit [-]	-0.049	-0.033	
Relative ET deficit [-]		0.271	
Indice percolazione [-]		1.0	
Efficienza irrigua [-]		0.164	
T air media [°C]			24.3
Pioggia nella stagione irrigua [mm]			201.6
Volume irriguo [m <sup>3</sup> /ha]			17731
Numero di irrigazioni			15

## Confronto degli indicatori

Negli istogrammi di Figura 2.31 sono raggruppati gli indicatori riassuntivi dei due anni analizzati per quanto riguarda il campo di Calcinato.

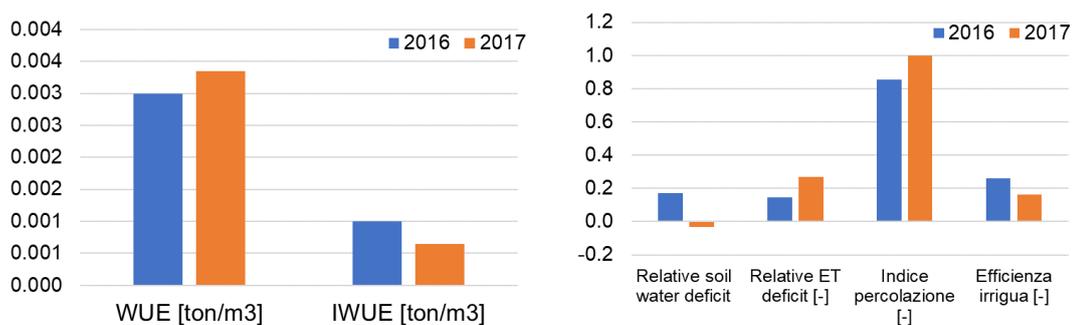




Figura 2.31 Indicatori a confronto (Calcinato)

Si nota che nel 2017 è stato usato un maggiore volume d'acqua per l'irrigazione, e si ha un aumento della Water Use Efficiency (WUE) e dell'indice di percolazione, nonché una diminuzione del deficit dell'umidità del suolo. Tuttavia, la Irrigation Water Use Efficiency (IWUE) e l'efficienza irrigua sono minori rispetto al 2016. Questo ricorda che l'aumento della fornitura d'acqua può risultare inutile se non è accompagnato da una corretta gestione.

## 2.5.4 Laboratorio

Sono stati oggetto di calibrazione anche i dati relativi ai tre esperimenti svolti con il lisimetro, due dei quali discussi del capitolo 2. Il terzo esperimento, il primo in ordine cronologico, è stato oggetto di studio in una precedente tesi (Paleari, 2017).

Il terreno contenuto nel lisimetro ha una capacità di campo di 0.26, un punto di appassimento di 0.167 e un'umidità a saturazione pari a 0.33. La soglia di stress è stata definita a seconda della coltura. Le serie di dati sono complete. Le umidità osservate sono riferite alla sonda #8, posta sotto un gocciolatore a 10 cm di profondità.

### *Basilico*

Il basilico è stato trapiantato il 12 ottobre 2016 e raccolto il 20 dicembre 2016. La Figura 2.32 riporta il grafico che rappresenta il valore di umidità osservato (nero), quello simulato con la prima calibrazione (grigio) e quello con la calibrazione migliore (marrone), la Field Capacity (verde), il Wilting Point (rosso) e la soglia di stress (arancione). La FC e il WP rappresentati sono relativi alla migliore calibrazione. La soglia di stress è stata presa pari a 0.22

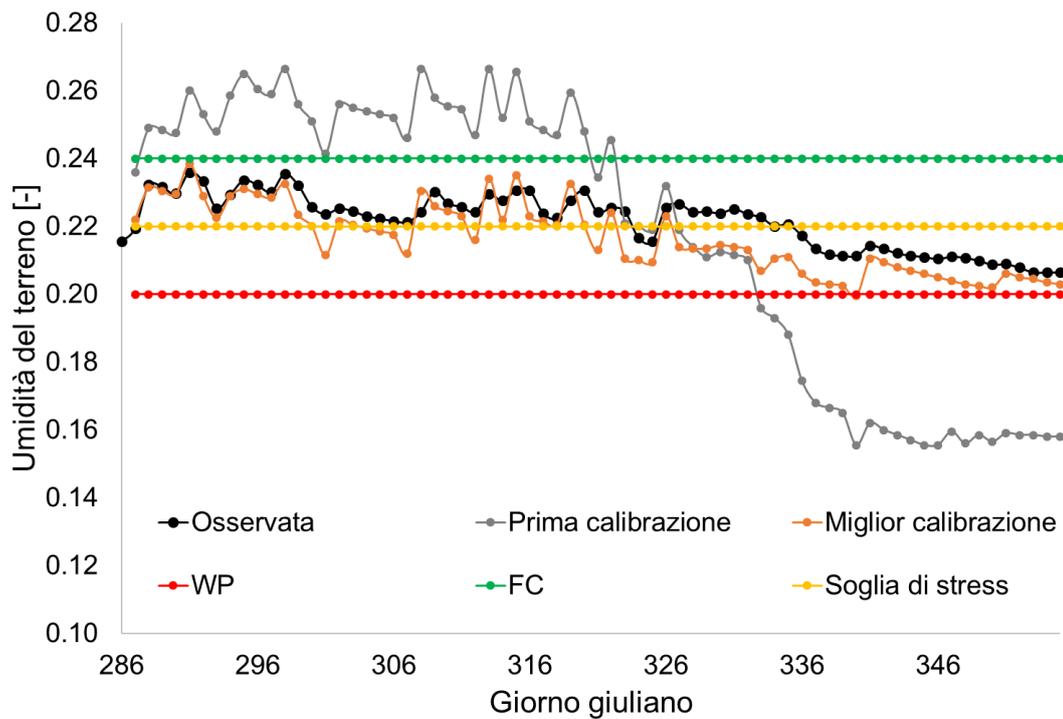


Figura 2.32 Andamento dell'umidità (lisimetro, basilico)

La Figura 2.33 riporta l'andamento dell'evapotraspirazione cumulata osservata e calibrata. Si nota una quasi perfetta concordanza tra il modello e i dati osservati fino al giorno giuliano 332, successivamente il modello sottostima l'evapotraspirazione. In azzurro è indicata l'evapotraspirazione potenziale di riferimento.

