



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE AGRARIE E DEL TERRITORIO

STUDIO DI NUOVI MODELLI PREDITTIVI PER IL CALCOLO
DELL'IRRIGAZIONE PROGRAMMATA.

STUDY OF NEW PREDICTIVE MODELS FOR CALCULATING
SCHEDULED IRRIGATION.

TIPO TESI: Sperimentale

Studente:
Arnaldo Pio Marini

Relatore:
PROF. LUIGI LEDDA

Correlatore:
DOTT. LUÍS BONET PÉREZ DE LÉON

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

INDICE

INDICE.....	2
ELENCO DELLE TABELLE.....	3
ELENCO DELLE FIGURE	4
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	5
CAPITOLO 1 FONDAMENTI E CONTESTO TEORICO	6
1.1 Risorse idriche e cambiamenti climatici	6
1.2 L'irrigazione come adattamento ai cambiamenti climatici	7
1.3 Tecniche di irrigazione sostenibili: dall'irrigazione convenzionale all'irrigazione di precisione.....	9
1.4 Il sistema suolo-pianta-atmosfera (SPAC) e le variabili irrigue.....	10
1.5 Determinazione del Fabbisogno Idrico delle Colture: l'Importanza dei Modelli Predittivi per l'Ottimizzazione delle Risorse.....	11
CAPITOLO 2 MATERIALI E METODI.....	14
2.1 Descrizione dell'area di studio (agrumeto commerciale).....	14
2.2 Raccolta dei dati suolo-pianta-atmosfera e dettagli sugli strumenti utilizzati	15
2.3 Algoritmi di irrigazione utilizzati nello studio (tradizionali e sperimentali)..	17
2.4 Raccolta frutti, analisi qualitative e della produzione.....	20
CAPITOLO 3 RISULTATI E DISCUSSIONI	22
3.1 Volumi di irrigazione e confronto tra i modelli	22
3.2 Umidità relativa del suolo e stato idrico delle piante.....	24
3.3 Produzione e analisi statistica	27
CAPITOLO 4 CONCLUSIONI	34
4.1 Ruolo dei fattori di correzione e gestione dell'irrigazione	34
4.2 Effetti sulla produzione.....	34
4.3 Conclusioni finali.....	35
BIBLIOGRAFIA.....	36

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1: Volumi di acqua applicati e valori medi dei fattori di correzioni utilizzati durante l'anno 2023/2024.....	22
Tabella 2: Rappresentazione del totale dell'apporto idrico sommando irrigazione e precipitazioni.	23
Tabella 3: Questa tabella riporta le medie delle performance ottenute dai tre trattamenti	27
Tabella 4: Rendimento (espresso in kg/m ³) calcolato come rapporto tra il rendimento medio per pianta e il volume di irrigazione per pianta (in m ³). Questo indicatore permette di valutare l'efficienza produttiva dei trattamenti in relazione all'acqua utilizzata.....	27
Tabella 5: Analisi statistica della varianza (ANOVA), Valori P < 0.05 indicano differenze statisticamente significative e sono evidenziati in grassetto. Legenda: - SS: Somma dei quadrati. - GL: Gradi di libertà - MS: Quadrati m.....	28

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1: Immagine satellitare dell’appezzamento dove è stato condotto lo studio. I tre modelli sono stati disposti in blocchi casuali nella zona delineata in giallo	14
Figura 2: Schema su carta dell’appezzamento studiato diviso in blocchi randomizzati	15
Figura 3: Stazione meteorologica	15
Figura 4: Sensore utilizzato per misurare l’umidità del suolo	15
Figura 5: Foto scattata in campo di una foglia imbustata per poi essere prelevata per misurare il potenziale idrico	16
Figura 6: Porometro Li-cor utilizzato per la misurazione della conduttanza stomatica	16
Figura 7: Camera di pressione portatile utilizzata nello studio per misurare il potenziale idrico.....	16
Figura 8: Rappresentazione dei dati trasmessi dalle sonde di umidità	17
Figura 9: Misurazione dello spessore della buccia con calibro	21
Figura 10: Misurazione dell’altezza del frutto con calibro.....	21
Figura 11: Misurazione del colore tramite spettrofotometro	21
Figura 13: Misurazione dell’acidità.....	21
Figura 12: Misurazione gradi brix con rifrattometro	21
Figura 14: Incidenza dei fattori di correzione durante il periodo di sperimentazione	23
Figura 15: Rappresentazione dell’irrigazione accumulata dei tre modelli durante lo studio.....	24
Figura 16: Rappresentazione grafica dei dati rilevati dalle sonde di umidità del suolo dei tre trattamenti durante il periodo di studio	25
Figura 17: Rappresentazione grafica dell’andamento del potenziale idrico del tronco misurato in campo durante la prova.....	26
Figura 18: Rappresentazione grafica del confronto dei tre trattamenti sul contenuto di °Brix. Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test di Tukey (p<0,05)	30
Figura 19: Rappresentazione grafica del confronto dei tra trattamenti sul contenuto di acidità gr/l. Lettere diverse indicano differenze significative secondo test di Tukey	31
Figura 20: Rappresentazione grafica del confronto dei trattamenti sull’indice di Maturità. Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test di Tukey (p<0,05)	32

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Negli ultimi decenni, l'agricoltura ha dovuto affrontare sfide sempre più complesse, tra cui l'aumento della popolazione mondiale, le pressioni sui sistemi alimentari e il cambiamento climatico. Secondo le stime della FAO, entro il 2050 la popolazione mondiale toccherà i 9,7 miliardi e di conseguenza la domanda di cibo aumenterà del 50% rispetto ai livelli attuali (Godoy et al., 2017), rendendo essenziale l'adozione di pratiche agricole più efficienti e sostenibili. In risposta a queste sfide, la coltivazione agricola mostra una crescente tendenza verso l'intensificazione, ciò rende necessaria l'ottimizzazione dell'irrigazione soprattutto in climi semi-aridi dove i periodi di siccità sono più frequenti e il risparmio di acqua e di risorse è di vitale importanza per ottenere un'intensificazione sostenibile, evidenziando così il ruolo fondamentale dell'irrigazione di precisione in agricoltura (Garcia-Tejero *et al.* 2014). In questo contesto, la stima precisa dei fabbisogni irrigui diventa una componente essenziale. Sebbene la metodologia Water Balance (FAO 56) sia ampiamente utilizzata per il calcolo delle necessità idriche (Allen *et al.* 1998), l'integrazione di strumenti digitali di supporto è cruciale per ottenere una programmazione dell'irrigazione più efficiente. Nuovi studi sono orientati verso l'uso di modelli e algoritmi che consentono il calcolo del fabbisogno idrico delle colture con il supporto di tecnologie come sensori di umidità del suolo o le previsioni meteorologiche (Kovács & Husti, 2018). Tuttavia, queste nuove tecnologie sono più accessibili per le grandi aziende, che dispongono di tecnici specializzati, mentre i piccoli agricoltori, che rappresentano la maggioranza dell'agricoltura europea (EUROSTAT, 2023), incontrano barriere nella loro adozione a causa dei costi elevati e della complessità nella gestione e interpretazione delle informazioni. In questo senso, il progetto Prima "HANDYWATER" è focalizzato sullo sviluppo di nuove soluzioni accessibili e facili da usare per promuovere l'adozione di questi strumenti da parte dei piccoli agricoltori. In questo progetto, si stanno sviluppando nuovi algoritmi per implementare sistemi di interpretazione automatizzata dei dati, in grado di elaborare grandi volumi di informazioni in modo efficiente e preciso, facilitando così il processo decisionale per la programmazione dell'irrigazione (Gabriel & States, 2020). L'obiettivo di questo lavoro è stato quello di valutare l'uso dei nuovi algoritmi di calcolo (modelli), sviluppati nell'ambito del progetto europeo "HANDYWATER", per aiutare la programmazione dell'irrigazione in campo utilizzando tecnologie a basso costo. A tal fine, sono stati confrontati tre metodi di programmazione dell'irrigazione: uno convenzionale basato sul metodo Penman-Monteith FAO 56, e due nuovi algoritmi che utilizzano le informazioni dai sensori di umidità del suolo e/o le previsioni meteorologiche.

CAPITOLO 1

FONDAMENTI E CONTESTO TEORICO

1.1 Risorse idriche e cambiamenti climatici

I cambiamenti climatici stanno influenzando la disponibilità, la qualità e la quantità di acqua per le necessità essenziali dell'essere umano, compromettendo l'effettiva possibilità per miliardi di persone di usufruire dei diritti umani fondamentali legati all'accesso all'acqua e ai servizi igienico-sanitari, una sfida aggiuntiva è causata dalle alterazioni idrologiche, che si manifestano attraverso eventi estremi e siccità sempre più frequenti, sottoponendo a forti pressioni varie aree del mondo (Nazioni Unite, 2020).

Gli impatti di questi cambiamenti colpiscono aspetti essenziali come la sicurezza alimentare, la salute pubblica, gli insediamenti urbani e rurali, la produzione di energia, lo sviluppo industriale, la crescita economica e la preservazione degli ecosistemi, tutti ambiti profondamente dipendenti dalle risorse idriche e quindi vulnerabili. Proprio per limitare tali rischi e costruire un futuro più solido, l'adattamento ai cambiamenti climatici attraverso una gestione sostenibile delle risorse idriche è diventato cruciale. A questi propositi, sono già stati messi in atto strumenti di governance e accordi internazionali come l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile che stabilisce 17 obiettivi per promuovere un benessere equo e sostenibile, l'Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici – il cui obiettivo è limitare il riscaldamento globale a 1,5 °C e il Quadro di riferimento di Sendai per la riduzione del rischio di disastri che mira a ridurre i rischi naturali e antropici, che danno consigli e descrivono percorsi concreti e condivisi per una gestione efficace dell'acqua e per fronteggiare le sfide ambientali e climatiche attuali (Nazioni Unite, 2020).

Negli ultimi cento anni, l'uso di acqua globale è aumentato di sei volte e continua a crescere a un ritmo di circa l'1% annuo, trainato dall'incremento demografico, dallo sviluppo economico e dall'evoluzione dei modelli di consumo. Oltre all'incertezza sugli approvvigionamenti idrici, i cambiamenti climatici aggravano la situazione in regioni già in sofferenza, introducendo stress idrico anche in aree tradizionalmente ricche di risorse idriche (Nazioni Unite, 2020).

La manifestazione dei cambiamenti climatici avviene in modi differenti tra cui un aumento della frequenza e intensità di eventi estremi come ondate di calore, precipitazioni eccezionali, tempeste e mareggiate oltre al riscaldamento delle acque che compromette la qualità dell'acqua, diminuendo la capacità di depurazione dei corpi idrici amplificando il rischio di contaminazione da agenti patogeni e inquinanti (EEA, 2024).

Molti ecosistemi vulnerabili, come le foreste e le zone umide, sono minacciati dal degrado ambientale e dalla perdita di biodiversità, con effetti diretti sulla disponibilità di servizi essenziali legati all'acqua, come la depurazione naturale, il sequestro di carbonio, la protezione dalle inondazioni e la fornitura di acqua per l'agricoltura, la pesca e le attività ricreative. Gli effetti del cambiamento climatico colpiranno in modo particolare le regioni tropicali, dove si concentrano la maggior parte dei paesi in via di sviluppo (IPCC, 2019). I piccoli stati insulari, già fragili dal punto di vista ambientale e socioeconomico, affrontano rischi elevati di disastri e di aumento dello stress idrico.

Si prevede un'espansione delle aree aride a livello globale, e l'accelerazione dello scioglimento dei ghiacciai potrebbe influire negativamente sulle risorse idriche delle zone montane (UNESCO World Water Assessment Programme, 2020).

Nonostante ci siano numerose prove scientifiche che mettono in risalto l'impatto dei cambiamenti climatici sulla disponibilità e distribuzione delle risorse idriche, ci sono comunque delle incertezze ed è difficile prevedere la distribuzione delle precipitazioni (UNESCO World Water Assessment Programme, 2020). Infatti, mentre gli studi sull'aumento delle temperature appaiono più chiari grazie alle simulazioni effettuate con modelli che riescono a ricreare scenari specifici, le simulazioni sulle distribuzioni delle precipitazioni annuali o stagionali mostrano ancora variazioni significative.

Adattarsi al cambiamento climatico e ridurre la vulnerabilità delle risorse idriche risulta quindi essenziale per il raggiungimento degli obiettivi globali (ONU, 2015).

