

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria e Scienze Informatiche

Prototipo d'irrigazione prescrittiva

Tesi di laurea in:
SUPERVISOR'S COURSE NAME

Relatore

Prof. Supervisor Here

Candidato

Davide Speciali

Correlatori

Dott. CoSupervisor 1

Dott. CoSupervisor 2

Abstract

TODO

Optional. Max a few lines.

Indice

Abstract	iii
Introduzione	1
1 Agricoltura di precisione	3
1.1 Introduzione generale all'agricoltura di precisione	4
1.1.1 Agricoltura e cambiamento climatico	4
1.1.2 Parametri di coltivazione	5
1.1.3 Agricoltura di precisione	7
1.2 Componenti chiave dell'agricoltura di precisione	9
1.2.1 Acquisizione dati	9
1.2.2 Simulazione del terreno	12
1.2.3 Software in supporto alle decisioni	13
1.3 Irrigazione di precisione	14
1.3.1 Approcci di misurazione	14
1.3.2 Approcci all'irrigazione di precisione	15
2 Tecnologie utilizzate	17
2.1 Hardware	17
2.2 Software	18
3 Un prototipo di irrigazione prescrittivo	23
4 Conclusioni e sviluppi futuri	25
	27
Bibliografia	27

Introduzione

Structure of the Thesis

Davide Speziali: At the end, describe the structure of the paper

Capitolo 1

Agricoltura di precisione

La risposta al cambiamento climatico è uno dei temi più importanti per il futuro delle popolazioni del pianeta. Nel 2015 le United Nations (UN) hanno adottato "l'agenda per lo sviluppo sostenibile 2030", con l'obiettivo di rispondere in maniera sistematica al problema del cambiamento climatico. Vengono specificate 16 Sustainable Development Goals (SDG): obiettivi specifici che ogni nazione deve raggiungere. Tra essi SDG 6 "Acqua pulita e sanificazione", si concentra sul garantire un accesso sicuro e sostenibile alle risorse idriche [1]. Il punto 6.4 in particolare punta a un miglioramento dell'efficienza dell'uso di acqua in tutti i settori [2, 3]. Il settore agricolo è il più importante per rendere possibile questa transizione: la quantità di acqua usata per l'agricoltura quasi raddoppiata dal 1970 e oggi l'agricoltura rimane l'area dove l'utilizzo di acqua è il maggiore, circa tre volte rispetto quello delle altre industrie. [4] È dunque aumentato l'interesse per lo sviluppo di tecnologie di monitoraggio dei terreni coltivati e lo sviluppo di modelli per l'irrigazione efficiente e automatica.

Davide Speziali: Rifare qua la parte commentata

1.1 Introduzione generale all'agricoltura di precisione

1.1.1 Agricoltura e cambiamento climatico

L'agricoltura è una delle attività più importanti per l'essere umano, ha subito negli anni enormi trasformazioni e l'era moderna non fa differenza [5]. Oggi è infatti interessata da continui progressi tecnologici e cambiamenti sociali, economici e ambientali. Anche grazie a innovazioni tecnologiche, la produzione è in stabile aumento, permettendo a tutte le popolazioni del mondo di accedere a una maggiore varietà di prodotti [6].

La ricerca di metodi più sostenibili per la gestione del settore agricolo è diventato un obiettivo primario per affrontare nuove sfide a livello mondiale [7]. In primis il costante aumento della popolazione, che si stima raggiungerà i 10 miliardi di persone verso gli anni 2080 [8], porterà un aumento della richiesta di prodotti agricoli e quindi la necessità di un aumento dell'offerta. Inoltre, diventa sempre più necessario agire in tema d'impatto che il settore ha sull'ambiente, come deforestazione, uso eccessivo di risorse idriche e fertilizzanti inquinanti [9]. Questi sono tutti elementi che hanno effetto sull'aumento delle temperature, che a loro volta aumentano la probabilità di eventi meteorologici estremi che possono rovinare o totalmente distruggere i raccolti: in Cina cambiamento climatico potrebbe far diminuire le rese di riso, grano e mais rispettivamente del 36,25%, 18,26% e 45,10% entro la fine di questo secolo [10]; in Italia sono studiati gli effetti di eventi di siccità sul territorio.

L'agricoltura, basandosi su conoscenze maturate nel corso di millenni, è particolarmente fragile al rapido cambiamento delle variabili climatiche[11]: diventa quindi necessario riuscire a parametrizzare l'ambiente di coltivazione, capire quali parametri sono realmente importanti per le culture e studiare come possono essere monitorate, in modo che gli agricoltori abbiano gli strumenti per fronteggiare questa fragilità[12].

1.1.2 Parametri di coltivazione

Vengono definite proprietà idrauliche del suolo una serie di parametri che permettono di definire il rapporto tra suolo e acqua. Questi parametri possono essere tantissimi e dipendono dal contesto che si vuole analizzare. In generale, possiamo vedere il suolo come la riserva idrica della pianta, l'obiettivo dell'irrigazione deve essere, quindi, quello di somministrare la giusta quantità di acqua, evitando quindi di avere un terreno troppo bagnato o troppo asciutto.

La quantità di acqua presente all'interno del terreno viene rappresentata dal Soil Water Content (SWC), tipicamente misurato in percentuale di volume di acqua rispetto al volume del suolo. In FIGURA possiamo vedere una serie di valori "soglia" che SWC può raggiungere. Il termine *saturation* indica uno stato in cui all'interno del terreno non è più presente l'aria, e ogni poro è quindi pieno di acqua. Tipicamente, fatta eccezione per certi tipi di culture, come quella del riso, questo stato non è adatto alla crescita della pianta. Lo stato *oven dry*, al contrario, avviene in totale assenza di acqua, non è quindi adatto alla crescita di nessun tipo di pianta. Viene definito Field Capacity (FC) il valore di SWC massimo che permette alla pianta di assorbire l'acqua dal terreno. In questo stato i pori più grandi hanno al loro interno sia aria che acqua, mentre quelli più piccoli sono pieni di acqua. Infine, Permanent Wilting Point (PWP) è invece il punto dopo il quale la pianta non riesce più a estrarre acqua dal terreno, per quanto sia ancora in minima parte presente[13]. Questi valori ci permettono di definire quale potrebbe essere l'irrigazione adatta, si vuole infatti che SWC sia compreso tra FC e PWP.