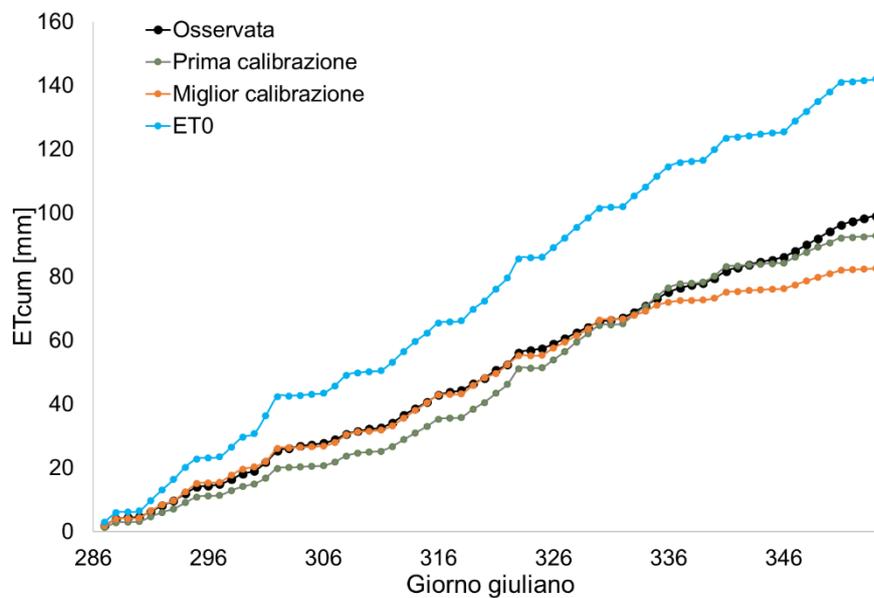


Figura 2.33 Andamento dell'evapotraspirazione cumulata (lisimetro, basilico)

In Tabella 2.27 vengono elencati i parametri che sono stati cambiati tra la prima e l'ultima calibrazione. Altri valori sono rimasti invariati, ovvero:

Max CC = 85%;

Canopy size transplanting seedlings = 15 cm<sup>2</sup>/plant;

Numero di piante al m<sup>2</sup> = 24;

CC<sub>0</sub> = 3.60%;

From sowing to emergence = 7 days;

From sowing to max canopy = 68 days;

From sowing to senescence = 68 days;

From sowing to harvest = 69 days;

Max rooting depth = 0.3 m;

WP\* = 17 g/m<sup>2</sup>;

HI<sub>0</sub> = 85%;

SAT = 0.33;

Ksat = 600 mm/day;

CN = 69;

REW = 11 mm.

Tabella 2.27 Tabella dei parametri modificati (lisimetro, basilico)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
<b>CROP</b>		
Kc	1	1.1
<b>SOIL</b>		
WP	0.16	0.2
FC	0.26	0.24
Wetted surface	40%	60%

In Tabella 2.28 sono mostrati gli indici statistici relativi alla prima calibrazione e a quella migliore. Quelli riferiti all'evapotraspirazione sono riportati in Tabella 2.29.

Tabella 2.28 Indici statistici - umidità (lisimetro, basilico)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.031	0.006
RMSE [-]	0.034	0.007
EF [-]	-16.524	0.264

Tabella 2.29 Indici statistici - evapotraspirazione (lisimetro, basilico)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.473	0.512
RMSE [-]	0.563	0.604
EF [-]	0.447	0.364

L'evapotraspirazione cumulata osservata è pari a 99.1 mm; quella calcolata con la migliore calibrazione è 82.7 mm, ovvero il 16.56% in meno.

Al termine dell'esperimento, il raccolto non è stato pesato, quindi non si ha a disposizione il dato di produttività osservata. Secondo la miglior calibrazione, la produttività secca è pari a 0.922 ton/ha. Per calcolare quella fresca si è utilizzato un coefficiente di conversione pari a 0.135, che rappresenta il contenuto secco delle foglie di basilico. La produttività fresca è dunque di 6.83 ton/ha.

In Tabella 2.30 sono trascritti gli indicatori riassuntivi relativi a questo caso di studio.