1.2 L'irrigazione come adattamento ai cambiamenti climatici

Come già detto nel paragrafo precedente, il settore agricolo negli ultimi anni ha dovuto affrontare una serie di sfide legate al cambiamento climatico, tra cui la gestione delle risorse idriche, che rappresenta una delle problematiche più urgenti e complesse. Le condizioni climatiche globali sono in continua evoluzione, con un aumento delle temperature medie, variazioni nella distribuzione delle precipitazioni e l'intensificarsi di eventi estremi come siccità e alluvioni (IPCC, 2014), fenomeni che hanno un impatto diretto sull'agricoltura, influenzando la disponibilità e la qualità dell'acqua e modificando la capacità delle colture di assorbire acqua nei momenti in cui ne hanno maggiore esigenza.

Un cambiamento rilevante riguarda la distribuzione e l'intensità delle precipitazioni infatti, in molte aree del mondo, le piogge sono diventate più irregolari e concentrate in eventi estremi, alternando lunghi periodi di siccità a precipitazioni intense e brevi (Fischer et al., 2012), questa tendenza ha portato a una riduzione della "pioggia utile" per le colture, riduzione data dall'aumento del deflusso superficiale (runoff) e sotto superficiale (deflusso dell'acqua che scorre verso valle a 15-30cm di profondità sopra il primo strato impermeabile, spesso rappresentato nelle colture erbacee arative dalla suola di lavorazione che impedisce all'acqua di infiltrarsi adeguatamente nel suolo. ((WMO), 2020).

La diminuzione dell'acqua disponibile per le piante ha reso necessario l'uso di sistemi di irrigazione per garantire l'apporto idrico nei periodi critici di crescita, come la fioritura e la formazione dei frutti, essenziali per un raccolto ottimale sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo (Morison et al., 2008). Inoltre, il cambiamento climatico ha provocato anche un aumento delle temperature globali, che portano a loro volta ad un incremento dell'evapotraspirazione di riferimento (ET_o), ossia l'evaporazione totale dal suolo e la traspirazione delle piante in condizioni standard (Allen et al., 1998) ciò vuol dire che con temperature più elevate, le colture richiedono maggiori quantità d'acqua per mantenere un livello di crescita ottimale, poiché perdono acqua più rapidamente attraverso la traspirazione e il suolo tende a perdere umidità più in fretta e questo risulta essere particolarmente problematico nelle regioni dove le risorse idriche sono già scarse, perché significa che l'acqua di irrigazione deve essere utilizzata con efficienza crescente per evitare un impatto negativo sulla resa (Trnka et al., 2011)

L'irrigazione è quindi diventata una componente fondamentale per l'adattamento alle nuove condizioni climatiche, non solo per sopperire alla mancanza d'acqua durante i periodi critici, ma anche come strategia di resilienza rispetto all'incertezza climatica. Tuttavia, non tutte le tecniche irrigue sono altrettanto efficaci: un uso inefficiente dell'acqua può portare a sprechi significativi e, in alcuni casi, a problemi di salinizzazione del suolo. La ricerca si sta quindi orientando verso sistemi di irrigazione intelligenti e sostenibili, che siano capaci di adattarsi alle specificità di ogni contesto agricolo, rispondendo ai principi dell'irrigazione di precisione: giusta quantità d'acqua, al momento giusto e nel luogo giusto (Di T. Letterio, et al.).

L'irrigazione è quindi una delle pratiche più importanti per la sostenibilità della produzione agricola a livello globale soprattutto nel contesto attuale dove i cambiamenti climatici alterano i cicli idrologici, basti pensare che in molte regioni del mondo l'agricoltura rappresenta il principale settore di utilizzo dell'acqua, con circa il 70% del consumo globale di acqua dolce destinato proprio all'irrigazione agricola (Ingrao et al., 2023). In aree aride o semi-aride l'irrigazione è indispensabile per la sopravvivenza delle colture, ma anche in regioni più temperate, l'aumento dell'irregolarità delle piogge rende necessario un ricorso crescente a tecniche di irrigazione più efficienti. Quando si parla di "gestione efficiente dell'irrigazione" non si parla solo della quantità di acqua utilizzata ma anche di tempistica e metodo di distribuzione. A questo punto la sfida principale è bilanciare la necessità di garantire l'apporto idrico delle coltivazioni preservando le risorse naturali, infatti, un'irrigazione inefficiente oltre a poter causare una riduzione delle rese agricole, potrebbe anche causare problemi come l'erosione del suolo e la salinizzazione, fenomeni che compromettono nel lungo periodo la produttività agricola (Food and Agriculture Organization FAO, 2002). In breve, possiamo affermare che la scarsità idrica è aggravata dai cambiamenti climatici che a loro volta portano ad una maggiore variabilità delle precipitazioni e a un incremento di fenomeni di siccità prolungata, rendendo indispensabile l'adozione di sistemi di gestione dell'acqua che siano efficienti dal punto di vista quantitativo ma anche in grado di rispondere rapidamente alle condizioni ambientali variabili. Ciò è possibile grazie all'integrazione di tecnologie moderne come: sensori per il monitoraggio dell'umidità del suolo, stazioni meteo in loco e sistemi di irrigazione automatizzati, consentendo agli agricoltori di ottimizzare l'uso dell'acqua in tempo reale, contribuendo così a ridurre gli sprechi e migliorare la sostenibilità delle pratiche agricole (Fontana, 2024). Inoltre, una gestione efficiente dell'irrigazione potrebbe avere un impatto positivo anche dal punto di vista economico sui costi operativi delle aziende agricole in quanto l'utilizzo ottimale delle risorse idriche non solo riduce i costi di gestione ma potrebbe aumentare anche la produttività delle colture, portando a un maggiore ritorno economico per gli agricoltori (FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations., 2021). Inoltre, una corretta gestione dell'irrigazione contribuisce a preservare le risorse idriche per le generazioni future, promuovendo uno sviluppo agricolo più sostenibile e meno impattante sull'ecosistema (Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., 2011).

1.3 Tecniche di irrigazione sostenibili: dall'irrigazione convenzionale all'irrigazione di precisione.

Le tecniche irrigue tradizionali, come l'irrigazione a pioggia e l'irrigazione per scorrimento, sono state largamente utilizzate nell'agricoltura per decenni. Tuttavia, questi metodi spesso risultano inefficaci in termini di utilizzo dell'acqua, soprattutto in aree caratterizzate da scarsità idrica o da suoli con bassa capacità di ritenzione. L'irrigazione a pioggia, ad esempio, disperde l'acqua direttamente sul campo tramite ugelli o sistemi a rotazione, ma una percentuale significativa di questa viene persa per evaporazione o SCORRIMENTO?! superficiale, limitando la quantità effettivamente assorbita dalle radici (Perry et al 2009). L'irrigazione per scorrimento, invece, pur essendo un metodo relativamente economico, tende a creare una distribuzione disomogenea dell'acqua lungo il campo, con eccessi in certe aree e scarsità in altre, causando potenzialmente danni alle colture per eccesso o carenza d'acqua (Zhang et al., 2021).

Viste le crescenti sfide climatiche e la limitata disponibilità di risorse idriche, l'attenzione si è spostata verso tecniche più sostenibili come l'irrigazione a goccia, e in particolare, l'irrigazione di precisione. L'irrigazione a goccia rappresenta già un passo avanti rispetto ai metodi tradizionali, poiché eroga l'acqua direttamente in prossimità delle radici delle piante in piccole quantità controllate, riducendo così significativamente le perdite per evaporazione e percolazione profonda vantando un'efficienza del 90% (Montagna, 2021) l'irrigazione di precisione va oltre: grazie all'integrazione di tecnologie digitali avanzate, questa tecnica consente di monitorare continuamente lo stato idrico del suolo e delle piante e di adattare la somministrazione d'acqua in base a dati in tempo reale. Questo è reso possibile grazie alla combinazione di dati provenienti da sensori di umidità del suolo, stazioni meteorologiche in loco e modelli predittivi che analizzano variabili ambientali e agronomiche (Evans, R. G., & Sadler, 2008). I sensori di umidità, posizionati a diverse profondità nel suolo in base alla coltura, forniscono dati accurati sul contenuto idrico, evitano irrigazioni non necessarie e permettono di regolare automaticamente i volumi d'acqua erogati in base alle condizioni reali del terreno (Jones, H. G., & Tardieu, 1998). Stazioni meteorologiche locali permettono di calcolare con maggiore precisione l'evapotraspirazione di riferimento (ET_o) e di anticipare periodi critici di stress idrico per le colture, migliorando la capacità di risposta alle condizioni climatiche variabili (Allen et al, 1998). Studi recenti indicano che l'irrigazione di precisione può ridurre il consumo di acqua fino al 30-40%, mantenendo o addirittura migliorando la resa delle colture rispetto ai metodi tradizionali (Sadler et al, 2005). L'irrigazione di precisione, dunque, riesce ad essere così efficiente poiché si basa sul sistema SPAC (Soil-Plant-Atmosphere continuum), che utilizza variabili fondamentali come la capacità di ritenzione idrica del suolo, la radiazione solare e l'evapotraspirazione (misurati tramite gli strumenti sopra citati) combinati con specifici coefficienti colturali che rappresentano le esigenze idriche di una coltura in ogni fase fenologica e stadio di crescita per ogni tipo di coltura, per calcolare in modo preciso la quantità d'acqua necessaria (Villalobos et al, 2016). Grazie a questo sistema integrato, l'irrigazione di precisione può indicare con accuratezza quanta acqua una coltura richiede in un determinato periodo di tempo, evitando sprechi e riducendo al minimo il rischio di stress idrico. Questo processo permette di rispondere in modo dinamico alle condizioni

ambientali e di ottimizzare la disponibilità d'acqua, migliorando così sia l'efficienza dell'uso delle risorse idriche sia la produttività agricola (Pereira, et al 2012). Questa riduzione non solo porta benefici economici per l'agricoltore, ma anche vantaggi ambientali significativi, poiché riduce la perdita di sostanze nutrienti come azoto e fosforo, spesso responsabili di inquinamento delle falde acquifere e dei corsi d'acqua (Gao, W., & Zhang, 2018). Il controllo preciso dell'irrigazione aiuta inoltre a prevenire la salinizzazione del suolo, un problema comune nelle aree irrigate, dove l'accumulo di sali nel profilo del terreno può degradare la fertilità a lungo termine (Rhoades, et al, 1992)

1.4 Il sistema suolo-pianta-atmosfera (SPAC) e le variabili irrigue.

Il sistema SPAC (Soil-Plant-Atmosphere continuum) rappresenta un modello fondamentale per comprendere le dinamiche dell'acqua nelle colture agricole specialmente quando si parla di irrigazione. Questo sistema si basa sull'interazione complessa tra il suolo, dove l'acqua è immagazzinata; le piante, che la assorbono attraverso le radici e la trasferiscono alle parti aeree; e l'atmosfera, che regola l'evaporazione dell'acqua dalla superficie del suolo e la traspirazione dalle piante. Comprendere i principi del sistema SPAC è essenziale per gestire in modo efficiente le risorse idriche e ottimizzare l'irrigazione, soprattutto nell'attuale contesto di cambiamento climatico e crescente scarsità d'acqua.

Il bilancio idrico nel sistema SPAC considera l'entrata e l'uscita dell'acqua, determinando quanta acqua sia effettivamente disponibile per le piante. Le principali componenti di ingresso includono la pioggia e l'acqua d'irrigazione, mentre le perdite avvengono principalmente attraverso l'evapotraspirazione (ET) e il drenaggio profondo. L'evapotraspirazione di riferimento (ET₀), spesso calcolata con il modello FAO Penman-Monteith, rappresenta la quantità d'acqua che si trasferisce dal suolo e dalle piante all'atmosfera in condizioni standard. L'ET₀ è una variabile essenziale nel calcolo dei fabbisogni idrici delle colture, poiché rappresenta la quantità d'acqua necessaria in un determinato contesto climatico, si calcola combinando dati come la temperatura, l'umidità, la velocità del vento e la radiazione solare. Inoltre, ogni coltura ha un coefficiente specifico che rappresenta quanto "beve" in una determinata fase di crescita: moltiplicando questo coefficiente per le condizioni climatiche rilevate, è possibile calcolare quanta acqua serve alle piante in un certo periodo. Questo calcolo diventa ancora più significativo nel caso di colture sensibili allo stress idrico, in cui il bilancio idrico deve essere attentamente monitorato per evitare sia carenze che eccessi d'acqua.

Oltre all'evapotraspirazione, all'interno del sistema SPAC ci sono altre variabili che influenzano il fabbisogno idrico delle piante quali:

- Capacità di Ritenzione Idrica del Suolo: Determina la quantità massima di acqua che il suolo può trattenere dopo un'irrigazione o una precipitazione, e varia a seconda della struttura del terreno. La formula comunemente utilizzata per determinare la capacità idrica disponibile (AWC) è:

$$AWC = (FC - WP) \times Z$$

dove:

- **FC:** Capacità di campo, ovvero il contenuto di acqua massimo trattenibile dal suolo (mm),
- **WP:** Punto di appassimento, ovvero il contenuto idrico minimo oltre il quale la pianta non riesce più ad assorbire acqua (mm)
- **Z:** Profondità della zona radicale (cm).
- **Deficit di Pressione di Vapore (VPD):** Influenza la traspirazione delle piante, poiché un alto VPD incrementa la richiesta d'acqua della pianta. Il deficit di pressione di vapore dipende dalla temperatura e dall'umidità relativa, e rappresenta una delle variabili utilizzate per stimare l'evapotraspirazione reale delle colture.