Un ulteriore parametro idraulico del suolo è Soil Water Potential (SWP), potenziale idrico del suolo, rappresenta l'energia necessaria per estrarre l'acqua dal suolo e indica quindi la disponibilità di acqua delle piante. Viene espresso in termini di pressione e comprende diverse componenti che contribuiscono al valore finale[14]. Le principali sono:

- **Potenziale gravitazionale:** deriva dalla forza di gravità e rappresenta l'energia potenziale dovuta alla sua posizione verticale[14].
- **Potenziale matriciale:** rappresenta l'energia necessaria per estrarre l'acqua dal suolo, risultante dalle forze d'interazione tra l'acqua e le particelle

del suolo. È dovuto a forze come adesione e capillarità[14].

- **Potenziale osmotico:** rappresenta l'energia associata alla concentrazione di soluti e alla tendenza dell'acqua a muoversi da aree con alto potenziale osmotico (bassa concentrazione di soluti) ad aree con basso potenziale osmotico (alta concentrazione di soluti), come le radici delle piante[14].

La relazione tra SWP e SWC è definita dal concetto di Soil Water Retention Curve (SWRC), curva di ritenzione idrica del suolo: la quantità di acqua trattenuta nel suolo a diversi livelli di pressione[15].

Tutte questi parametri dipendono da una serie di fattori, come:

- **Proprietà fisiche del terreno**, caratteristiche come la tessitura (distribuzione delle dimensioni delle particelle del suolo) e la struttura (raggruppamento in composti porosi delle particelle del suolo) hanno peso nella definizione di SWP, e quindi chiaramente anche di SWRC[16]. In FIGURA si possono vedere delle classificazioni comuni per i tipi di terreni in base alla tessitura, mentre in FIGURA in base alla struttura. In FIGURA sono presenti esempi di SWRC per diversi tipi di terreno.
- **Coltura**, L'apparato radicale di una pianta ha effetto sul SWP e quindi sulla SWRC[17].

È inoltre importante notare che sia l'apparato radicale che le proprietà fisiche del suolo non sono costanti all'interno dello stesso campo. A causa della quantità di variabili che possono modificare sostanzialmente la SWRC, è molto difficile sapere di per certo la quantità d'irrigazione richiesta all'interno dell'intero campo senza monitorare attivamente l'andamento dell'acqua al suo interno.

Un ulteriore fattore da tenere in considerazione riguarda le variabili atmosferiche: di natura non modificabili, richiedono un monitoraggio continuo e preciso. Viene definita *evapotraspirazione* il processo combinato attraverso il quale l'acqua viene trasferita nell'atmosfera, partendo da superfici d'acqua, dal ghiaccio, dal suolo e dalla vegetazione[18]. Si tratta della combinazione tra *evaporazione* e *traspirazione*: la prima prevede il passaggio diretto dell'acqua nell'atmosfera e avviene per fattori come calore, umidità e velocità del vento; la seconda invece prevede il passaggio attraverso una pianta partendo dalle radici, fino a raggiungere le

foglie, da dove avviene il passaggio all'atmosfera. Le stazioni meteorologiche[19] sono in grado di monitorare, in un dato momento, il potential evapotranspiration (ET_0) che rappresenta il valore di evapotraspirazione in un dato momento di un ipotetica cultura di prato erboso in condizioni ottimali dove l'unico fattore limitante è dato dal clima. È possibile moltiplicare il dato ET_0 per un crop coefficient (K_c) che dipende dal tipo e dallo stato di crescita di una determinata cultura, per ottenere actual evapotranspiration (ET_a): reale evapotraspirazione. Questo permette quindi di approssimare la quantità di acqua usata da una pianta e che quindi deve essere somministrata tramite irrigazione, a patto che sia presente in letteratura una stima adeguata di K_c , che non è però sempre disponibile. Inoltre, ET_0 viene calcolato su un'aria potenzialmente molto estesa e potrebbe quindi non essere adeguato per zone con zone ombreggiate o venti locali. A ogni modo, il calcolo di ET_a non tiene in considerazione le condizioni fisiche del suolo e dell'apparato radicale delle piante, per questo motivo il suo utilizzo esclusivo per decisioni riguardo l'irrigazione non è adeguato.

1.1.3 Agricoltura di precisione

Vista la mole di variabili, diventa interessante utilizzare sistemi di monitoraggio e analisi col fine di consigliare gli agricoltori a come correttamente gestire i campi. Per questo nasce l'agricoltura di precisione (*precision agriculture*): consiste nell'uso di tecnologie avanzate per aumentare l'efficienza, la produzione e la qualità dei prodotti[20]. Primi esempi di agricoltura di precisione, nel modo in cui viene intesa a oggi, risalgono già agli anni '80, dove lo sviluppo di modelli di crescita delle culture e l'utilizzo di Global Positioning System (GPS) ha permesso di mappare i campi e monitorare variabili spaziali come fertilità del suolo ed esigenze idriche[21]. Negli anni '90, l'introduzione di sensori per il monitoraggio delle variabili ha permesso agli agricoltori di adattare le loro pratiche in base alle esigenze specifiche di ciascuna area del campo[21]. Oggi l'arrivo di nuove tecnologie come Cloud Computing, Internet of Thing (IoT) e intelligenza artificiale ha portato un aumento sostanziale delle ricerche nel campo[22]. Gli obiettivi principali che si pone sono i seguenti:

- **Aumentare l'efficienza produttiva:** usando le risorse in modo più mirato si è in grado di ridurre gli sprechi.
- **Migliorare qualità e resa delle culture:** grazie al monitoraggio continuo è possibile rilevare rapidamente problemi (come malattie, carenze nutrizionali o idriche) potendo così intervenire tempestivamente.
- **Ridurre l'impatto ambientale:** ottimizzando l'utilizzo di risorse è possibile diminuire l'uso di acqua e di fertilizzanti, riducendo quindi l'impatto ambientale.
- **Supportare la sostenibilità economica:** l'input minore richiesto dagli agricoltori, insieme con l'uso inferiore delle risorse, ha anche un effetto positivo dal punto di vista economico. Oltre a rendere la cultura più resiliente a variazioni climatiche.