Tabella 2.30 Indicatori riassuntivi (lisimetro, basilico)

	Osservato	Aquacrop	Generici
WUE [ton/m <sup>3</sup> ]		0.008	
IWUE [ton/m <sup>3</sup> ]		0.007	
Evaporation deficit [mm]	45.60	59.40	
Precipitation deficit [mm]	-144.71	-142.10	
Relative soil water deficit [-]	0.455	0.586	
Relative ET deficit [-]	0.315	0.418	
Indice percolazione[-]	1.0	1.0	
Efficienza irrigua [-]	1.072	0.895	
T air media [°C]			20.1
Pioggia nella stagione irrigua [mm]			0
Volume irriguo [m <sup>3</sup> /ha]			924.4
Numero di irrigazioni			24

## ***Pomodori***

I pomodori sono stati trapiantati il 22 maggio 2017 e raccolti il 28 luglio 2017. La Figura 2.34 riporta il grafico che rappresenta il valore di umidità osservato (nero), quello simulato con la prima calibrazione (grigio) e quello con la calibrazione migliore (marrone), la Field Capacity (verde), il Wilting Point (rosso) e la soglia di stress (arancione). La FC e il WP rappresentati sono relativi alla migliore calibrazione. La soglia di stress è stata presa pari a 0.207.

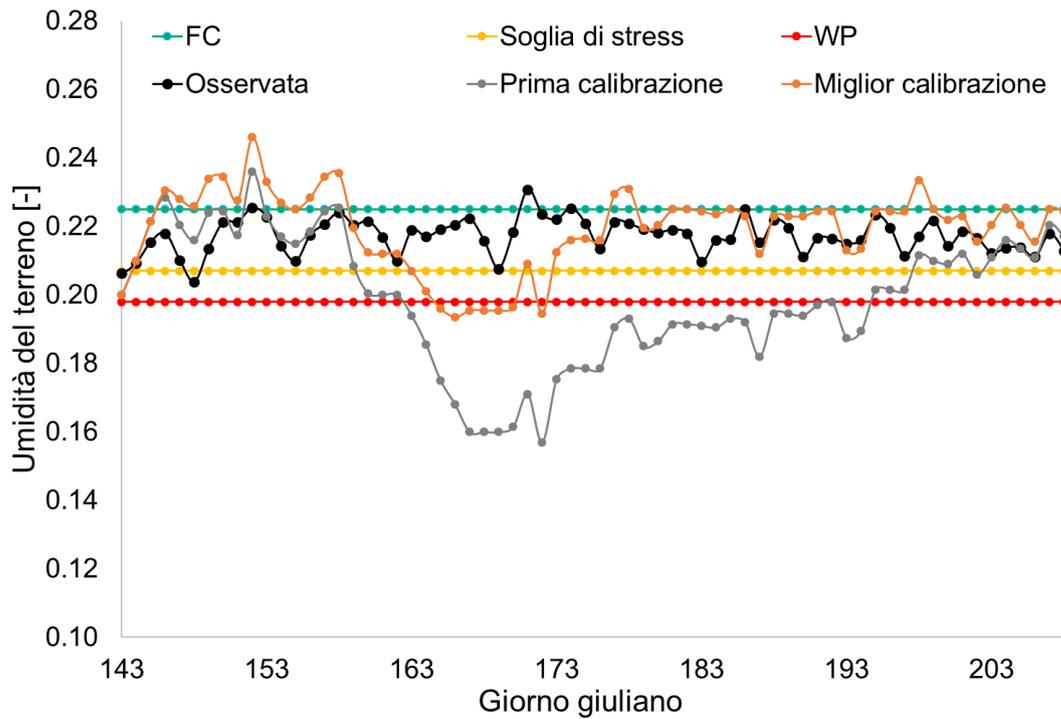


Figura 2.34 Andamento dell'umidità (lisimetro, pomodori)

La Figura 2.35 riporta l'andamento dell'evapotraspirazione cumulata osservata e calibrata. In azzurro è indicata l'evapotraspirazione potenziale di riferimento.

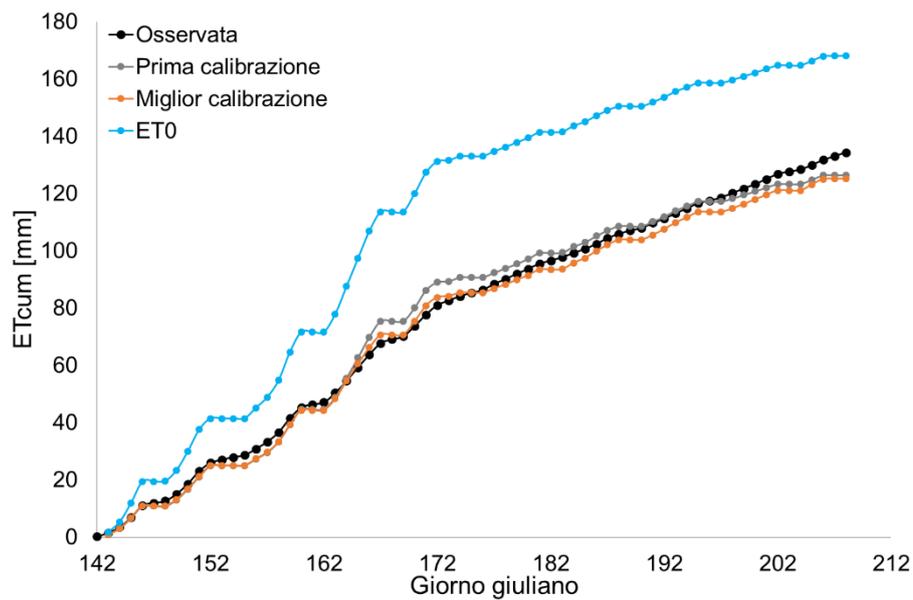


Figura 2.35 Andamento dell'evapotraspirazione cumulata (lisimetro, pomodori)

In Tabella 2.31 vengono elencati i parametri che sono stati cambiati tra la prima e l'ultima calibrazione. Altri valori sono rimasti invariati, ovvero:

Max CC = 85%;

Canopy size transplanting seedlings = 35 cm<sup>2</sup>/plant;  
 Numero di piante al m<sup>2</sup> = 4;  
 CC<sub>0</sub> = 1.4%;  
 GDD from transplanting to recovery = 26;  
 GDD from transplanting to max rooting depth = 832;  
 GDD from transplanting to maturity = 1339;  
 GDD from transplanting to flowering: 507;  
 Duration of flowering = 0 GDD;  
 Length building up HI = 468 GDD;  
 Max rooting depth = 0.3 m;  
 WP\* = 18 g/m<sup>2</sup>;  
 HI<sub>0</sub> = 0.63;  
 SAT = 0.33;  
 Ksat = 600 mm/giorno;  
 Superficie bagnata = 50%;  
 CN = 72;  
 REW = 5 mm.