Ricapitolando, il sistema SPAC ci permette di comprendere meglio i processi di scambio dell'acqua tra suolo, pianta e atmosfera, analizzando le complesse interazioni tra variabili ambientali e fisiologiche (Kramer, P. J., & Boyer, 1995) e per applicarla in un contesto pratico, è essenziale integrare questi dati con modelli predittivi specifici, in quanto l'uso di modelli per la gestione dell'irrigazione risiede proprio nella loro capacità di combinare in modo dinamico le variabili del sistema SPAC con informazioni agronomiche e climatiche, fornendo stime accurate dei fabbisogni idrici delle colture (Allen et al 1998) permettendo una gestione dell'irrigazione più efficiente e quindi che ogni pianta riceva l'acqua necessaria nel momento giusto, riducendo così sprechi e potenziali impatti ambientali (Sadler et al 2005).

1.5 Determinazione del Fabbisogno Idrico delle Colture: l'Importanza dei Modelli Predittivi per l'Ottimizzazione delle Risorse.

La determinazione del fabbisogno idrico delle colture rappresenta un passaggio cruciale nella pianificazione e gestione dei progetti di irrigazione, poiché definisce l'intero svolgimento delle operazioni di progettazione, dall'intensità dell'irrigazione alla gestione di sbocchi e canali (Doorenbos et al., 1975). Il fabbisogno idrico delle colture è definito come la quantità di acqua necessaria per compensare le perdite dovute all'evapotraspirazione, dove viene considerata sia l'evaporazione diretta dal suolo sia la traspirazione di acqua dalle piante (FAO, 1985). La comprensione e la stima accurata di questo parametro sono fondamentali per pianificare e gestire l'irrigazione, specialmente nel contesto attuale di crescente variabilità climatica. Questa necessità idrica dipende principalmente da tre fattori: il clima, che influisce sulle richieste di acqua (climi soleggiati e caldi incrementano l'evapotraspirazione); il tipo di coltura, con piante a maggiore consumo come, ad esempio, il mais richiede più acqua rispetto a colture come il sorgo; e la fase di crescita, dato che le piante completamente sviluppate necessitano di maggiori quantità rispetto a quelle appena piantate (Doorenbos, J., & Pruitt, 1977).

I modelli predittivi permettono quindi di ottimizzare l'irrigazione, riducendo il consumo idrico fino al 30% senza comprometterne la resa (Pereira et al 2012). Questi modelli calcolano l'evapotraspirazione della coltura (ET_c) utilizzando il coefficiente di coltura (k_c) e l'evapotraspirazione di riferimento (ET_o). La relazione tra i due parametri si esprime attraverso la formula:

$$ET_{c,i} = K_{c,i} \times ET_{o,i}$$

Dove:

$K_{c,i}$ rappresenta il coefficiente di coltura per il giorno i -esimo e $ET_{o,i}$ è l'evapotraspirazione di riferimento del giorno i -esimo. Questi algoritmi considerano il cambiamento del coefficiente di coltura nel tempo, tracciando curve che rappresentano l'evoluzione della domanda idrica lungo le fasi di crescita, dalla semina alla maturazione (Allen et al 1998). Inoltre, i modelli utilizzano dati climatici e del suolo, analisi meteorologiche e sensori in campo, integrando informazioni di variabilità temporale e fenomeni specifici delle colture.

Studi come quello di (Doorenbos et al., 1975) dimostrano l'importanza di adattare il coefficiente k_c in funzione della crescita delle piante, per cui l'efficacia dell'irrigazione dipende dalla corretta valutazione delle esigenze specifiche di ciascuna fase del ciclo vegetativo, dalla semina alla maturazione. Questo approccio, oltre a garantire un uso razionale delle risorse, rappresenta una leva fondamentale per lo sviluppo di strategie agricole sostenibili, con benefici sia per la produttività sia per la tutela delle risorse idriche (Jones, H. G., & Rotenberg, 2019). Dunque, l'integrazione dei modelli predittivi permette quindi di stimare con precisione l'evapotraspirazione di riferimento (ET_o) e di adattare le esigenze idriche delle colture in base al coefficiente di coltura (k_c). Tali modelli, infatti, consentono di ottimizzare il bilancio idrico, migliorando l'efficienza dell'irrigazione e riducendo il consumo idrico fino al 30% rispetto alle pratiche tradizionali ottenendo stime più precise, migliorando l'efficienza delle risorse idriche disponibili e promuovendo una gestione sostenibile parametri ormai indispensabili in agricoltura visti i volumi di acqua dolce utilizzata nel settore (Pereira et al, 2012) A tal proposito possiamo evidenziare che uno degli aspetti più rilevanti dei modelli di irrigazione è proprio la loro capacità di analizzare e prevedere le esigenze idriche delle piante, tenendo conto di fattori come la temperatura, l'umidità del terreno, le precipitazioni, il tipo di coltura e il ciclo fenologico delle piante stesse. Ad esempio, un modello che utilizza ed elabora dati provenienti da stazioni meteo locali, sensori di umidità del suolo e tipo di coltura può adattare la quantità di acqua distribuita a seconda delle condizioni climatiche, minimizzando gli sprechi e migliorando l'assorbimento da parte delle radici (Jones, 2004). Questo approccio, noto come irrigazione di precisione, consente quindi di monitorare il fabbisogno idrico e al tempo stesso migliorare la salute e la produttività delle piante basandosi sul concetto di bilancio idrico del suolo, ovvero il calcolo della quantità di acqua disponibile per le piante rispetto al loro fabbisogno in un dato periodo di tempo. La conoscenza precisa del bilancio idrico permette di programmare interventi irrigui mirati, che evitano sia situazioni di stress idrico, che portano a riduzioni del raccolto, sia fenomeni di sovra-irrigazione, che possono causare perdite di nutrienti e un aumento dei costi operativi (Allen et al, 1998; Doorenbos, J., & Pruitt, 1977). Modelli di questo tipo possono essere applicati anche a colture particolarmente sensibili, come ad esempio gli agrumi, dove un'irrigazione settimanale correttamente

programmata può influire su parametri qualitativi quali peso, gradi Brix, acidità e volume di succo, garantendo un prodotto di qualità superiore (Jones, 2004; Steduto et al, 2009). Un altro elemento che rende fondamentali i modelli di gestione dell'irrigazione è la possibilità di integrare tecnologie avanzate per il monitoraggio dello stato idrico delle piante attraverso strumenti come il porometro per la misura della conduttanza stomatica e camere di pressione per la misura del potenziale idrico, che permettono di raccogliere dati precisi che alimentano il modello, offrendo previsioni ancora più accurate (Brown et al 2019). Questo tipo di gestione consente una reattività immediata a condizioni climatiche variabili, proteggendo le colture dagli stress e ottimizzando i rendimenti, riducendo al contempo l'impatto ambientale associato all'uso inefficiente dell'acqua (Allen et al, 1998; Steduto et al, 2009).

I modelli di gestione dell'irrigazione, in sintesi, rappresentano un ponte tra la scienza e la pratica agricola quotidiana, offrendo strumenti concreti per affrontare le sfide moderne dell'agricoltura. L'adozione di tali modelli è cruciale non solo per l'efficienza produttiva, ma anche per preservare risorse preziose in un contesto di crescente pressione ambientale e climatica, il loro impiego infatti consente di massimizzare i benefici economici e qualitativi per gli agricoltori, mantenendo un equilibrio con le esigenze ecologiche e le dinamiche di sostenibilità del territorio (Brown et al, 2019; Jones, 2004)

Capitolo 2

MATERIALI E METODI

2.1 Descrizione dell'area di studio (agrumeto commerciale)

Lo studio è stato condotto in un appezzamento commerciale appartenente alla cooperativa La Rural San Vincent Ferrer di Benaguacil Coop. situato nel comune di Pedralba (Valencia), una regione rinomata per la produzione di agrumi. Il campo ad uso sperimentale ricopre una superficie di 1,6 ettari di aranci di 6 anni in piena produzione, varietà Valencia 'Midknight', innestati su portinnesto di *Citrus macrophylla* in un sesto di impianto ad alta densità 5x2 m (1000 piante ad ettaro). La Midknight è una varietà di arance originaria del Sudafrica, deriva da una mutazione naturale della varietà 'Valencia Late' ed è una delle varietà di arance più utilizzate per il consumo fresco, nota per il suo gusto dolce e il succo abbondante. Questo tipo di arancia è particolarmente apprezzato per la sua qualità e per il periodo di maturazione tardivo che permette di prolungare la stagione di raccolta rispetto ad altre varietà.

Il suolo della superficie sperimentale è caratterizzato da una tessitura franco-argillosa (44% sabbia, 28% argilla, 28% limo) e un contenuto di sostanza organica pari al 1,43%. L'acqua di irrigazione proviene da un pozzo presente nell'appezzamento, caratterizzata da conduttività elettrica di 1,16 dS m⁻¹ e un pH di 7,7. L'impianto di irrigazione è costituito da due linee gocciolanti, distanti 0,75m dal tronco con gocciolatori integrati ed auto-compensanti da 1,75L h⁻¹, disposti ogni 0,5m.

Lo stato idrico del suolo, rilevato tramite sonde Enviroscan^R, viene monitorato da remoto tramite programma di visualizzazione dati ZENTRA Cloud del gruppo METER per la visualizzazione e la gestione dei dati in tempo reale nei test sul campo e in laboratorio. Per quanto riguarda la programmazione e la gestione dell'irrigazione, avvengono settimanalmente sempre da remoto negli uffici dell'Istituto Valenciano de Investigacion Agroalimentare (IVIA) situati a Moncada (Valencia), tramite la piattaforma INELCOM.



Figura 1: Immagine satellitare dell'appezzamento dove è stato condotto lo studio. I tre modelli sono stati disposti in blocchi casuali nella zona delineata in giallo

Nel campo sperimentale sono presenti tre trattamenti irrigui: Controllo e 2 modelli di programmazione sperimentali (modello P e modello H). Nel caso del controllo la programmazione viene effettuata in base alla dose teorica del metodo FAO-56, utilizzando i dati provenienti dalla stazione meteo presente nel campo sperimentale a Pedralba (Valencia) della rete SIAR (Sistema de Informacion Agroclimatica para el Regadio), attraverso la piattaforma online (<http://riegos.ivia.es>) per l'irrigazione dell'IVIA (Istituto Valenciano de Investigacion Agraria), adattando il programma ogni settimana per mantenere l'umidità a

30cm (zona radicale) a livelli adeguati ed evitare perdite di drenaggio. Il campo sperimentale è stato organizzato secondo un disegno a blocchi randomizzati per ridurre l'influenza di variabili esterne e garantire l'omogeneità tra i trattamenti. Questa metodologia è stata adottata per minimizzare potenziali effetti come la vicinanza a canali d'acqua, che potrebbero alterare le condizioni idriche del suolo in modo non uniforme. Ogni trattamento (Controllo, modello P e modello H) è stato distribuito in blocchi casuali replicati per assicurare che le condizioni sperimentali fossero equilibrate, migliorando così l'affidabilità statistica dei risultati ottenuti. La randomizzazione dei trattamenti all'interno dei blocchi ha permesso quindi di distribuire in modo uniforme i fattori ambientali variabili, riducendo l'impatto di fattori non controllati e rafforzando la validità delle conclusioni sperimentali. I modelli di programmazione dell'irrigazione verranno dettagliati di seguito.