L'agricoltura di precisione si propone di agire in diverse aree dell'agricoltura, in base al contesto operativo, si può fare una divisioni nelle seguenti classi:

- **Site-Specific Land Management (SSLM):** un approccio all'agricoltura e alla gestione del territorio che adatta le decisioni e le pratiche alle caratteristiche uniche di specifiche aree all'interno di una fattoria o di un paesaggio. Invece di applicare tecniche uniformi su un intero campo o regione, la gestione sito-specifica utilizza informazioni dettagliate su suolo, clima, topografia e altri fattori ambientali per ottimizzare l'uso del terreno in ogni area. Si focalizza sull'ottimizzazione dell'uso del terreno [23].
- **Site-Specific Nutrient Management (SSNM):** si concentra sulla gestione mirata dei nutrienti necessari per le colture, come azoto, fosforo e potassio, adattandone l'applicazione alle condizioni specifiche di ogni parte del campo. L'obiettivo è migliorare l'efficienza d'uso dei fertilizzanti, riducendo gli sprechi e massimizzando la resa agricola, evitando allo stesso tempo danni ambientali legati all'eccesso di nutrienti [24].
- **Precision Irrigation:** un sistema che ottimizza l'irrigazione fornendo la giusta quantità d'acqua in base alle necessità specifiche di ogni area del campo. Utilizzando dati su umidità del suolo, clima e tipologia di coltura, l'irrigazione di precisione permette di ridurre il consumo idrico e migliorare

l'efficienza idrica, garantendo che le colture ricevano esattamente l'acqua necessaria per crescere in modo ottimale [25].

- **Site-Specific Weed Management (SSWM)**: un approccio che mira a gestire le infestanti in modo sito-specifico, applicando erbicidi o metodi di controllo solo nelle aree del campo dove le infestanti sono presenti o rappresentano una minaccia. Questo metodo riduce l'uso di prodotti chimici, minimizza l'impatto sull'ambiente e migliora l'efficacia delle pratiche di gestione delle infestanti [26].
- **Site Specific Crop Protection (SSCP)**: si riferisce alla gestione delle malattie delle colture in modo sito-specifico, basandosi su dati raccolti riguardo alla distribuzione e gravità delle malattie in diverse parti del campo. Attraverso il monitoraggio e la diagnosi precoce, consente di applicare trattamenti solo nelle aree affette, riducendo l'uso di pesticidi e migliorando la salute complessiva del raccolto [27].

1.2 Componenti chiave dell'agricoltura di precisione

Le tecnologie chiave dell'agricoltura di precisione sono tantissime, questa tesi non ha l'obiettivo di fornire una lista esaustiva e completa a riguardo, quanto più dare un'infarinata generale concentrandosi principalmente sulle tecnologie interessanti per l'irrigazione di precisione.

1.2.1 Acquisizione dati

La raccolta dei dati è il fulcro dell'agricoltura di precisione: permettono di avere un'immagine reale delle condizioni dei campi, sia per quanto riguarda il suolo che a livello atmosferico.

Remote Sensing

Il Remote Sensing (*telerilevamento*) è il processo di rilevamento e monitoraggio delle caratteristiche fisiche di un'area, misurando la radiazione riflessa ed emessa

a distanza, tipicamente tramite satelliti o velivoli[28]. L'analisi d'immagini ottiche e radar ad alta risoluzione, disponibili gratuitamente, viene utilizzata per monitorare i cambiamenti stagionali, la fenologia della vegetazione e le caratteristiche specifiche del territorio. In ambito agricolo, il Remote Sensing è particolarmente utile per rilevare dati sulle coltivazioni, come lo stato di salute delle piante e l'umidità del suolo [29]. Integrando tecnologie come GPS e Geographical Information System (GIS), il Remote Sensing consente di localizzare con precisione le aree problematiche e sovrapporre questi dati a mappe che analizzano suolo, clima e colture per ottimizzare la gestione agricola. Il GPS, sistema di posizionamento globale, è un sistema di navigazione satellitare che fornisce informazioni sulla posizione, la velocità e l'orario in tempo reale in qualsiasi parte del mondo [30]. Il GIS, sistema d'informazioni geografico, un sistema informativo che consente la raccolta, l'organizzazione, l'analisi e la visualizzazione di dati geografici. Utilizzando un GIS, è possibile creare mappe dettagliate che incorporano dati geo spaziali su vari aspetti di un territorio, come l'uso del suolo, la topografia, la distribuzione di risorse e le infrastrutture. Consente di sovrapporre diversi strati di dati e di analizzare le relazioni spaziali tra di essi attraverso mappe interattive. Il GIS può gestire grandi volumi di dati geografici, facilitando il monitoraggio e la pianificazione del territorio [31].

Sensori on-site

Un ambito di ricerca molto attivo riguarda lo sviluppo di sensori in grado di monitorare le variabili delle coltivazioni, tenendo conto delle limitazioni legate all'uso in contesti agricoli: i campi estesi possono avere un accesso limitato a internet, e il consumo energetico deve essere ridotto a causa della scarsa disponibilità della rete elettrica, rendendo necessario l'uso di batterie, la cui durata deve essere massimizzata[32]. Sono spesso utilizzate tecnologie di comunicazione wireless a lungo raggio, in particolare opzioni LPWA (Low-Power Wide-Area) come LoRa, NB-IoT e Sigfox, che sono emerse come alternative alle reti cellulari tradizionali (2G/3G/4G/5G)[33]. Le tecnologie LPWA sono caratterizzate da basso consumo energetico, bassa velocità di trasmissione dati, ampia copertura e supporto per connessioni massive. Le tecnologie LPWA eccellono nel collegare dispositivi

che richiedono una trasmissione minima di dati su lunghe distanze con una lunga durata della batteria[34].