Tabella 2.31 Tabella dei parametri modificati (lisimetro, pomodori)

	Prima calibrazione	Calibrazione migliore
<b>CROP</b>		
Kc	1.1	1.35
GDD from transplanting to max canopy	832	1299
GDD from transplanting to senescence	1118	1320
<b>SOIL</b>		
WP	0.16	0.198
FC	0.215	0.225

In Tabella 2.32 sono mostrati gli indici statistici relativi alla prima calibrazione e a quella migliore. Quelli riferiti all'evapotraspirazione sono riportati in Tabella 2.33.

Tabella 2.32 Indici statistici - umidità (lisimetro, pomodori)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.021	0.010
RMSE [-]	0.028	0.012
EF [-]	-28.778	-4.945

Tabella 2.33 Indici statistici - evapotraspirazione (lisimetro, pomodori)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.729	0.649
RMSE [-]	0.953	0.793
EF [-]	0.307	0.520

L'evapotraspirazione cumulata osservata è pari a 134.4 mm; quella calcolata con la migliore calibrazione è 125.2 mm, ovvero il 6.88% in meno.

Non essendoci stata la produzione del frutto, non è stato possibile eseguire analisi relative alla produttività.

In Tabella 2.34 sono trascritti gli indicatori riassuntivi relativi a questo caso di studio.

Tabella 2.34 Indicatori riassuntivi (lisimetro, pomodori)

	Osservato	Aquacrop	Generici
WUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0	0.000	
IWUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0	0.000	
Evaporation deficit [mm]	32.62	43.00	
Precipitation deficit [mm]	-166.84	-168.20	
Relative soil water deficit [-]	0.287	0.214	
Relative ET deficit [-]	0.196	0.256	
Indice percolazione[-]	1.0	1.0	
Efficienza irrigua [-]	0.844	0.787	
T air media [°C]			27.62
Pioggia nella stagione irrigua [mm]			0
Volume irriguo [m <sup>3</sup> /ha]			1591.1
Numero di irrigazioni			61

## ***Erbette***

Le erbette sono state trapiantate il 17 ottobre 2017 e raccolte il 20 dicembre 2017. La Figura 2.36 riporta il grafico che rappresenta il valore di umidità osservato (nero), quello simulato con la prima calibrazione (grigio) e quello con la calibrazione migliore (marrone), la Field Capacity (verde), il Wilting Point (rosso) e la soglia di stress (arancione). La FC e il WP rappresentati sono relativi alla migliore calibrazione. Nella rappresentazione è stata riportata solo la soglia iniziale pari a 0.23.

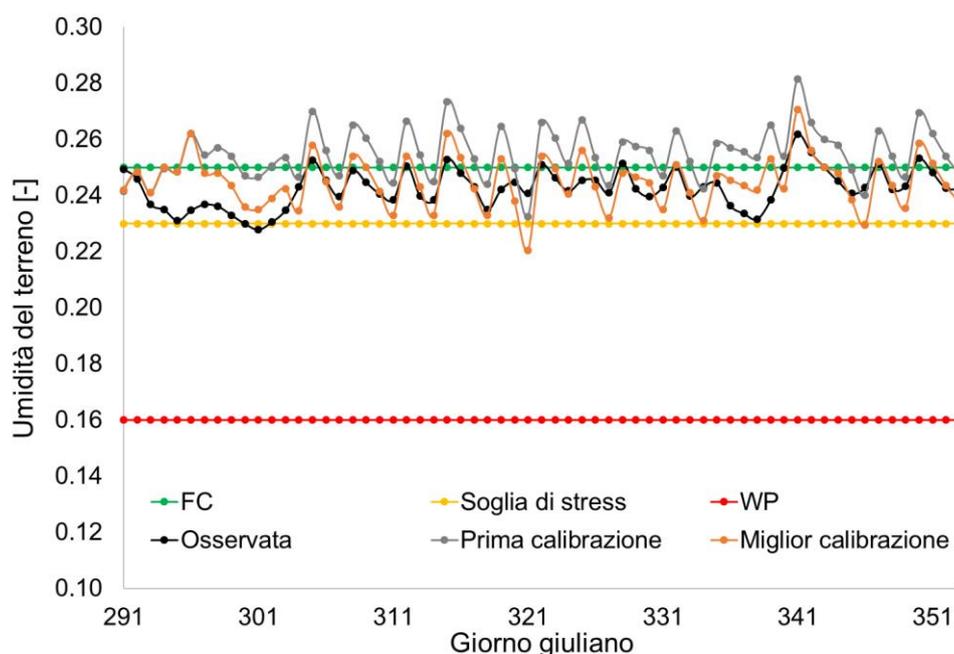


Figura 2.36 Andamento dell'umidità (lisimetro, erbetto)

La Figura 2.37 riporta l'andamento dell'evapotraspirazione cumulata osservata e calibrata. In azzurro è indicata l'evapotraspirazione potenziale di riferimento.