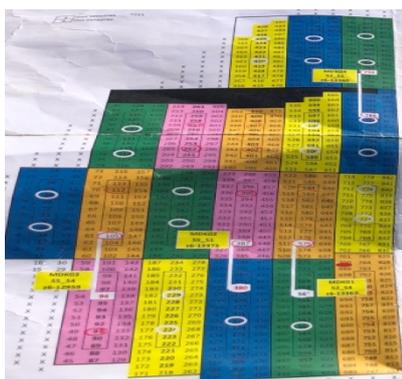


Figura 2: *Schema su carta dell'appezzamento studiato diviso in blocchi randomizzati*

2.2 Raccolta dei dati suolo-pianta-atmosfera e dettagli sugli strumenti utilizzati

Per monitorare le condizioni del suolo e dell'atmosfera, nel campo sono state installate varie sonde di umidità modello Enviroscan e una stazione meteo della rete SIAR. Le sonde Enviroscan (figura 5) forniscono dati continui (ogni 45minuti) sull'umidità del suolo a diverse profondità, questo è dovuto grazie alla loro struttura in quanto sono formate da un asse principale sul quale sono posizionati vari sensori magnetici a distanze variabili tra loro permettendo un monitoraggio preciso e in tempo reale delle condizioni idriche del suolo. Le sonde vengono posizionate a pochi cm dalle radici della pianta mentre la profondità varia da coltura a coltura in base all'apparato radicale, nel nostro caso sono state collocate in modo da



Figura 4: *Sensore utilizzato per misurare l'umidità del suolo*



Figura 3: *Stazione meteorologica*

monitorare fino a 60cm di suolo. Queste sonde utilizzano il principio della capacitanza, misurando le variazioni di capacità elettrica del suolo per determinare il suo contenuto d'acqua (Ecosearch, n.d.). La stazione meteo raccoglie dati climatici essenziali, tra cui temperatura, umidità relativa, velocità del vento e radiazione solare. (Figura 4)

Per avere un quadro chiaro della situazione ogni dieci giorni durante tutto il ciclo annuale, sono stati raccolti dati fisiologici relativi allo stato delle piante per monitorare il loro stato idrico (conduttanza stomatica e potenziale idrico), con l'obiettivo di valutare eventuali condizioni di stress. La conduttanza stomatica è stata misurata con uno strumento chiamato porometro (Figura 5), il quale analizza lo scambio gassoso in foglia mediante una camera chiusa, rilevando le variazioni di CO₂ e vapore acqueo. Valori elevati indicano buona capacità di traspirazione, mentre valori ridotti evidenziano stress idrico, in questo studio per ciascuna pianta sono state eseguite tre misurazioni per ottenere dati rappresentativi. Per quanto riguarda il potenziale idrico, in questo studio è stato misurato in due passaggi. Nel primo, al mattino presto, venivano imbustate due foglie per pianta in apposite bustine argentate per bloccare i processi di traspirazione (Figura 6) garantendo che il potenziale idrico delle foglie fosse uguale a quello del tronco.



Figura 6: Porometro Li-cor utilizzato per la misurazione della conduttanza stomatica



Figura 5: Foto scattata in campo di una foglia imbustata per poi essere prelevata per misurare il potenziale idrico

Il secondo passaggio invece, veniva svolto nelle ore più calde, in questa fase le foglie imbustate venivano staccate dalla pianta e analizzate rapidamente mediante una camera di pressione di Scholander portatile (Figura 7), per determinare il potenziale idrico e valutare lo stato idrico delle piante. Il potenziale idrico risultante è un parametro essenziale per indicare la capacità della pianta di mantenere l'idratazione, con valori equilibrati che riflettono un buon stato fisiologico e contenuto d'acqua adeguato, mentre valori elevate possono suggerire condizioni di stress.



Figura 7: Camera di pressione portatile utilizzata nello studio per misurare il potenziale idrico

Questi dati sono fondamentali per alimentare gli algoritmi di irrigazione P e H, che utilizzano informazioni suolo-atmosfera per calcolare il fabbisogno idrico delle piante.

Ogni settimana, precisamente il martedì, veniva pianificata l'irrigazione per i sette giorni successivi, fino al martedì seguente. La programmazione avveniva da remoto, grazie a un modem wireless presente nel campo, che trasmetteva i dati raccolti dalle sonde e dalla stazione meteorologica. Tali dati alimentavano algoritmi di calcolo dello studio che determinavano le ore di irrigazione necessarie. Una volta stabilita la programmazione, veniva configurata sempre da remoto tramite un software che, tramite il modem, comunicava con le elettrovalvole per gestire l'apertura e la chiusura in base agli orari impostati. Oltre alla programmazione dell'irrigazione, l'ufficio era dotato di strumenti e piattaforme per il monitoraggio continuo dello stato del campo sperimentale. I dati raccolti dalle sonde di umidità del suolo e dalla stazione meteorologica erano consultabili in tempo reale da remoto (Figura 8). Questo permetteva di avere una visione d'insieme delle condizioni del terreno e del clima locale, offrendo una panoramica dettagliata dell'andamento dei parametri idrici e ambientali. Grazie a queste informazioni era possibile controllare il corretto funzionamento delle attrezzature e ottimizzare le decisioni legate all'irrigazione, correggendo prontamente eventuali anomalie o adeguamenti richiesti per garantire un'efficace gestione idrica delle colture.

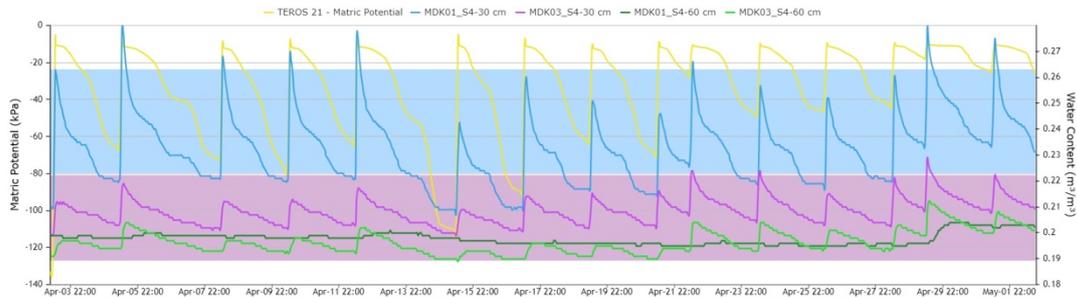


Figura 8: Rappresentazione dei dati trasmessi dalle sonde di umidità

2.3 Algoritmi di irrigazione utilizzati nello studio (tradizionali e sperimentali)

Nello studio condotto, sono stati adottati tre distinti algoritmi di irrigazione per confrontare le diverse modalità di gestione idrica e il loro impatto sulla produzione e sulla qualità del raccolto. L'obiettivo principale è stato quello di determinare l'efficacia e la sostenibilità dei modelli sperimentali rispetto al metodo tradizionale comunemente utilizzato. Di seguito si riportano le caratteristiche principali di ciascun approccio.

- **Modello di controllo (Tradizionale):**

Nello studio, per il trattamento di controllo, è stato utilizzato il modello Penman-Monteith FAO 56 per la programmazione dell'irrigazione. Questo modello ha fornito il calcolo del fabbisogno idrico basato sull'evapotraspirazione di riferimento (ET_o), utilizzando dati climatici locali, come radiazione solare, temperatura, umidità e

velocità del vento. L'obiettivo del trattamento di controllo era seguire un approccio standard e consolidato per l'irrigazione, mantenendo livelli adeguati di umidità del suolo conformi alle raccomandazioni del metodo FAO 56, garantendo una gestione ottimale delle risorse idriche e condizioni agronomiche appropriate per il confronto con i modelli sperimentali. Questo modello è ampiamente utilizzato per la gestione dell'irrigazione e per pianificare l'uso delle risorse idriche nelle coltivazioni agricole perché offre una metodologia affidabile per stimare quanta acqua è necessaria per mantenere le colture in condizioni ottimali (Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, 1998).

La formula Penman-Monteith per calcolare l'ET_o è la seguente:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

Dove:

ET_o = Evapotraspirazione di riferimento (mm/giorno)

Δ = Pendenza della curva di pressione del vapore (kPa/°C)

R_n = Radiazione netta al livello della coltura (MJ/m²/giorno)

G = Flusso di calore nel suolo (MJ/m²/giorno)

γ = Costante psicrometrica (kPa/°C)

T = Temperatura media dell'aria (°C)

u_2 = Velocità del vento a 2 metri di altezza (m/s)

e_s = Pressione di saturazione del vapore (kPa)

e_a = Pressione del vapore attuale (kPa)

Per calcolare il fabbisogno idrico delle colture specifiche l'ET_o viene poi moltiplicata per un **coefficiente culturale (Kc)**, che varia in base alla coltura e alla sua fase di crescita. È particolarmente utile per ottimizzare l'irrigazione, riducendo il consumo d'acqua e migliorando l'efficienza d'uso delle risorse idriche in agricoltura. Il calcolo dell'evapotraspirazione delle colture (ET_c) in condizioni standard presuppone che non vi siano limitazioni per la crescita delle piante, né problemi legati a carenza idrica, salinità, densità delle colture, malattie, parassiti o infestazioni di erbe infestanti. L'ET_c si ottiene utilizzando un coefficiente culturale (Kc) che, moltiplicato per l'evapotraspirazione di riferimento (ET_o), tiene conto sia delle condizioni meteorologiche sia delle caratteristiche specifiche della coltura, secondo la formula:

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

Il coefficiente Kc rappresenta sia la traspirazione della pianta che l'evaporazione del suolo, integrandoli in un unico valore (Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, 1998).

- **Modelli sperimentali (modello H e modello P):**

In questo studio vengono analizzati due modelli per determinare le necessità di irrigazione settimanale (NR(s)), utilizzando un fattore di correzione K_i che tiene conto della relazione suolo-pianta-atmosfera. Tale fattore interviene, se necessario, per aggiustare la programmazione di irrigazione effettuata nella settimana precedente (NR(s-1)) attraverso la seguente formula:

$$NR(s) = NR(s-1) \times K_i$$

Il valore di K_i include due componenti: uno che riguarda lo stato idrico del suolo (K_θ) e l'altro relativo alle condizioni ambientali (K_{ETo}) definito come:

$$K_i = K_\theta \times K_{ETo}$$

Il fattore K_θ è legato allo stato idrico del suolo, infatti, ha lo scopo di stimare automaticamente le esigenze idriche di irrigazione, apportando correzioni se necessario, alle dosi applicate nella settimana precedente. L'obiettivo è riportare il livello di umidità del suolo (θ) a un valore ottimale per la fase fenologica della coltura ($\theta_{coltura}$).

Considerando che i sensori di umidità possono essere influenzati da vari fattori, quali la presenza di sacche d'aria durante l'installazione, le modifiche alla struttura del suolo dovute a pratiche di gestione, caratteristiche del suolo come tessitura e contenuto organico, si preferisce utilizzare valori relativi piuttosto che assoluti. Per questo motivo, il contenuto di umidità relativa del suolo (CRU) viene definito come:

$$CRU = \frac{\theta}{\theta_{cc}}$$

Dove: θ rappresenta il contenuto di umidità rilevato e θ_{cc} è l'umidità a capacità di campo.

Allo stesso modo si calcola il CRU della coltura attraverso la seguente espressione:

$$CRU_{coltura} = \frac{\theta_{coltura}}{\theta_{cc}}$$

Il coefficiente correttivo si determina confrontando il contenuto minimo di umidità rilevato durante la settimana precedente (CRU_n) con il valore ottimale di CRU per la coltura (Jaén, 2023). Di conseguenza, il fattore relativo allo stato idrico del suolo si ottiene come segue:

$$K_\theta = \frac{CRU_{coltura}}{CRU_n}$$

L'altro fattore preso in considerazione è il fattore K_{ETo} , un fattore che si basa sulle condizioni ambientali. Variazioni della ETo forniscono informazioni sulla domanda evapotraspirativa della coltura. Per calcolarla, in questo caso è stato scelto il metodo di Hargreaves-Samani (HS), che richiede solo i valori di temperatura osservata, risultando quindi più semplice e pratico. Il fattore correttivo K_{ETo} è stato determinato considerando due approcci distinti: uno confrontando l'ETo prevista e quella osservata ($K_{ETo-Prev}$) mentre l'altro utilizzando dati meteorologici storici ($K_{ETo-historica}$). Questi due approcci definiscono i modelli utilizzati. Tali modelli sono stati chiamati Modello H (H sta per Historico che in spagnolo vuol dire storico) e Modello P (di Previsione)(Jaén, 2023).