Aspetto fondamentale riguarda i sensori del suolo: sono in grado di misurare proprietà essenziali del suolo come il contenuto di umidità, i livelli di nutrienti, la temperatura e il PH. Sono disponibili in varie forme e monitorano costantemente le condizioni del suolo per orientare con precisione le pratiche d'irrigazione e fertilizzazione, evitando l'uso eccessivo di risorse e garantendo una disponibilità ottimale di nutrienti per le colture [35].

Sono inoltre disponibili sensori di qualità dell'acqua, responsabili del monitoraggio di vari aspetti dell'acqua d'irrigazione, tra cui salinità, livelli di ossigeno disciolto e torbidità. Questi sensori svolgono un ruolo essenziale nel preservare l'idoneità dell'acqua d'irrigazione per la coltivazione e nel proteggere dal deterioramento del suolo causato da un eccesso di sali o contaminanti [36]. L'applicazione di sensori nell'agricoltura di precisione può essere una componente fondamentale dei sistemi d'irrigazione automatizzati, in grado di risolvere i problemi d'irrigazione scarsa o eccessiva, ottimizzando così l'utilizzo delle risorse.

Alcuni sensori sofisticati sono in grado d'identificare l'esistenza di parassiti e malattie nelle colture. Utilizzano metodi come il riconoscimento delle immagini, la spettroscopia o altre tecniche per individuare la presenza di agenti patogeni o parassiti, consentendo un'azione rapida per mitigare i danni potenziali[37].

Un componente fondamentale per l'acquisizione di dati in agricoltura di precisione è rappresentato dall'introduzione sul mercato di piattaforme hardware dotate di micro-controllori, come Arduino, ESP32 e altre soluzioni simili. Questi dispositivi sono in grado di ricevere i valori rilevati dai sensori distribuiti nei campi e di elaborare i dati raccolti, facilitando la gestione delle informazioni. Il tutto mantenendo al massimo la semplicità di programmazione, l'utilizzo di risorse e il costo del sistema. Possono essere programmati anche per attivare automaticamente sistemi d'irrigazione o allertare gli agricoltori su condizioni che richiedono interventi specifici[38, 39].

Rilevazioni in laboratorio

Le tecniche di misurazione in laboratorio possono essere utili per la raccolta di dati iniziali accurati e affidabili sulle caratteristiche del suolo. Tra le tecniche più comuni troviamo:

- **Determinazione della Densità Apparente del Suolo:** prevede il prelievo di campioni di suolo mediante una trivella cilindrica, seguita dalla pesatura del campione umido e dall'essiccazione a 105°C per calcolare la densità apparente[40].
- **Analisi della Granulometria:** consente di determinare la distribuzione delle dimensioni delle particelle del suolo, utilizzando metodi come la setacciatura e la sedimentazione. I risultati forniscono informazioni sulla capacità di ritenzione idrica e sull'aerazione del suolo[41].
- **Determinazione del pH del Suolo:** il pH è un parametro cruciale che influisce sulla disponibilità dei nutrienti. La misurazione può essere effettuata in laboratorio mediante l'uso di un pH-metro su un campione di suolo mescolato con acqua distillata[42].
- **Analisi della Materia Organica:** la quantità di materia organica nel suolo è essenziale per la fertilità. Le tecniche di analisi includono l'uso di metodi chimici, come la combustione, per determinare il contenuto di carbonio organico[43].
- **Test di Capacità di Ritenzione Idrica:** misura la quantità di acqua che un campione di suolo può trattenere dopo la saturazione. È fondamentale per comprendere la gestione dell'irrigazione e la sostenibilità delle colture[44].

In generale sono misurazioni che richiedono tempo, per questo motivo vengono effettuati saltuariamente.

1.2.2 Simulazione del terreno

I Crop Simulation Model (CSM), modelli di simulazione delle colture, sono strumenti che simulano la crescita delle colture utilizzando equazioni biofisiche[45]. Esiste un'ampia varietà di modelli di CSM, ciascuno progettato per casi d'uso specifici e quindi con i propri punti di forza e di debolezza. Possono essere utilizzati

per applicazioni di ricerca, per l'analisi di scenari o per la gestione delle colture. I modelli meccanici complessi sono utilizzati nella ricerca, come strumento per aggregare le conoscenze o per integrare le costose sperimentazioni sul campo. Un'altra applicazione dei modelli è quella di dimostrare, agli agricoltori o ai responsabili politici, l'impatto delle pratiche di gestione su una coltura o sull'ambiente[46].

Esistono due approcci diversi, ma non esclusivi, alla modellazione delle colture: il primo si concentra su parti sezionate delle piante; il secondo integra modelli per diversi tratti fisiologici per simulare la crescita dell'intera pianta.

I parametri dei modelli sono di solito determinati mediante la regolazione iterativa dei parametri e il confronto con i dati osservati dalle prove sul campo; tuttavia, i parametri stimati in questo modo sono imprecisi a causa degli errori sperimentali intrinseci associati all'osservazione sul campo. È possibile separare i parametri del modello in fattori genetici per creare modelli specifici per ogni coltura: questo approccio presenta diversi vantaggi rispetto ai metodi convenzionali che studiano un singolo tratto senza considerare l'impatto dell'ambiente[47].

1.2.3 Software in supporto alle decisioni

Un Decision Support System (DSS), sistema di supporto alle decisioni, è un sistema informativo in grado di supportare le attività decisionali fornendo raccomandazioni. Un DSS efficace è un pacchetto software interattivo in grado di assistere agricoltori, consulenti o amministratori nel prendere decisioni che richiedono la sintesi di numerosi e diversi dati. In genere, i DSS incorporano uno o più modelli di simulazione che consentono di preparare raccomandazioni che tengono conto di fattori specifici della coltura e del sito, come il clima, le date di semina, i tipi di terreno, le caratteristiche del sistema d'irrigazione, ecc. I DSS sono generalmente pacchetti software che includono uno o più modelli di simulazione e strumenti di comunicazione per gestire gli input e gli output. Tra i sistemi per l'acquisizione dei dati, possono esserci collegamenti con servizi web specifici (ad esempio immagini satellitari, dati climatici in tempo reale, ecc.) e sensori che forniscono dati in tempo reale. I DSS basati su modelli con sensori o strumenti consentono agli utenti di verificare le previsioni del modello e di perfezionare le raccomandazioni[48].