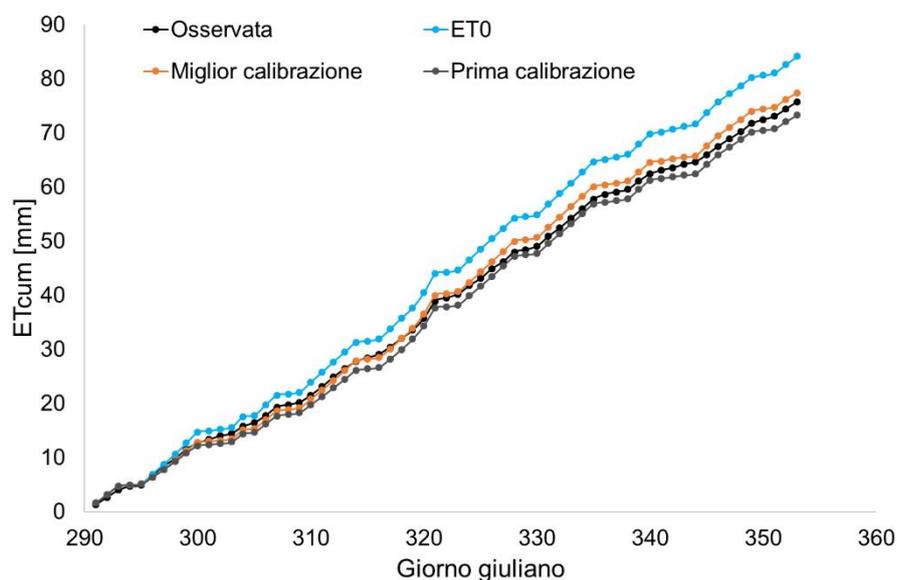


Figura 2.37 Andamento dell'evapotraspirazione cumulata (lisimetro, erbetto)

In Tabella 2.35 vengono elencati i parametri che sono stati cambiati tra la prima e l'ultima calibrazione. Altri valori sono rimasti invariati, ovvero:

Max CC = 95%;

Canopy size transplanting seedlings = 5 cm<sup>2</sup>/plant;

GDD from sowing to emergence = 76;

GDD from sowing to max canopy = 571;  
 GDD from sowing to max rooting depth = 298;  
 GDD from sowing to senescence = 571;  
 GDD from sowing to harvest = 280;  
 Max rooting depth = 0.3 m;  
 WP\* = 17 g/m<sup>2</sup>;  
 H<sub>10</sub> = 85%;  
 WP=0.16;  
 REW = 11 mm.

Tabella 2.35 Tabella dei parametri modificati (lisimetro, erbette)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
<b>CROP</b>		
Kc	1	1.05
plants/m <sup>2</sup>	90	200
CC <sub>0</sub>	4.50%	10.00%
<b>SOIL</b>		
FC	0.26	0.25
SAT	0.33	0.36
Ksat [mm/day]	600	600
Wetted surface	70%	70%
CN	72	69

In Tabella 2.36, sono mostrati gli indici statistici relativi alla prima calibrazione e a quella migliore. Quelli riferiti all'evapotraspirazione sono riportati in Tabella 2.37.

Tabella 2.36 Indici statistici - umidità (lisimetro, erbette)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.007	0.006
RMSE [-]	0.008	0.008
EF [-]	-0.350	-0.470

Tabella 2.37 Indici statistici - evapotraspirazione (lisimetro, erbette)

	Prima calibrazione	Miglior calibrazione
MAE [-]	0.227	0.257
RMSE [-]	0.272	0.298
EF [-]	0.754	0.703

L'evapotraspirazione cumulata osservata è pari a 75.8 mm; quella calcolata con la migliore calibrazione è 77.4 mm, ovvero il 2.14% in meno.

Al termine dell'esperimento si sono raccolte e pesate le erbe presenti in un'area di 50x50 cm<sup>2</sup>. Dalla pesata si è ottenuta una produttività di 7.5 ton/ha, estirpando le parti non edibili. Secondo Aquacrop, invece, la produttività dovrebbe essere ben maggiore: 5.479 ton/ha di prodotto secco e 60.878 ton/ha di quello fresco, utilizzando un coefficiente di conversione pari a 0.09 che rappresenta il contenuto secco della foglia. Questa grande discrepanza è forse dovuta al fatto che in realtà le erbe in laboratorio non hanno completato la maturazione. In Tabella 2.38 sono trascritti gli indicatori riassuntivi relativi a questo caso di studio.

Tabella 2.38 Indicatori riassuntivi (lisimetro, erbe)

	Osservato	Aquacrop	Generici
WUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0.0099	0.079	
IWUE [ton/m <sup>3</sup> ]	0.00667	0.054	
Evaporation deficit [mm]	8.40	6.70	
Precipitation deficit [mm]	-84.18	-84.10	
Relative soil water deficit [-]	-0.032	0.458	
Relative ET deficit [-]	0.100	0.080	
Indice percolazione[-]	1.0	0.9	
Efficienza irrigua [-]	0.674	0.688	
T air media [°C]			19.14
Pioggia nella stagione irrigua [mm]			0
Volume irriguo [m <sup>3</sup> /ha]			1124.4
Numero di irrigazioni			26

# CAPITOLO 3

## CONCLUSIONI

Nel presente elaborato è stato studiato il ciclo idrologico alla scala di laboratorio, tramite osservazioni sperimentali ricavate dal lisimetro strumentato, e a scala maggiore, attraverso le misure sul campo relative ai diversi casi studio analizzati.