1. $K_{ETo-Prev}$ Modello P= In questo caso il valore di ETo previsto per il periodo di programmazione (ETo_s) viene confrontato con il valore osservato nella settimana precedente (ETo_{s-1}). Per stimare ETo, si utilizzano previsioni settimanali fornite dall'AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). I dati di temperatura giornaliera (media, massima e minima) vengono usati per calcolare ETo mediante il metodo Hargreaves-Samani. La relazione è data da:

$$K_{ETo\ prev} = \frac{ETo_s}{ETo_{s-1}}$$

2. $K_{ETo-historica}$ Modello H: Nel modello “storico” viene presa in considerazione la ETo. la ETo relativa al periodo di programmazione (ETo HS) viene confrontata con la ETo storica della settimana precedente (ETo HS₋₁). I dati arrivano dalla stazione agrometeorologica SIAR situata in campo e comprendono una serie storica ventennale di temperature massime, medie e minime giornaliere (Jaén, 2023). Il fattore di variazione settimanale è calcolato come segue:

$$K_{ETo-hist} = \frac{EToH_s}{EToH_{s-1}}$$

A questo punto, dopo aver illustrato i coefficienti utilizzati nello studio è possibile calcolare gli algoritmi dei modelli sperimentali:

- **Modello P:** considera le informazioni dei sensori di umidità e le previsioni meteorologiche per calcolare ETo con il metodo HS ($K_{ETo-Prev}$)

$$K_i = K_\theta \times K_{ETo-Prev}$$

- **Modello H:** utilizza le informazioni dei sensori di umidità del suolo (K_θ) e i valori storici di ETo calcolati secondo HS ($K_{ETo-historica}$) (Jaén, 2023).

$$K_i = K_\theta \times K_{ETo-Hist}$$

2.4 Raccolta frutti, analisi qualitative e della produzione.

L'obiettivo di questo studio è confrontare l'efficacia dei tre trattamenti in termini di risparmio idrico, qualità e quantità del prodotto. I modelli P e H sono stati progettati per ottimizzare l'uso dell'acqua senza compromettere la produttività e la qualità delle arance. Attraverso l'analisi dei dati raccolti, si intende determinare quale algoritmo offra il miglior compromesso tra efficienza idrica e mantenimento della qualità del frutto.

A tal proposito sono state effettuate analisi qualitative del frutto post-raccolta. La raccolta delle arance è avvenuta il 25 aprile 2024. I frutti sono stati raccolti, pesati e contati per ciascuna ripetizione del trattamento. Successivamente, per ogni ripetizione, sono state selezionate 10 arance provenienti da tre alberi della stessa ripetizione di trattamento per le analisi. Di queste 10 arance, ne sono state analizzate sette, mentre le

restanti tre sono state conservate come scorta nel caso in cui si verificassero eventuali problemi questo per un'analisi dettagliata delle caratteristiche qualitative.

Per le analisi qualitative, i sette frutti messi da parte sono stati sottoposti a diverse misurazioni al fine di ottenere vari parametri, utilizzando strumenti specifici. Per ogni ripetizione del trattamento sono stati analizzati: il peso del frutto singolo, il diametro e l'altezza del frutto, lo spessore della buccia e della polpa, e il colore tramite colorimetro. Successivamente, i frutti sono stati spremuti e, da quel momento, le analisi hanno riguardato l'insieme dei sette frutti. È stata determinata la densità del succo con un densimetro, misurata l'acidità utilizzando uno strumento dedicato e rilevati i gradi Brix con un rifrattometro da laboratorio. Tutti i dati raccolti sono stati successivamente elaborati e analizzati tramite test statistici, quali l'analisi della varianza (ANOVA) e il test di Tukey, per valutare le performance dei tre trattamenti. Nel prossimo capitolo questi aspetti saranno spiegati nel dettaglio.



Figura 9: Misurazione dello spessore della buccia con calibro



Figura 10: Misurazione dell'altezza del frutto con calibro



Figura 11: Misurazione del colore tramite spettrofotometro



Figura 12: Misurazione gradi brix con rifrattometro



Figura 13: Misurazione dell'acidità

Capitolo 3

RISULTATI E DISCUSSIONI

3.1 Volumi di irrigazione e confronto tra i modelli

La programmazione dell'irrigazione nel trattamento di controllo è stata effettuata settimanalmente in modo convenzionale, utilizzando i dati teorici dell'ETc ottenuti dalla stazione meteorologica situata in campo a Pedralba (Valencia). Durante la campagna 2023-2024, è stato applicato un volume di irrigazione di 479 mm per il trattamento di controllo. Per i modelli sperimentali (ModelloH e ModelloP), sono stati applicati rispettivamente 411 mm e 489 mm, come riportato nella Tabella 1.

Per approfondire l'impatto dei volumi di irrigazione, è stato analizzato il comportamento dei fattori di correzione applicati durante il periodo di prova. Il grafico (Figura 14) mostra chiaramente in quali settimane i fattori di correzione, specialmente nel modello P, hanno avuto un'incidenza maggiore sull'irrigazione complessiva. In particolare, si osservano variazioni rilevanti nelle settimane 4-5-6 e 35-36-37 evidenziando periodi in cui le condizioni atmosferiche e le esigenze delle piante hanno influenzato maggiormente la gestione idrica.

La correzione dei volumi applicati, calcolata sulla base di diversi fattori, ha permesso di analizzare l'efficacia di ciascun modello, evidenziando che il ModelloH ha applicato volumi di irrigazione significativamente inferiori rispetto al controllo (-16,6%), mentre il ModelloP ha mantenuto livelli vicini al trattamento di controllo, con un leggero aumento del 2%.

Tabella 1: Volumi di acqua applicati e valori medi dei fattori di correzioni utilizzati durante l'anno 2023/2024.

Trattamenti	Irrigazione	Fattori di correzione		
(modelli)	(mm)	KETo	K θ	Ki
MODELLO 1 H	411	1,00	0,84	0,845
MODELLO 2 P	489	1,16	0,94	1,098
Controllo	479	-	-	-

$$\text{Dove: } K_i = K_{ETo} \times K_{\theta}$$

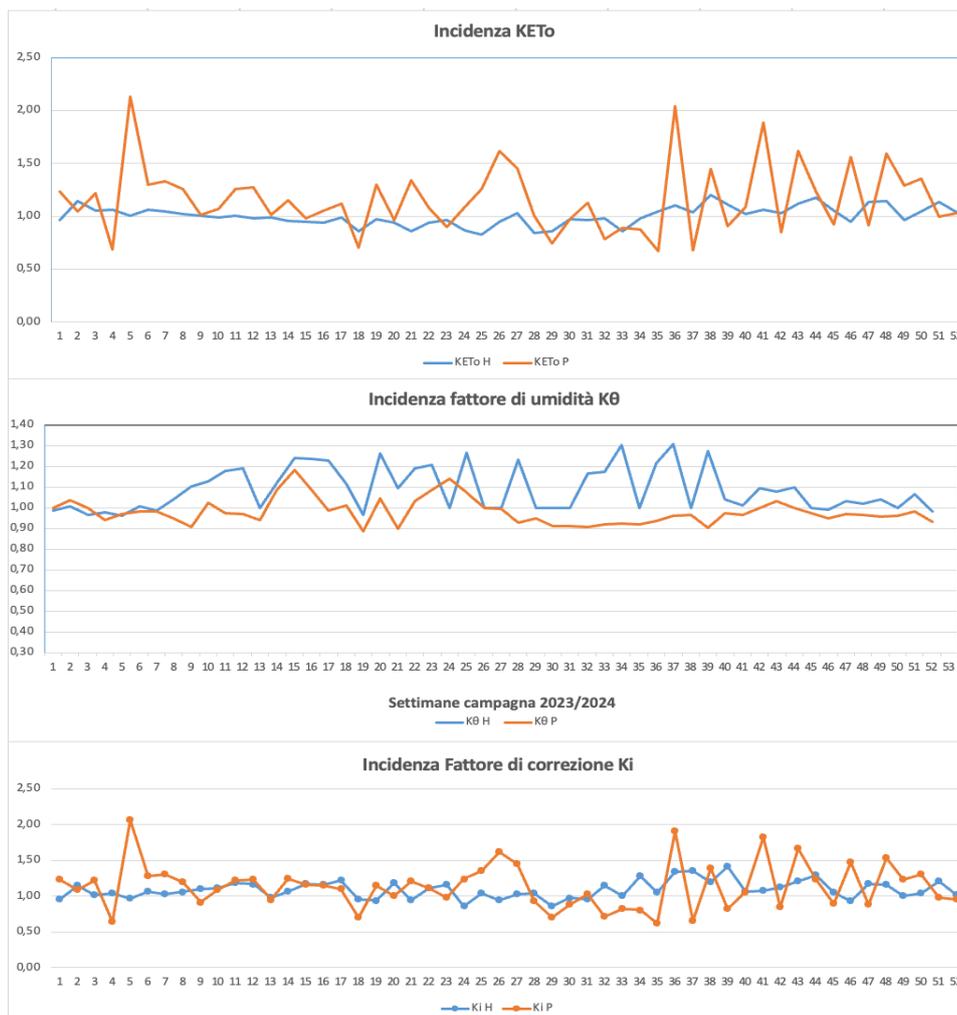


Figura 14: Incidenza dei fattori di correzione durante il periodo di sperimentazione

Il bilancio idrico complessivo durante il periodo di prova è stato calcolato combinando l'irrigazione applicata con le precipitazioni naturali. La tabella seguente (Tabella 2) riporta i dati relativi alle precipitazioni e all'irrigazione settimanale, mostrando il totale di acqua disponibile per le piante. Successivamente, il grafico dell'irrigazione accumulata (Figura 15) rappresenta l'andamento complessivo dei volumi d'acqua irrigui accumulati durante il periodo di studio.

Tabella 2: Rappresentazione del totale dell'apporto idrico sommando irrigazione e precipitazioni.

	ETo mm	Precipitazioni mm	Irrigazione mm	Tot mm
Controllo	1134,74	264,73	478,52	743,25
Modello 1 H	1134,74	264,73	410,998	675,728
Modello 2 P	1134,74	264,73	488,824	753,554

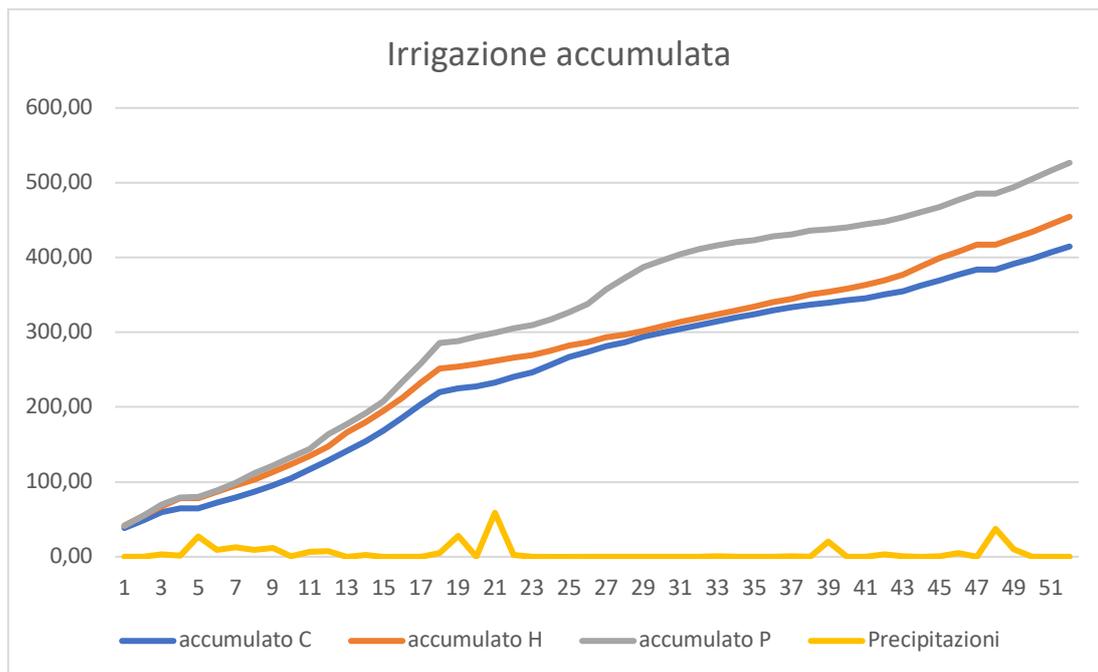


Figura 15: Rappresentazione dell'irrigazione accumulata dei tre modelli durante lo studio.

L'irrigazione accumulata è data dalla somma delle irrigazioni effettuate, ciò spiega la tendenza progressiva visibile nel grafico (Figura 15). Inoltre, si può osservare un ovvio aumento dell'accumulo in corrispondenza delle precipitazioni ma soprattutto si osserva un aumento significativo del volume d'acqua applicato a partire dalla settimana 15 per il modello P. Questo incremento mostra picchi particolarmente pronunciati durante la settimana 17 e successivamente nella settimana 27, per poi stabilizzarsi in un andamento progressivo crescente. Questo comportamento può essere correlato ai fattori di correzione osservati nei grafici associati (Figura 14). In queste stesse settimane, il fattore di correzione K_{ET} presenta un'elevata incidenza per il modello P, suggerendo un'influenza diretta sull'aumento della richiesta di irrigazione. Invece, per quanto riguarda il fattore K_{θ} che è legato all'umidità del suolo, è risultato essere pressoché costante per entrambi i modelli. Tuttavia, è importante precisare che a partire dalla settimana 27, il fattore K_{θ} ha mostrato una minore influenza nel modello P, pur mantenendo un andamento simile nei periodi precedenti.