1.3 Irrigazione di precisione

Questo documento ha interesse a mostrare un esempio di sistema d'irrigazione automatico su piccola scala, ricade quindi nella branca del precision irrigation che già abbiamo definito in sezione 1.1.3.

1.3.1 Approcci di misurazione

Tra i sensori descritti in sezione 1.2, quelli che vengono utilizzati in questo contesto sono sia i sensori on-site che remoti. I primi sono tipicamente posizionati sotto il terreno in modo da monitorare l'umidità del suolo, offrendo misurazioni precise. I secondi invece vengono utilizzati per raccogliere valori a livello globale e sono di natura meno precisi. In

Davide Speziali: cita studio

viene presentato un sistema che fa utilizzo di entrambe le tipologie di sensori, ma tipicamente è un approccio non utilizzato a causa dell'elevato costo.

I sensori on-site possono essere classificati in base alla quantità di sensori per pianta. L'installazione a sensore singolo, la più economica, non può monitorare l'umidità a diverse profondità. I sistemi multi-sensore sono in grado di creare griglie multi-dimensionali. La disposizione più utilizzata è quella di griglie monodimensionali, dove i sensori sono allineati verticalmente a diverse profondità. Le griglie bidimensionali e tridimensionali, poco utilizzate a causa del prezzo, permettono di monitorare lungo più assi oltre che la profondità. Quelle bidimensionali prevedono l'installazione di più sensori per ogni strato, formando una matrice che descrive un'intera fetta di terreno, mentre quelle tridimensionali possono essere viste come la visualizzazione di più fette di terreno.

Le installazioni di sensori prossimali possono essere classificate in installazioni a sensore singolo e multi-sensore. Come suggerisce il nome, l'installazione a sensore singolo (0D) fornisce una misurazione puntuale dell'umidità del suolo. Sebbene questa installazione (Arif et al., 2013) sia economica, non può monitorare l'umidità del suolo a diverse profondità. A tal fine, vengono ideate installazioni multi-sensore (ad esempio, i sensori a terra prossimali sono organizzati in modo da formare una

griglia). In base alla disposizione, si distinguono: griglie monodimensionali (1D), bidimensionali (2D) e tridimensionali (3D).

1.3.2 Approcci all'irrigazione di precisione

L'approccio più semplice risiede in sistemi basati su una soglia, dove l'irrigazione viene fornita quando la misura dell'umidità del terreno è al di sotto di un determinato valore. Questo genere di approcci soffre dell'inabilità nel determinare la corretta quantità di acqua necessaria al terreno, rendendoli adatti solo in ambienti controllati con poche variabili.

Un altro approccio può essere trovato nell'utilizzo di controllori, progettati per gestire ambienti dinamici. Il loro utilizzo in campo aperto è scoraggiato dalla quantità di variabili incontrollabili. Un esempio particolarmente importante riguarda l'utilizzo di controllori di tipo proporzionale-integrale-derivativo (PID), soluzione già ampiamente diffusa in altri ambiti.

Esistono approcci basati sull'apprendimento autonomo, sfruttando la diffusione dei dispositivi IoT per raccogliere grandi quantità di dati attraverso i quali addestrare modelli di machine learning: dalla classificazione, alla regressione, fino a sistemi più complessi che coinvolgono le reti neurali e il deep reinforcement learning. Il problema principale in questo genere di approcci si trova nel rischio di over-fitting del modello: dati non sufficientemente eterogenei portano i modelli a essere addestrati per gestire culture specifiche, in uno stato di vita specifico, in specifiche condizioni del suolo e atmosferiche. La raccolta di dati di alta qualità è quindi un processo costoso e lungo nel tempo, soprattutto considerando che la raccolta dei dati è possibile solo durante le stagioni d'irrigazione.

Questo documento tiene in considerazione un sistema senza un suolo o cultura reale, per questo motivi approcci ad apprendimento autonomo non era ottimale.

Capitolo 2

Tecnologie utilizzate

2.1 Hardware

- **Sensori**, TODO numero sensore e citazione alle specifiche
- **Arduino UNO R3** è una scheda microcontrollore basata sull'ATmega328P. Permette di caricare i programmi scritti in linguaggio C++ usando un'architettura SuperLoop, dove un unico pezzo di codice viene ripetuto fin tanto che il dispositivo è riceve alimentazione. Il superloop è interrompibile momentaneamente solo tramite degli interrupt di sistema, che vengono gestiti con routine non interrompibili, ciò implica che durante una routine, non possono avvenire altri interrupt. È quindi consigliabile che le routine di gestione siano particolarmente brevi, sia per evitare perdita di eventi, sia perchè molte librerie di sistema sfruttano internamente gli interrupt, per esempio `delay` (equivalmente a `sleep` di python). Offre l'utilizzo di un totale di 22 pin General Purpose Input/Output (GPIO): 16 dei quali digitali, di cui 6 utilizzabili come output analogici tramite pulse-width modulation (PWM), e altri 6 pin input analogico. Può inoltre gestire una comunicazione seriale tramite USB con la quale è possibile comunicare con altri dispositivi.
- **Raspberry Pi 4 model B** è un Single Board Computer (SBC) in grado di utilizzare sistemi operativi veri e propri basati sul kernel Linux o su RISC OS. Presenta un processore quad-core ARM a 64bit ad una velocità di clock di 1.80GHz. La configurazione utilizzata presenta

Davide Speziali: QUANTITARAM

Gb di RAM LPDDR4-3200. Compatibile con Bluetooth 5.0, BLE, connessioni wireless IEEE 802.11ac a 2.4 GHz e 5.0 GHz, oltre che Gigabit Ethernet. Permette anche l'utilizzo di 40 pin GPIO digitali. Compatibile con periferiche USB tramite 2 porte USB2.0 e 2 porte USB3.0. L'uscita video è permessa da tramite 2 porte Micro-HDMI, che supportano dual-screen 4k. Come storage viene utilizzata una singola scheda microSD. Include un'interfaccia MIPI DSI per display e MIPI CSI per telecamere, ed è alimentato tramite un connettore USB-C da 5V/3A. Prodotto dalla Raspberry Pi Foundation, che ha realizzato diversi modelli per varie esigenze, è compatibile con vari sistemi operativi, tra cui il più noto è Raspberry Pi OS (precedentemente chiamato Raspbian), una versione di Debian sviluppata dalla stessa fondazione.