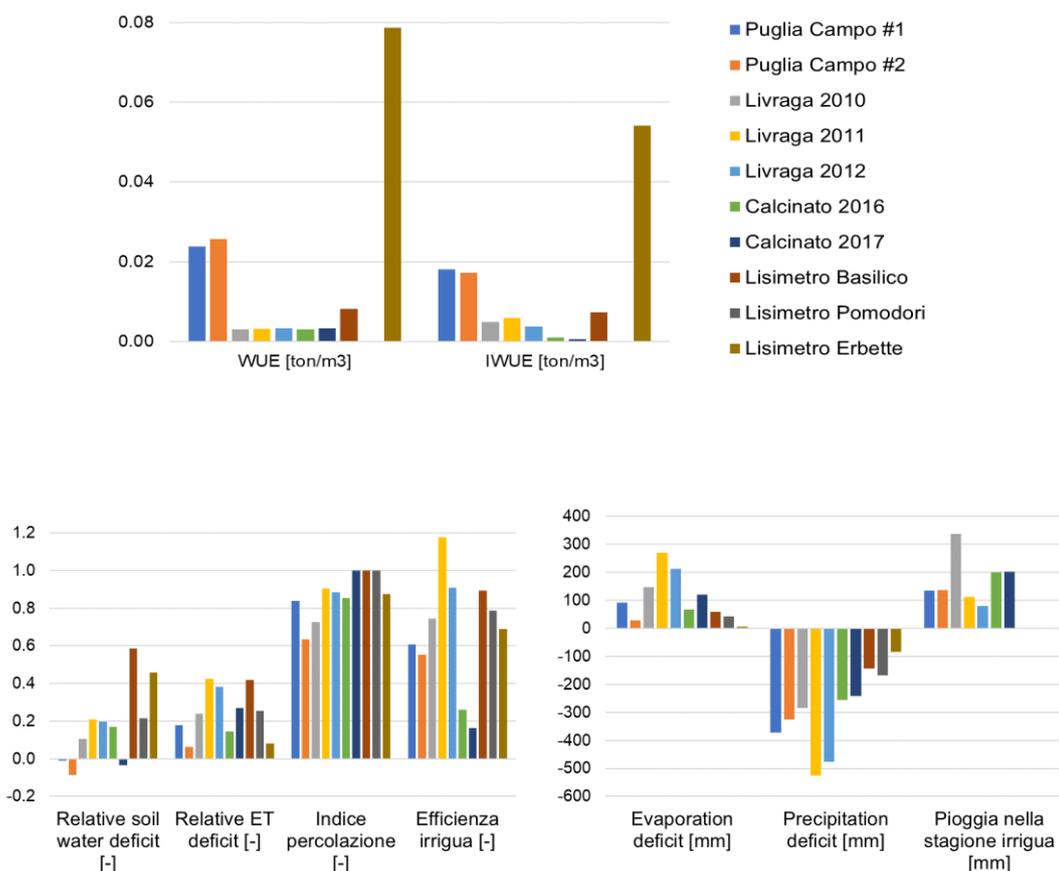
Sono stati eseguiti due esperimenti analoghi, il primo con i pomodori e il secondo con le erbe, il cui scopo è stato quello di valutare la soglia di stress idrico. L'analisi in real time e tramite software Matlab ha permesso di studiare le dinamiche idrologiche e in particolare l'umidità interna al sistema al variare delle condizioni imposte. L'esperimento relativo ai pomodori non ha dato l'esito sperato, ovvero la fioritura e di conseguenza la formazione del frutto, non è avvenuta. Sarebbe interessante ripetere l'esperimento evitando l'esposizione prolungata a una forte radiazione, utilizzando la lampada a raggi UV e infrarossi, e dopo un adeguato rifornimento di nutrienti, per scongiurare ogni altro stress che non sia quello idrico. Per quanto riguarda le erbe invece, analizzando i dati nel complesso, si evince che si sarebbe potuta abbassare la soglia di stress, invece che alzarla.

La seconda parte della tesi invece ha visto l'utilizzo del software AquaCrop, per effettuare la modellazione di casi di studio reali. Lo scopo principale è stato quello di confrontare la produttività secondo il modello e quella reale. In generale si nota una concordanza tra i due valori, eccezione fatta per le erbe in laboratorio dove AquaCrop prevede una produttività maggiore di un ordine di grandezza. Per i casi studio riferiti allo stesso campo agricolo o al lisimetro sono stati usati approssimativamente gli stessi parametri del terreno. Questi non possono essere considerati immutabili nel tempo in quanto le operazioni di aratura e gestione del campo li modificano inevitabilmente. In generale si può dire che le calibrazioni sono soddisfacenti, soprattutto per quanto riguarda l'umidità del terreno; si riscontrano infatti valori di MAE e RMSE abbastanza bassi. L'evapotraspirazione in alcuni casi (secondo campo pugliese e Livraga 2012) non è ben rappresentata dal modello.

L'irrigazione parsimoniosa è stata simulata soltanto per i casi studio dei pomodori in Puglia e le analisi confermano la validità delle irrigazioni secondo SIM.

Sarebbe interessante estendere il confronto anche agli altri casi studio, una volta determinate le relative irrigazioni parsimoniose.