3.2 Umidità relativa del suolo e stato idrico delle piante

L'analisi dell'umidità del suolo e dello stato idrico delle piante è fondamentale per comprendere l'efficacia e l'efficienza dei modelli di irrigazione studiati. Per monitorare l'umidità relativa del suolo, sono stati utilizzati sensori capaci di rilevare le variazioni di umidità, i dati raccolti sono stati poi rappresentati graficamente. Questi dati oltre ad essere stati utilizzati nei modelli per il calcolo dei volumi di irrigazione,

sono stati anche strumenti di monitoraggio con l'obiettivo di mantenere una certa umidità nella zona radicale ed evitare perdite di acqua per drenaggio.

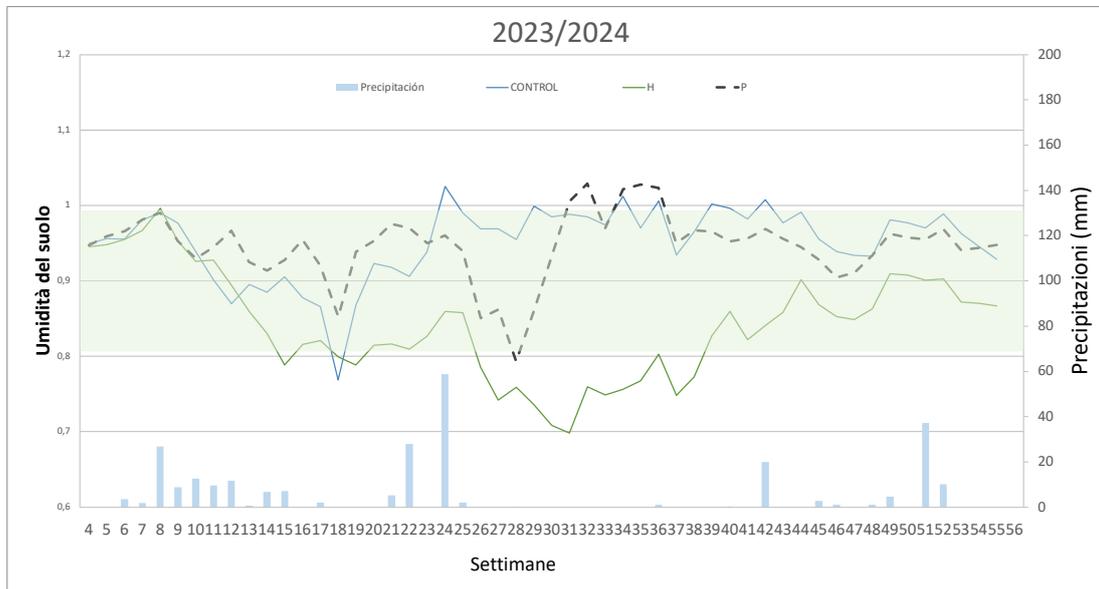


Figura 16: Rappresentazione grafica dei dati rilevati dalle sonde di umidità del suolo dei tre trattamenti durante il periodo di studio

Il grafico relativo all'umidità del suolo evidenzia l'andamento dell'umidità durante l'intero periodo di studio, con una fascia di rispetto evidenziata in verde, che indica l'intervallo considerato ottimale per il benessere delle colture. La fascia di rispetto è rappresentata il livello di umidità ideale per garantire uno sviluppo equilibrato della pianta e massimizzare l'efficienza idrica. Valori superiori all'1 indicano probabili perdite di acqua per drenaggio e quindi un eccesso idrico, al contrario valori più bassi di 0,8 indicano un probabile stress idrico e quindi carenze idriche.

Analizzando il grafico, si nota che entrambi i modelli di irrigazione sono riusciti a mantenere l'umidità del suolo all'interno della fascia di rispetto per la maggior parte del periodo considerato. Tuttavia, a partire dalla settimana 26, sono state registrate variazioni significative nei livelli di umidità del suolo per entrambi i modelli di irrigazione. Entrambi i modelli mostravano una tendenza al ribasso, avvicinandosi alla soglia critica di 0,8, mentre il modello P ha mostrato un recupero, risalendo al di sopra della soglia e aumentando le irrigazioni per contrastare il calo. Il modello H ha continuato a scendere al di sotto dello 0,8, arrivando fino allo 0,7, rimanendo in condizioni di stress idrico per un periodo esteso, approssimativamente da novembre a gennaio. Questo stress potrebbe aver influenzato negativamente la produzione.

Tali dati risultano coerenti con le analisi precedenti, poiché i minori volumi di irrigazione del modello H giustificano il livello di stress idrico osservato. D'altra parte, l'aumento repentino dell'umidità del suolo nel modello P corrisponde al comportamento dei coefficienti di incidenza, i quali, come evidenziato nei grafici, hanno avuto un'influenza maggiore nello stesso periodo. Il grafico dell'accumulo idrico conferma ulteriormente tale tendenza, mostrando un incremento significativo a partire da quella fase. Il modello P ha mostrato una tendenza a mantenere valori

leggermente superiori all'1, dimostrando una gestione più mirata dell'acqua rispetto al modello H, che ha presentato oscillazioni più marcate in alcune fasi.

Oltre ai dati relativi all'umidità del suolo, sono stati raccolti anche dati sul potenziale idrico per monitorare la salute delle piante durante il periodo di prova. Il potenziale idrico rappresenta un indicatore essenziale dello stato di stress delle piante, fornendo informazioni sulle condizioni di disponibilità idrica e sulla loro capacità di assorbire acqua dal suolo.

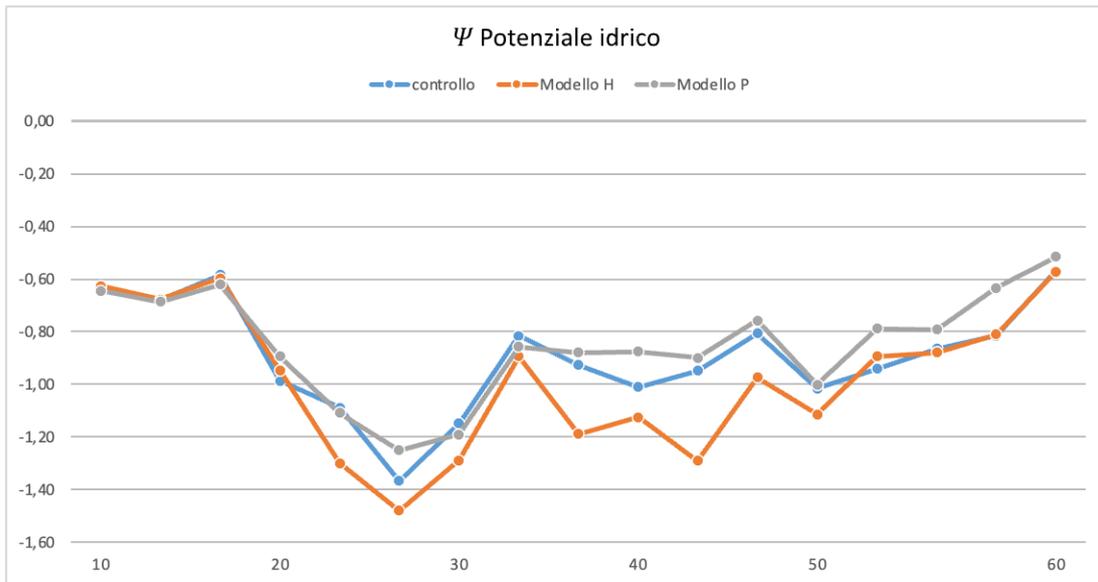


Figura 17: Rappresentazione grafica dell'andamento del potenziale idrico del tronco misurato in campo durante la prova.

Nel grafico sull'andamento del potenziale idrico si osservano variazioni significative nel corso della stagione. Il modello P, dopo un calo iniziale, mostra un miglioramento graduale che indica un'adeguata capacità di recupero grazie agli aggiustamenti di irrigazione. Tale comportamento è evidenziato da un ritorno a valori meno negativi rispetto al modello H, che invece manifesta un calo continuo, raggiungendo il livello più basso di stress idrico intorno alle settimane 40-50. Il controllo segue un andamento più stabile ma non particolarmente efficace nel mitigare le condizioni di stress.

Il modello P, grazie all'incremento progressivo dell'irrigazione in risposta agli episodi di stress, dimostra un comportamento più coerente con le necessità delle piante, mitigando i picchi di stress e supportando meglio il loro sviluppo. In confronto, il modello H risulta meno efficace, confermando le difficoltà già osservate nei livelli di umidità del suolo. Questo andamento suggerisce come la regolazione dinamica e l'adattamento del modello P possano aver contribuito a mantenere un miglior stato idrico complessivo delle piante.

3.3 Produzione e analisi statistica

In questo sottocapitolo dedicato alla produzione e all'analisi statistica, verranno presentati i risultati ottenuti in termini di resa e qualità delle colture, valutando l'efficacia dei diversi modelli di irrigazione applicati. I dati raccolti permettono di comparare i modelli sperimentati (modello H e modello P) con il controllo, considerando sia parametri quantitativi che qualitativi. Come descritto nel Capitolo 2, i frutti raccolti sono stati pesati e contati, successivamente analizzati in laboratorio per determinare una serie di parametri qualitativi e quantitativi legati alla produzione. Questi dati, una volta raccolti, sono stati sottoposti a una valutazione statistica approfondita per verificare l'efficacia dei trattamenti di irrigazione e l'impatto sulle caratteristiche produttive.

Tabella 3: Questa tabella riporta le medie delle performance ottenute dai tre trattamenti. Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test di Tukey ($p < 0,05$)

Trattamento	Produzione pianta ⁻¹ kg	n. frutti pianta ⁻¹ n.	Peso medio del frutto (g frutto ⁻¹)
Controllo	66,70 A	360,33 A	0,185 A
Modello H	60,32 A	326,38 B	0,185 A
Modello P	54,30 B	288,89 C	0,187 A

Dalla tabella è possibile osservare le differenze nei parametri produttivi tra i tre trattamenti. Il Trattamento di Controllo ha ottenuto i risultati migliori in termini di rendimento totale per albero (66,70 kg) e carico di frutti (360,33), entrambi significativamente superiori rispetto al Modello P. Il Modello H Presenta un rendimento simile al controllo, ma un carico di frutti inferiore (326,38), distinguendosi significativamente dagli altri trattamenti. Infine, il Modello P mostra i valori più bassi sia per rendimento (54,30 kg) che per carico di frutti (288,89), evidenziando una minore efficienza produttiva. Tuttavia, il peso medio del frutto non ha mostrato differenze significative tra i trattamenti, mantenendosi stabile intorno a 0,185-0,187 g.

Tabella 4: Rendimento (espresso in kg/m³) calcolato come rapporto tra il rendimento medio per pianta e il volume di irrigazione per pianta (in m³). Questo indicatore permette di valutare l'efficienza produttiva dei trattamenti in relazione all'acqua utilizzata.

Trattamento	Volume Irrigazione (m ³)	Rendimento (kg/m ³)
Controllo	7.43	6.73
Modello H	6.76	6.66
Modello P	7.54	5.31

- Controllo mostra il rendimento più alto (6.73 kg/m³), suggerendo una buona efficienza rispetto al volume di irrigazione utilizzato.
- Modello H ha un rendimento leggermente inferiore (6.66 kg/m³), indicando una performance simile al controllo.
- Modello P ha il rendimento più basso (5.31 kg/m³), evidenziando una minore efficienza produttiva rispetto agli altri trattamenti.

Tabella 5: Analisi statistica della varianza (ANOVA), Valori $P < 0.05$ indicano differenze statisticamente significative e sono evidenziati in grassetto.

Variabile	Fonte di variazione	SS	GL	MS	F	P-value
Diametro	Tra i gruppi	6.32	2	3.16	0.54	0.5897
	Entro i gruppi	176.50	30	5.88	-	-
	Totale	182.82	32	-	-	-
Peso Polpa	Tra i gruppi	2289.83	2	1144.91	0.62	0.547
	Entro i gruppi	55795.50	30	1859.85	-	-
	Totale	58085.30	32	-	-	-
Peso Corteccia	Tra i gruppi	11252.60	2	5626.32	1.81	0.180
	Entro i gruppi	93267.00	30	3108.90	-	-
	Totale	104520.00	32	-	-	-
% Succo	Tra i gruppi	42.35	2	21.18	0.98	0.3876
	Entro i gruppi	649.42	30	21.65	-	-
	Totale	691.78	32	-	-	-
°Brix	Tra i gruppi	4.92	2	2.46	11.29	< 0.001
	Entro i gruppi	6.53	30	0.22	-	-
	Totale	11.45	32	-	-	-
Acidità	Tra i gruppi	20.11	2	10.06	28.53	< 0.001
	Entro i gruppi	10.57	30	0.35	-	-
	Totale	30.69	32	-	-	-
Indice Maturità	Tra i gruppi	18.22	2	9.11	13.82	< 0.001
	Entro i gruppi	19.79	30	0.66	-	-
	Totale	38.01	32	-	-	-

Legenda Tabella 5:

- SS: Somma dei quadrati. - GL: Gradi di libertà - MS: Quadrati m
- F: Valore F della statistica ANOVA. P-value: Livello di significatività statistica

L'analisi statistica della varianza (ANOVA) è stata utilizzata per determinare le differenze statisticamente significative tra i trattamenti per le variabili considerate. Di seguito verranno spiegati brevemente i risultati riportati nella tabella 5.