2.2 Software

- **JavaScript (JS)** è un linguaggio di programmazione interpretato, usato principalmente per la programmazione web sia a livello client che server, per esempio con l'utilizzo di Node.js. È un linguaggio dinamico, basato sui prototipi, multi-paradigma, single-threaded, che supporta stili di programmazione orientati agli oggetti, imperativi e dichiarativi. Standardizzato come ECMAScript, JS è alla base di un vasto ecosistema di librerie e framework che ne ampliano le capacità e l'applicabilità in diversi contesti.
 - **Chart.js** è una libreria JS semplice e flessibile per la generazione di grafici lato frontend. Si tratta di un progetto Open Source che sfrutta i canvas di HTML5. Di default permette l'utilizzo di 8 diversi tipi di grafici, è compatibile con plug-in che permettono l'aggiunta di nuove funzionalità.
 - * **chartjs-chart-matrix** è un plug-in che permette la creazione di grafici a matrice, un esempio è in fig. 2.1
 - * **chartjs-plugin-streaming** è un plug-in che permette la creazione di grafici con valori in tempo reale. Prevede lo scorrimento verso sinistra del grafico in base al tempo. È possibile configurarlo per

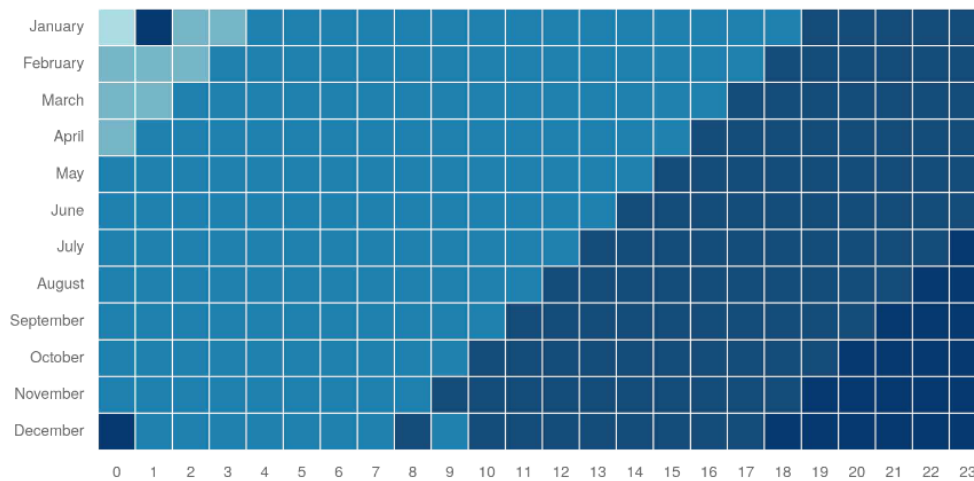


Figura 2.1: Esempio di una mappa delle temperature medie giornaliere per mese, l'intensità del colore è proporzionale alla temperatura.

modificare la granularità, la frequenza di aggiornamento ed un eventuale delay in modo da avere una visualizzazione "fluida" dei nuovi dati. Necessita di un adapter per una libreria per la gestione delle date e ricezione del tempo attuale, come Luxon.

- * **chartjs-plugin-datalabels** è un plug-in per la visualizzazione dei dati su un grafico, un esempio su un grafico a linea è visibile in fig. 2.2
- * **chartjs-adapter-luxon** è un plug-in che si occupa di fornire a chartjs-plugin-streaming le informazioni sulle date da Luxon.
- **Luxon** è un wrapper di date e tempi per JS. Utilizza un'API per gestire le date, che consente il supporto agli intervalli, alle durate (14 days, 5 minutes, 33 seconds), la loro conversione e parsing. Offre la localizzazione delle stringhe con una gestione interna delle time-zones.
- **bootstrap** è un toolkit frontend potente ed estendibile. Permette la creazione di interfacce web utilizzando unicamente classi HTML, senza la necessità di scrivere il proprio foglio di stile CSS.
- **jQuery** è una famosa libreria per la manipolazione e navigazione di documenti HTML, la gestione degli eventi, le animazioni e richieste HTTP.

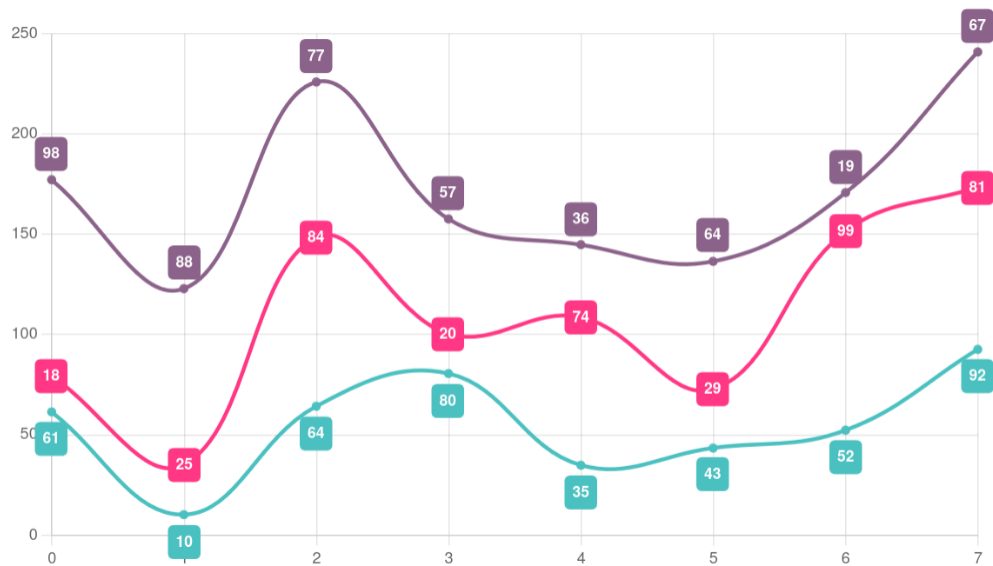


Figura 2.2: Esempio utilizzo di datalabels dove in ogni linea la posizione del label è differente.