In Figura 3.1 si riportano gli indicatori riassuntivi relativi alle calibrazioni di tutti i casi studio analizzati, tralasciando le simulazioni effettuate con le irrigazioni parsimoniose. La legenda presentata accanto al primo grafico è valida anche per gli altri. Si nota che i due campi di pomodoro in Puglia presentano WUE e IWUE maggiori dei campi di mais, tuttavia l'indice di percolazione e l'efficienza irrigua non sono i migliori registrati. Osservando i dati relativi all'efficienza irrigua, emerge che Calcinato presenta valori ancora inferiori. Si può dunque affermare che, secondo le analisi, soprattutto nei campi pugliesi e bresciani esiste un buon margine di miglioramento in termini di risparmio idrico.



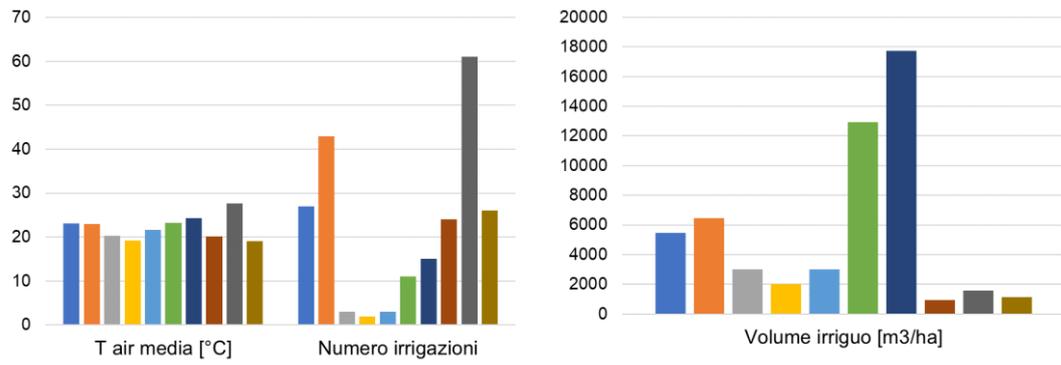


Figura 3.1 Indicatori a confronto

## Riferimenti bibliografici

- [1] Abedinpour, M., Sarangi, A., Rajput, T. B. S., Singh, M., Pathak, H., Ahmad, T., “Performance evaluation of AquaCrop model for maize crop in a semi-arid environment”, *Agricultural Water Management*, 110, 55-56, 2012
- [2] Aboukhaled, A., Alfaro, A., Smith, M., “Lysimeters”, Food and Agr. Org. of the United Nations, FAO Irrig. and Drain. Paper No. 39. 68 p.
- [3] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., Smith. Fao irrigation and drainage paper no. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 56, 97–156, 1998.
- [4] Anderson, M. C., Norman, J., Mecikalski, J. R., Torn, R. D., Kustas, W. P., and Basara, J. B., “A multiscale remote sensing model for disaggregating regional fluxes to micrometeorological scales”, *Journal of Hydrometeorology*, 5(2),343–363,2004.
- [5] Araya, A., Havtu, S., Hadgu, K. M., Kebede, A., Dejene, T., “Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*)”, *Agricultural Water Management*, 97(11), 1838-1846, 2010
- [6] Ayars, J. E., “Water requirement of irrigated garlic”, *Proc. ASABE*, 51,1683–1688, 2007
- [7] Ayars, J. E., Phene, C. J., Hutmacher, R. B., Davis, K. R., Schoneman, R. A., Vail, S. S., Mead, R. M., “Subsurface drip irrigation of row crops: A review of 15 years of research at the Water Management Research Laboratory”, *Agr. Water Mgt.*, 42,1–27, 1999
- [8] Bryla, D. R., Trout, T. J., and Ayars, J. E., “Weighing lysimeters for developing crop coefficients and efficient irrigation practices for vegetable crops”, *HortScience*, 45(11), 1597–1604, 2010.
- [9] Castrillo, M., Fernandez, D., Calcagno, A. M., Trujillo, I., Guenni, L., “Responses of ribulose-1,5 bisphosphate carboxylase, protein content, and stomatal conductance to water deficit in maize, tomato, and bean”, *Photosynthetica*, 39(2), 221-226, 2001
- [10] Ceppi, A., Ravazzani, G., Corbari, C., Salerno, R., Meucci, S., Mancini, M., “Real-time drought forecasting system for irrigation management”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3353-3366, 2014
- [11] Choudhury, B. J., “Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by a sensitivity analysis”, *Remote Sensing of Environment*, 22(2),209–233, 1987.