Diametro

L'ANOVA per il diametro ha evidenziato che non ci sono differenze significative tra i gruppi ($F=0,5375$, $p=0,5897$). Questo risultato indica che i trattamenti non hanno influenzato in modo significativo questa variabile

Peso della Polpa

Anche per il peso della polpa, non sono state rilevate differenze significative tra i gruppi ($F=0,6156$, $p=0,547$). Pertanto, i trattamenti non sembrano aver determinato variazioni rilevanti su questa caratteristica.

Peso della Corteccia

Il peso della corteccia ha mostrato una lieve variabilità tra i gruppi ($F=1,81$), ma il test non è risultato statisticamente significativo ($p=0,18$). Questo suggerisce che i trattamenti non hanno influenzato in modo evidente questa variabile.

Percentuale di Succo

Anche per la percentuale di succo, non sono state osservate differenze significative ($F=0,9783$ $p=0,3876$). Questo implica che i trattamenti non hanno avuto un impatto significativo su questa variabile.

Gradi Brix

I gradi Brix hanno invece mostrato differenze altamente significative tra i gruppi ($F=11,29$ $p<0,001$). Questo risultato evidenzia che i trattamenti hanno influenzato in modo significativo il contenuto zuccherino del succo.

Acidità

Anche l'acidità ha mostrato differenze molto significative tra i gruppi ($F=28,53$ $p<0,001$). Questo risultato indica che i trattamenti hanno avuto un effetto rilevante sul livello di acidità.

Indice di Maturità

Infine, l'indice di maturità è risultato significativamente diverso tra i gruppi ($F=13,82$ $p<0,001$). Questo suggerisce che i trattamenti hanno influenzato in maniera importante la maturazione del prodotto.

Valori $p<0,05$ indicano che ci sono differenze statisticamente significative.

I risultati evidenziano che, mentre alcune variabili (come il diametro, il peso della polpa e della corteccia, e la percentuale di succo) non sono state significativamente influenzate dai trattamenti, altre variabili quali i gradi Brix, l'acidità e l'indice di maturità hanno mostrato differenze significative. Questi risultati indicano un effetto dei trattamenti sui parametri qualitativi del raccolto, con implicazioni importanti per la gestione agronomica. Di seguito verranno illustrati grafici per comprendere meglio i parametri in cui ci sono state differenze significative.

I gradi Brix hanno mostrato differenze altamente significative tra i gruppi ($F=11,29$ $P<0,001$) come evidenziato nella tabella 5, i trattamenti hanno influenzato in modo significativo il contenuto zuccherino del succo. Il test di Tukey ha identificato differenze significative tra tutti i trattamenti, assegnando lettere diverse per ogni gruppo.

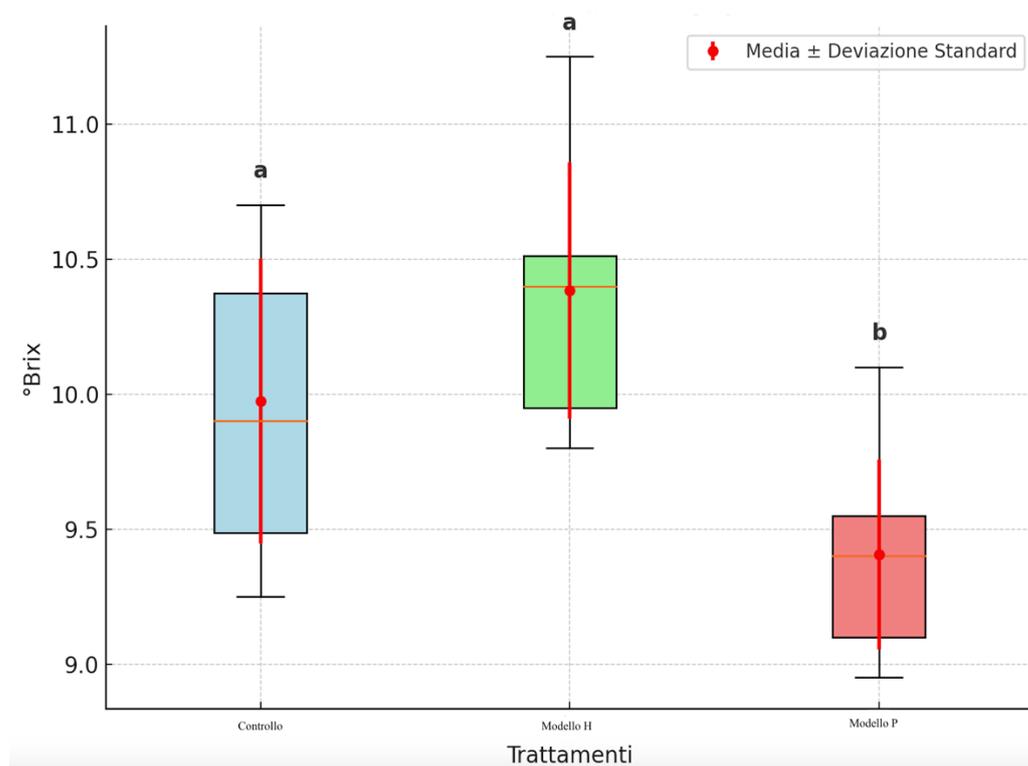


Figura 18: Rappresentazione grafica del confronto dei tre trattamenti sul contenuto di °Brix. Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test di Tukey ($p<0,05$)

Interpretazione: Il box plot (Figura 18) rappresenta i valori dei gradi Brix osservati nei tre trattamenti. Sono state evidenziate le differenze statisticamente significative con il test di Tukey, come indicato dalle lettere ("a", "a", "b") sopra i box. Le barre di errore rosse indicano la media \pm deviazione standard, fornendo un'idea della variabilità all'interno di ciascun trattamento.

Controllo e Modello H:

- Entrambi condividono la lettera "a", indicando che non ci sono differenze statisticamente significative tra questi due trattamenti ($p>0,05$).
- I valori medi sono simili, suggerendo un effetto analogo sulla concentrazione zuccherina.

Modello P:

- Ha la lettera "b", il che indica una differenza significativa rispetto agli altri due trattamenti ($p < 0,05$)
- Il valore medio è più basso, suggerendo che il modello P ha ridotto il contenuto zuccherino del succo rispetto agli altri due trattamenti.

Per quanto riguarda la variabilità è possibile osservare che il modello H ha mostrato una maggiore variabilità (barre di errore più lunghe), mentre il modello P presenta valori più concentrati attorno alla media.

Anche l'acidità ha mostrato differenze molto significative tra i gruppi ($F=28,53$ $P < 0,001$). Il test di Tukey evidenzia che i trattamenti sono tutti significativamente diversi tra loro.

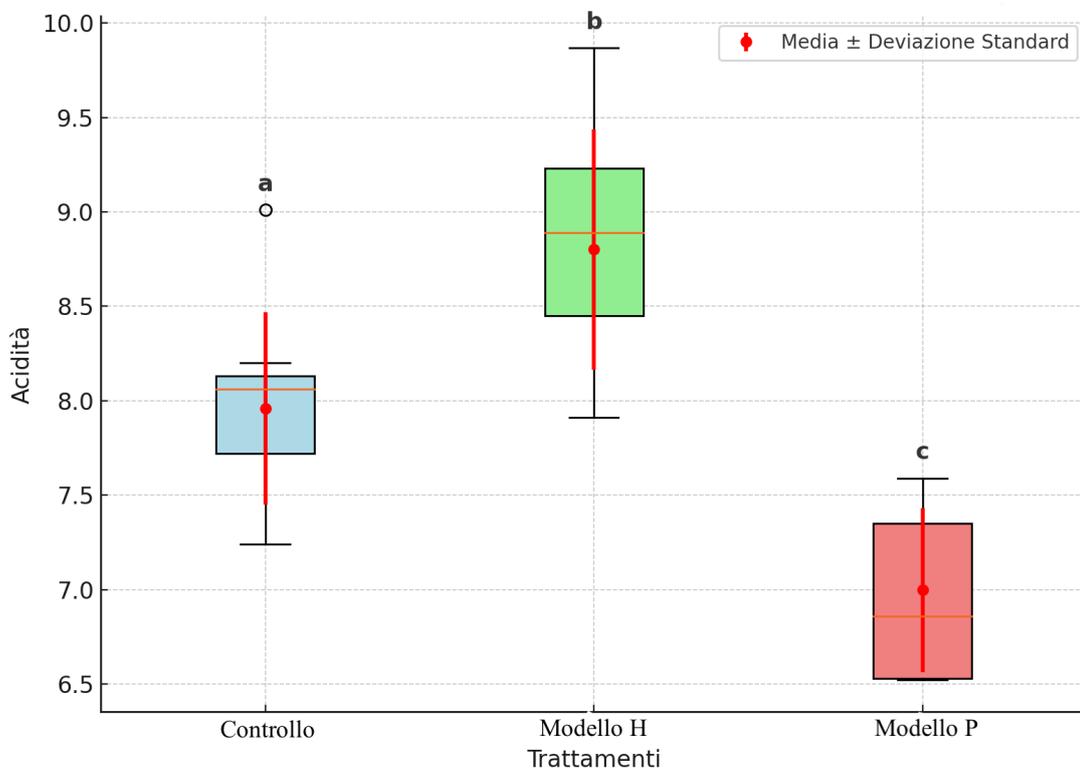


Figura 19: Rappresentazione grafica del confronto dei tra trattamenti sul contenuto di acidità gr/l. Lettere diverse indicano differenze significative secondo test di Tukey

La figura rappresenta i valori di acidità osservati nei tre trattamenti con l'indicazione delle differenze statisticamente significative mediante il test di Tukey.

Lettere del test di Tukey: Indicano le differenze significative tra i trattamenti:

- "a" per il Controllo
- "b" per il Modello H
- "c" per il Modello P

Controllo:

- Il trattamento di controllo (**a**) ha mostrato un valore medio di acidità più basso rispetto al Modello H, ma significativamente più alto rispetto al Modello P.
- I valori sono più concentrati (minore variabilità).

Modello H:

- Questo trattamento (**b**) ha evidenziato i valori medi più alti di acidità, indicando che il Modello H ha aumentato significativamente l'acidità rispetto agli altri due trattamenti.
- La variabilità è leggermente maggiore rispetto al Controllo.

Modello P:

- Il trattamento P (**c**) ha registrato i valori medi di acidità più bassi, significativamente inferiori rispetto sia al Controllo che al Modello H.
- Questo suggerisce che il Modello P può ridurre in modo marcato l'acidità del prodotto.

Inoltre, anche l'indice di maturità è risultato significativamente diverso tra i gruppi ($F=13,82$ $P<0,001$). Anche in questo caso, il test di Tukey ha mostrato differenze significative tra tutti i trattamenti.

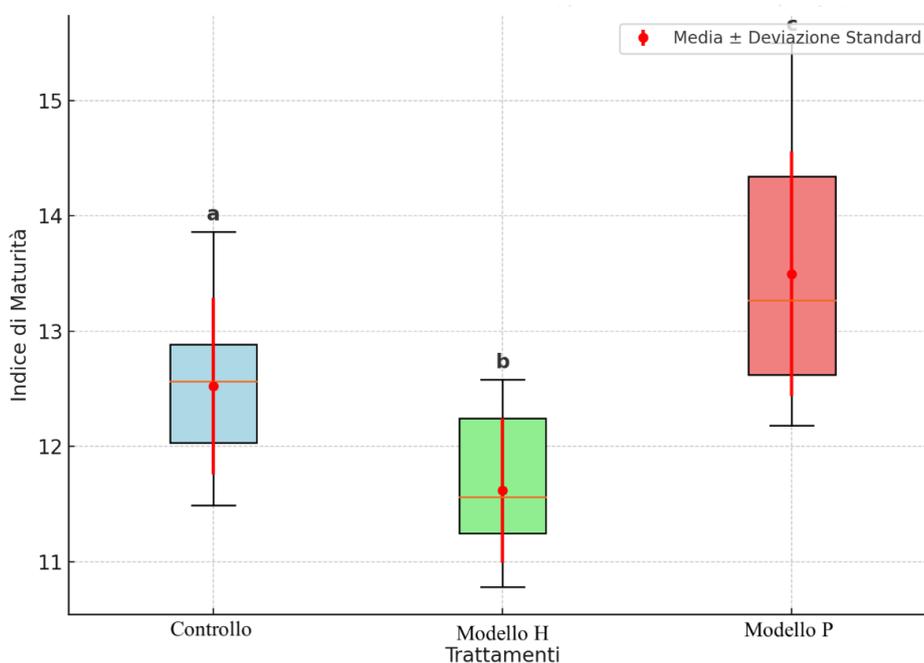


Figura 20: Rappresentazione grafica del confronto dei trattamenti sull'indice di Maturità. Lettere diverse indicano differenze significative secondo il test di Tukey ($p<0,05$)

La figura mostra i valori dell'indice di maturità osservati nei tre trattamenti con le differenze statisticamente significative evidenziate tramite il test di Tukey che distingue i trattamenti significativamente diversi:

- "a" per il Controllo.
- "b" per il Modello H.
- "c" per il Modello P.