- **Socket.io** permette l’apertura di una comunicazione bidirezionale sempre attiva tra client e server utilizzando WebSocket.
- **Python** è un linguaggio di programmazione ad alto livello che supporta il paradigma object-oriented, la programmazione strutturata e molte caratteristiche di programmazione funzionale. È un linguaggio debolmente tipizzato, che utilizza unicamente l’indentazione per la definizione dei blocchi di codice, al contrario di molti linguaggi, non prevede quindi l’utilizzo di parentesi graffe. Supporta l’overloading di operatori e funzioni tramite delegati, oltre che sintassi avanzate quali slicing (l’utilizzo di un certo range di elementi in una lista) e list comprehension (la creazione di nuove liste partendo da una originale). Il codice python viene interpretato (con delle compilazioni a bytecode alla prima esecuzione per migliorare le performance) che supporta anche un uso interattivo.
 - **Flask** è un framework web per la creazione di backend per Python.
 - **Flask-SocketIO** è una libreria Python per la gestione di websocket tramite Socket.io.

- **NumPy** è la libreria principale per il calcolo scientifico Python. Permette la gestione di array n -dimensionali ed è ampiamente utilizzato per operazioni di algebra lineare, trasformate di Fourier, manipolazioni di dati e altre applicazioni numeriche. È uno strumento essenziale per chi lavora con analisi numeriche, machine learning e data science.
 - **pySerial** è una libreria per l'accesso a porte seriali. Permette la stessa gestione delle porte seriali su ogni piattaforma. Supporta diversi byte size, bit di parità e di fine messaggio, oltre che controllo del flusso. La porta è configurata per la trasmissione binaria.
 - **dotenv** è un modulo per la gestione delle variabili d'ambiente.
 - **pytz** è una libreria per il calcolo del fuso orario in python.
 - **SciPy** è una libreria di Python per il calcolo scientifico e tecnico, espande NumPy. Offre un'ampia quantità di funzionalità per l'ottimizzazione, la statistica, l'integrazione, l'algebra lineare, l'elaborazione dei segnali, la gestione di immagini e altre operazioni matematiche avanzate. È molto utilizzata per esempio nei campi della fisica, dell'ingegneria, della biologia computazionale.
- **C++** è un linguaggio di programmazione nato come espansione del linguaggio C, presenta caratteristiche di programmazione funzionale, generica e orientata agli oggetti, permettendo però una gestione a basso livello della memoria. Per quest'ultima caratteristica è tipicamente utilizzato in contesti dove le prestazioni sono particolarmente importanti come lo sviluppo di sistemi operativi, software embedded, motori di gioco e applicazioni real-time. In particolar modo è utilizzato anche per lo sviluppo di software per dispositivi con risorse limitate, come microcontrollori e sistemi embedded, dove la gestione diretta della memoria e delle risorse hardware è essenziale.
- **Arduino API** è una libreria in C/C++ per la scrittura di codice per dispositivi Arduino. Contiene funzioni riguardanti l'hardware, per esempio, contiene funzioni per la lettura/scrittura di segnali digitali e analogici sui pin, per la gestione degli interrupt e della porta seriale. Oltre alle funzioni hardware, l'API include, ad esempio, strumenti per la gestione dei timer, funzioni matematiche, funzioni per la gestione di bit e

byte e per la gestione degli stream. Contiene inoltre i tipi di variabile ‘enum’, ‘String’ e funzioni per la conversione.

- **TimerInterrupt** è una libreria che permette l'utilizzo del timer fisico di una board Arduino come interrupt di sistema, permettendo lo svolgimento ininterrotto di routine periodicamente.
- **ArduinoJson** è una semplice libreria per la gestione di stringhe JSON su piattaforma Arduino. Permette serializzazione e deserializzazione, ed è quindi molto utile per mandare dati strutturati sul seriale in modo che venga che lo scambio dei dati sia standardizzato.

Capitolo 3

Un prototipo di irrigazione prescrittivo

Descrive nel dettaglio il tuo lavoro, quindi come le tecnologie presentate nella precedente sezione sono state utilizzate nel progetto. Puoi prenderla larga descrivendo il nostro sistema (quello che ti ho mostrato sul mio pc) per poi descrivere la necessità di averne una rappresentazione su piccola scala e come è stata realizzata, così come descrivere il ciclo di vita del dato (collection, processing, exploitation). Ora come ora è normale tu non abbia chiare le idee su questo capitolo, andando avanti integreremo le tue conoscenze con quelle pregresse nostre sul dominio applicativo e sul nostro sistema. Questo capitolo deve essere il core della tesi, lunghezza 20 pagine.

Capitolo 4

Conclusioni e sviluppi futuri

Breve capitolo che trae le conclusioni sul lavoro svolto, il risultato ottenuto rispetto a quello atteso e lo spazio dedicato a migliorie future.