- [12] Corbin, A., Timmermans, J., van der Tol, C., and Verhoef, W., “Towards estimating water stress through leaf and canopy water content derived from optical and thermal hyperspectral data”, EGU General Assembly Conference Abstracts, volume 17, 2015.
- [13] Decagon Devices, Inc., Leaf Porometer Operator’s Manual, Version: October 17, 2016
- [14] Doorenbos, J., Kassam, A. H., Yield response to Water, FAO Irrigation and Drainage Paper no 33, FAO, Rome, 1979.
- [15] Etissa, E., Dechassa, N., Alemayehu, Y., “Estimation of yield response (Ky) and validation of CropWat for tomato under different irrigation regimes”, Irrigation & Drainage Systems Engineering, 5: 167, doi:10.4172/2168-9768.1000167, 2016
- [16] Evett, S. R., Howell, T. A., Schneider, A. D., Upchurch, D. R., and Wanjura, D. F., “Automatic drip irrigation of corn and soybean”, National Irrigation Symposium. Proc. 4th Decennial Symposium, Amer. Soc. Agr. Eng., St. Joseph, MI, 401–408., 2000
- [17] Famiglietti, J. and Wood, E., “Multiscale modeling of spatially variable water and energy balance processes”, Water Resources Research, 30(11),3061–3078, 1994.
- [18] Farahani, H. J., Izzi, G., Oweis, T. Y., “Parametrization and evaluation of the AquaCrop model for full and deficit irrigated cotton”, Agronomy Journal, 101(3), 469-476, 2008
- [19] Ghamarnia, H., Amirkhani, D., and Arji, I., “Basil (*ocimum basilicum* l.) water use, crop coefficients and SIMDualKc model implementing in a semi-arid climate”, Int. J. Plant Soil Sci., 4(6), 535–547, 2015.
- [20] Heng, L. K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T., Steduto, P., “Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize”, Agronomy Journal, 101(3), 488-498, 2008
- [21] Hoffer, R. M., “Biological and physical considerations in applying computer-aided analysis techniques to remote sensor data”, Remote sensing: The quantitative approach, pages 227–289, 1978.
- [22] Howell, T. A., Schneider, A. D., Jensen, M. E., “History of lysimeter design and use for evapotranspiration measurements”, 1-9, 1991
- [23] Johnson, R. S., Ayars, J., Hsiao, T., “Modelling young peach tree evapotranspiration”, Acta Hort., 584, 107–113, 2002
- [24] Johnson, R. S., Ayars, J., Trout, T., “Crop coefficients for mature peach trees are well correlated with mid-day canopy light interception”, Acta Hort., 537, 455–460, 2000
- [25] Johnson, R. S., Williams, L. E., Ayars, J. E., Trout, T. J., Weighing lysimeters aid to study of water relations in tree and vine crops, California Agriculture, 59(2), 133-136, 2005

- 
- [26] Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Burges, S. J., “A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models”, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7),14415–14428, 1994.
- [27] López-Urrea, R., Montoro, A., Gonzalez-Piqueras, J., López-Fuster, P., and Fereres, E., “Water use of spring wheat to raise productivity”, *Agr. Water Mgt.* 96, 1305–1310, 2009a
- [28] López-Urrea, R., Montoro, A., Gonzalez-Piqueras, J., López-Fuster, P., and Fereres, E., “Evapotranspiration and responses to irrigation of broccoli”, *Agr. Water Mgt.*, 96, 1155–1161, 2009b
- [29] López-Urrea, R., Montoro, A., Gonzalez-Piqueras, J., López-Fuster, P., and Fereres, E., “Single and dual crop coefficients and water requirements for onion (*Allium cepa* L.) under semiarid conditions”, *Agr. Water Mgt.*, 96, 1031–1036, 2009c
- [30] Mantovani, F., “Misure in laboratorio e modellistica numerica dell'umidità del suolo e dei processi del ciclo idrologico: il lisimetro”, tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Politecnico di Milano, 2016.
- [31] Paleari, R., “Monitoraggio e modellistica dei flussi idrologici in laboratorio: il lisimetro”, tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile, Politecnico di Milano, 2017.
- [32] Patanè, C., “Leaf area index, leaf transpiration and stomatal conductance as affected by soil water deficit and VPD in processing tomato in semi-arid Mediterranean climate”, *Journal of Agronomy and Crop Science*, 197, 165-176, 2011
- [33] Phene, C. J., McCormick, R. L., Miyamoto, J. M., Meek, D. W., Davis, K. R., “Evapotranspiration and crop coefficients of trickle irrigated tomatoes”, *Proc. 3rd Intl. Drip/Trickle Irrigation Congress*, Fresno, CAASAE Publication No. 10, 85823–831, 1985
- [34] Piccinni, G., Ko, J., Marek, T., Leskovar, D. I., “Crop coefficients specific to multiple phenological stages for evapotranspiration-based irrigation management of onion and spinach”, *HortScience*, 44, 421–425, 2009.
- [35] Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres E., “AquaCrop Version 6.0 Reference Manual”, 2017
- [36] Rinaldi, M., Garofalo, P., Rubino, P., Steduto, P., “Processing tomatoes under different irrigation regimes in Southern Italy: agronomic and economic assessments in a simulation case study”, *Rivista Italiana di Agrometeorologia*, 3, 39-56, 2011
- [37] Roerink, G., Su, Z., and Menenti, M., “S-sebi: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance”, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(2),147–157, 2000.
- [38] Silvestro, P. C., “Applicazione spazializzata di metodi di assimilazione di dati ottenuti da telerilevamento in modelli di crescita delle colture per la stima della produzione di fumento tenero”, Tesi di dottorato in Scienze delle Produzioni Vegetali e Animali, Università degli studi della Tuscia, 2017

- [39] Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., Raes, D., Crop yield response to water, FAO irrigation and Drainage Paper no 66, FAO, Rome, 2012
- [40] Steduto, P., Raes, D., Hsiao, T. C., Fereres, E., Heng, L., Izzi, G., et al. AquaCrop: a new model for crop prediction under water deficit conditions. *Options Méditerranéennes, Series A (80)*:285–92, 2008
- [41] Tan, C. S., “Tomato yield-evapotranspiration relationships, seasonal canopy temperature and stomatal conductance as affected by irrigation”, *Canadian journal of plant science*, 73, 257-264, 1993
- [42] Vaughan, P. J., Trout, T. J., Ayars J. E., “A processing method for weighing lysimeter data and comparison to micrometeorological ETo predictions”, *Agricultural water management*, 88, 141-146, 2007
- [43] Williams, L. E., Phene, C. J., Grimes, D. W., Trout, T. J., “Water use of mature Thompson Seedless grapevines in California”, *Irrig. Sci.*, 22, 11–18, 2003b.