Controllo:

- Ha un indice di maturità medio intermedio rispetto agli altri trattamenti.
- Mostra una variabilità maggiore rispetto al Modello H, con valori che si distribuiscono su un intervallo più ampio.

Modello H:

- Questo trattamento (**b**) ha i valori medi più bassi dell'indice di maturità.
- Indica un ritardo nella maturazione rispetto al Controllo e al Modello P, con una distribuzione più concentrata.

Modello P:

- Presenta i valori medi più alti dell'indice di maturità, significativamente superiori rispetto agli altri due trattamenti (**c**).
- Questo risultato suggerisce che il Modello P anticipa la maturazione rispetto agli altri trattamenti.

Capitolo 4

CONCLUSIONI

4.1 Ruolo dei fattori di correzione e gestione dell'irrigazione

Lo studio ha permesso di valutare l'efficacia di due modelli di irrigazione predittiva, Modello H e Modello P, confrontati con un trattamento di controllo convenzionale. I risultati ottenuti evidenziano l'importanza di una gestione mirata dell'irrigazione, integrando dati climatici e del suolo per ottimizzare i volumi d'acqua applicati e migliorare l'efficienza produttiva.

L'applicazione di algoritmi per il calcolo delle necessità irrigue, basati sull'utilizzo di sensori di umidità a basso costo e sui dati storici di ETo, si è dimostrata uno strumento promettente per la programmazione automatica dell'irrigazione. Tuttavia, il metodo di calcolo del fattore associato all'ETo basato sulla metodologia di Hargreaves-Samani ha portato a una sottostima delle necessità irrigue nell'algoritmo che utilizza le previsioni meteorologiche, a differenza di quello che si basa sui dati storici. Questa sottostima è risultata più marcata durante i mesi di maggiore esigenza idrica delle colture, provocando perdite produttive.

L'analisi dei fattori di correzione, $KETo$ (legato all'evapotraspirazione) e $K\theta$ (legato all'umidità del suolo), ha evidenziato differenze significative tra i modelli:

- Il Modello P ha mostrato una maggiore sensibilità al fattore $KETo$, influenzando in modo rilevante i picchi di irrigazione osservati in settimane critiche (ad esempio, settimana 15 e 27). Tuttavia, l'incidenza del $K\theta$ è risultata minore nelle fasi successive, suggerendo la necessità di un miglioramento nell'integrazione di questo parametro per evitare eccessi idrici o stress prolungati.
- Il Modello H, pur applicando volumi d'acqua inferiori, non è riuscito a compensare situazioni di stress idrico durante i periodi di maggiore richiesta, come evidenziato dal potenziale idrico più negativo e dai bassi livelli di umidità del suolo.

4.2 Effetti sulla produzione

L'impatto dei trattamenti sulla produzione ha mostrato differenze significative:

- Rendimento: Il controllo ha ottenuto il rendimento più alto, seguito dal Modello H, mentre il Modello P ha mostrato i valori più bassi. Questo risultato indica che, nonostante un uso più razionale dell'acqua, il Modello P necessita di ulteriori aggiustamenti per mantenere un livello produttivo competitivo.

- Qualità: I gradi Brix e l'indice di maturità sono stati influenzati positivamente dal Modello P, che ha mostrato valori significativamente più alti rispetto agli altri trattamenti, indicando un anticipo della maturazione. Tuttavia, l'acidità più bassa del Modello P potrebbe rappresentare un limite qualitativo in determinate condizioni di mercato.
- Efficienza idrica: In termini di rendimento per volume d'acqua (kg/m^3), il controllo si è dimostrato più efficiente rispetto al Modello P, nonostante l'applicazione di volumi superiori. Questo suggerisce che l'efficacia dei fattori di correzione nei modelli predittivi richiede ulteriori miglioramenti per ottimizzare l'efficienza complessiva.

4.3 Conclusioni finali

I risultati ottenuti evidenziano che:

1. L'uso di sensori di umidità e dati storici di ETo rappresenta un passo avanti verso una gestione irrigua più sostenibile. Tuttavia, la metodologia di Hargreaves-Samani ha mostrato limiti significativi nella stima delle necessità irrigue, specialmente durante i periodi di maggiore richiesta idrica. Si raccomanda, quindi, di proseguire gli studi valutando metodi alternativi, come Penman-Monteith (Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, 1998), che potrebbero fornire stime più accurate.
2. Ottimizzazione dei fattori di correzione:
 - È necessario migliorare l'integrazione dei parametri climatici e del suolo per un uso più bilanciato di K_{ET} e K_{θ} .
 - Sviluppare algoritmi che considerino meglio le fasi fenologiche e le esigenze specifiche delle piante.
3. Bilanciamento tra efficienza e resa:
 - È cruciale trovare un equilibrio tra la riduzione dei volumi irrigui e il mantenimento di una produzione competitiva, considerando anche i fattori economici.
4. Implicazioni per la qualità:
 - Approfondire l'effetto dei modelli sulla qualità dei frutti per ottimizzare parametri come zuccheri e acidità, in base alle richieste del mercato.

In conclusione, l'utilizzo di modelli predittivi rappresenta un passo importante per una gestione più sostenibile dell'irrigazione. Tuttavia, i risultati evidenziano la necessità di perfezionare questi strumenti, non solo per ottimizzare la resa e l'efficienza idrica, ma anche per garantire che le caratteristiche qualitative del prodotto finale siano in linea con le aspettative di mercato.

BIBLIOGRAFIA

- (IPCC), I. P. on C. C. (2014). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge University Press.*
- (IPCC), I. P. on C. C. (2019). *Cambiamenti climatici e territorio: Special Report.*
- (WMO), W. M. O. (2020). *State of Climate Services: Water.*
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998). Evapotraspirazione delle colture: linee guida per il calcolo delle esigenze colturali. *FAO.*
- Brown, H. E., Huth, N. I., Holzworth, D. P., Teixeira, E. I., Zurcher, E. J., Hargreaves, J. N. G., ... & Zheng, B. (2019). *A generic framework for improving process-based crop models.*
- Di T. Letterio, F. Cavazza, S. Gentile, G. Chiari, D. Solimando, S. A. (n.d.). Irrigazione: le tecnologie per un uso efficiente dell'acqua. *Terra e Vita.*
- Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO.*
- Doorenbos, J., Pruitt, W. O., Aboukhaled, A., & Nations, F. and A. O. of the U. (1975). *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements.* Food and Agriculture Organization of the United Nations.
<https://books.google.it/books?id=y7VBp4zm45AC>
- Ecosearch, E. (n.d.). *EnviroSCAN Probe.*
https://www.ecosearch.info/sites/default/files/prodotti_documentazione/EnviroSCAN_Brochure.pdf
- EEA, E. E. A. (2024). European Climate Risk Assessment. In *The European Climate Risk Assessment (EUCRA)*. <https://doi.org/10.2800/8671471>
- EUROSTAT. (2023). *Farm indicators by legal status of the holding, utilised agricultural area, type and economic size of the farm and NUTS 2 region.*
- Evans, R. G., & Sadler, E. J. (2008). Methods and technologies to improve efficiency of water use. *Water Resources Research.*
- FAO. (1985). *Irrigation Water Management: Training Manual No. 3 – Irrigation Water Needs.*
- FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). *The State of Food and Agriculture 2021: Making Agricultural Systems More Resilient to Climate Change.*
- Fischer, G., Shah, M., Tubiello, F. N., & van Velthuizen, H. (2012). *Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990–2080. Technological Forecasting and Social Change.*
- Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., et al. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature.*
- Fontana, L. (2024). La conservazione dell'acqua in agricoltura nei contesti aridi: strategie e sfide. *Tempo Italia.*
- Food and Agriculture Organization FAO. (2002). *Acqua per le Colture.*

- Gabriel, J., & States, P. (2020). *Handy tools for sustainable irrigation management in*. 88–89.
- Gao, W., & Zhang, X. (2018). *Precision irrigation and its impact on nitrogen and phosphorus runoff in agriculture*.
- Garcia-Tejero, L.F.; Duran-Zuazo, V.H.; Muriel-Fernandez, J. L. (2014). *Verso un'agricoltura irrigata sostenibile nel Mediterraneo: implicazioni per la conservazione dell'acqua in ambienti semi-aridi*.
- Godoy, D., Dewbre, J., PIN, Amegnaglo, C. J., Soglo, Y. Y., Akpa, A. F., Bickel, M., Sanyang, S., Ly, S., Kuiseu, J., Ama, S., Gautier, B. P., Officer, E. S., Officer, E. S., Eberlin, R., Officer, P., Branch, P. A., Oduro-ofori, E., Aboagye Anokye, P., ... Swanson, B. E. (2017). The future of food and agriculture: trends and challenges. In *The future of food and agriculture: trends and challenges* (Vol. 4, Issue 4).
www.fao.org/publications
<http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>
http://siteresources.worldbank.org/INTARD/825826-1111044795683/20424536/Ag_ed_Africa.pdf
www.fao.org/cfs
<http://www.jstor.org/stable/4356839>
<https://ediss.uni-goettingen.de/bitstream/han>
- Ingrao, C., Strippoli, R., Lagioia, G., & Huisingh, D. (2023). Water scarcity in agriculture: An overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. *Heliyon*, 9(8), e18507. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18507>
- Jaén, Ú. (2023). *A E R Y D X Congreso Nacional de Riegos X Congreso Nacional de Riegos*.
- Jones, H. G., & Rotenberg, E. (2019). Energy, radiation and temperature regulation in plants. *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*.
- Jones, H. G., & Tardieu, F. (1998). *Modelling water relations of horticultural crops: a review.* *Scientia Horticultura*.
- Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), 2427–2436.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erh213>
- Kovács, I., & Husti, I. (2018). The role of digitalization in the agricultural 4.0 – how to connect the industry 4.0 to agriculture? *Hungarian Agricultural Engineering*, 7410(33), 38–42. <https://doi.org/10.17676/hae.2018.33.38>
- Kramer, P. J., & Boyer, J. S. (1995). *Water Relations of Plants and Soils*.
- Montagna, A. (2021). *Irrigazione Veneta nella giornata mondiale dell'acqua*.
- Morison, J. I., Baker, N. R., Mullineaux, P. M., & Davies, W. J. (2008). *Improving water use in crop production. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*.
- Nazioni Unite. (2020). *ACQUA E CAMBIAMENTI CLIMATICI Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2020 World Water Assessment Programme United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization Sustainable Development Goals water and sanitat*.
https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372882_ita
- ONU. (2015). *Agenda 2030: Obiettivo 13 - Lotta contro il cambiamento climatico*.
- Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2012). Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Springer*.
- Perry, C., Steduto, P., Allen, R. G., & Burt, C. M. (2009). Increasing productivity in

- irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. *Elsevier*, 96(11).
- Rhoades, J.D., Kandiah, A., & Mashali, A. M. (1992). *The Use of Saline Waters for Crop Production*.
- Sadler, E. J., Evans, R. G., Stone, K. C., & Camp, C. R. (2005). Opportunities for conservation with precision irrigation. *Journal of Soil and Water Conservation*.
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Raes, D., & Fereres, E. (2009). *AquaCrop—The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles*.
- Trnka, M., Rotter, R. P., Ruiz-Ramos, M., et al. (2011). Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change*.
- UNESCO World Water Assessment Programme. (2020). *Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2020: acqua e cambiamenti climatici*.
- Villalobos, F. J., Testi, L., Moreno-Pérez, M. F., & Bonachela, S. (2016). *A soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) model for simulating tree transpiration with variable water stress and water distribution in the soil*.
- Zhang, T., Zou, Yufeng, Isaya Kisekka, A. B., & Cai, H. (2021). Comparison of different irrigation methods to synergistically improve maize's yield, water productivity and economic benefits in an arid irrigation area. *Elsevier*.