Bibliografia

- [1] UN. Goal 6: Ensure access to water and sanitation for all. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>, 2015. [Accessed 22-08-2024].
- [2] UN-Water. Indicator 6.4.1 “change in water use efficiency over time”. <https://www.unwater.org/our-work/integrated-monitoring-initiative-sdg-6/indicator-641-change-water-use-efficiency-over-time>, 2021. [Accessed 22-08-2024].
- [3] UN-Water. UN-Water analytical brief - Water-use efficiency, 2021. UN-Water publication.
- [4] FAO. Aquastat dissemination system. <https://data.apps.fao.org/aquastat/>, 2020. [Accessed 22-08-2024].
- [5] Giovanni Federico. *Feeding the World: An Economic History of Agriculture, 1800-2000*. Princeton University Press, Princeton, UNITED STATES, 2005.
- [6] Agricultural production statistics 2000–2022, December 2023.
- [7] FAO. 2.4.1 Agricultural sustainability — SDG Indicators Data Portal — Food and Agriculture Organization of the United Nations — fao.org. <https://www.fao.org/sustainable-development-goals-data-portal/data/indicators/Indicator2.4.1-proportion-of-agricultural-area-under-productive-and-sustainable-a> [Accessed 23-09-2024].

- [8] United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World population prospects 2024: Summary of results. Technical Report UN DESA/POP/2024/TR/NO. 9, United Nations, 2024.
- [9] R M Harrison, R E Hester, Roy Harrison, and Ron Hester. *Environmental Impacts of Modern Agriculture*. The Royal Society of Chemistry, 07 2012.
- [10] Peng Zhang, Junjie Zhang, and Minpeng Chen. Economic impacts of climate change on agriculture: The importance of additional climatic variables other than temperature and precipitation. *Journal of environmental economics and management*, 83:8–31, 2017.
- [11] Higgoda K. Janani, Chamaka Karunanayake, Miyuru B. Gunathilake, and Upaka Rathnayake. Integrating indicators in agricultural vulnerability assessment to climate change. *Agricultural Research*, May 2024.
- [12] Beatrice Monteleone, Iolanda Borzì, Brunella Bonaccorso, and Mario Martina. Quantifying crop vulnerability to weather-related extreme events and climate change through vulnerability curves. *Natural Hazards*, 116(3):2761–2796, Apr 2023.
- [13] Raveendra Kumar Rai, Vijay P. Singh, and Alka Upadhyay. Chapter 17 - soil analysis. In Raveendra Kumar Rai, Vijay P. Singh, and Alka Upadhyay, editors, *Planning and Evaluation of Irrigation Projects*, pages 505–523. Academic Press, 2017.
- [14] T. J. (Theo John) Marshall. *Soil physics*. Delve Publishing, third edition.. edition, 1996.
- [15] S. Assouline, D. Tessier, and A. Bruand. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resources Research*, 34(2):223–231, 1998.
- [16] W. A. Jury and K. Roth. *Soil Physics*. John Wiley & Sons, 1990.
- [17] Tao Xiao, Ping Li, Wenbin Fei, and Jiading Wang. Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: A perspective review. *Science of The Total Environment*, 906:167524, 2024.

- [18] M.B. Kirkham. *Potential Evapotranspiration*, page 501–514. Elsevier, 2014.
- [19] Richard Allan, L. Pereira, and Martin Smith. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56, 01 1998.
- [20] Naiqian Zhang, Maohua Wang, and Ning Wang. Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2):113–132, 2002.
- [21] Annie Bobby Zachariah. *Precision Agriculture and the Future of Farming*. Delve Publishing, 2019.
- [22] Sjaak Wolfert, Lan Ge, Cor Verdouw, and Marc-Jeroen Bogaardt. Big data in smart farming – a review. *Agricultural Systems*, 153:69–80, 2017.
- [23] Joint Research Centre, Institute for Environment, Sustainability, L Montanarella, F Carre, K Adhikari, and G Toth. *Site specific land management – General concepts and applications*. Publications Office, 2009.
- [24] Praveen Verma, Akriti Chauhan, and Tanzin Ladon. Site specific nutrient management: A review. *Research Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10 2020.
- [25] Muhammad Naveed Anjum, Muhammad Jehanzeb Masud Cheema, Fiaz Husain, and Ray-Shyan Wu. Chapter 6 - precision irrigation: challenges and opportunities. In Qamar Zaman, editor, *Precision Agriculture*, pages 85–101. Academic Press, 2023.
- [26] Roland Gerhards, Dionisio Andújar Sanchez, Pavel Hamouz, Gerassimos G. Peteinatos, Svend Christensen, and Cesar Fernandez-Quintanilla. Advances in site-specific weed management in agriculture—a review. *Weed Research*, 62(2):123–133, 2022.
- [27] Prashant P Jambhulkar and Naresh M Meshram. Site specific crop protection, 2013.

- [28] What is remote sensing and what is it used for? — U.S. Geological Survey — [usgs.gov. `https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used`](https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used). [Accessed 01-10-2024].
- [29] Crop and Agricultural monitoring — [fao.org. `https://www.fao.org/geospatial/our-work/what-we-do/crop-and-agricultural-monitoring/en/`](https://www.fao.org/geospatial/our-work/what-we-do/crop-and-agricultural-monitoring/en/). [Accessed 01-10-2024].
- [30] GPS.gov: GPS Overview — [gps.gov. `https://www.gps.gov/systems/gps/`](https://www.gps.gov/systems/gps/). [Accessed 26-09-2024].
- [31] Cos'è il GIS? — Tecnologia di mappatura del sistema informativo geografico — [esri.com. `https://www.esri.com/it-it/what-is-gis/overview`](https://www.esri.com/it-it/what-is-gis/overview). [Accessed 26-09-2024].
- [32] Abdellatif Soussi, Enrico Zero, Roberto Sacile, Daniele Trincherò, and Marco Fossa. Smart sensors and smart data for precision agriculture: A review. *Sensors*, 24(8), 2024.
- [33] Prachin Bhoyar, Parul Sahare, Sanjay B Dhok, and Raghavendra B Deshmukh. Communication technologies and security challenges for internet of things: A comprehensive review. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 99:81–99, 2019.
- [34] Junxiao Dai and Masashi Sugano. Low-cost sensor network for collecting real-time data for agriculture by combining energy harvesting and lpwa technology. In *2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*, pages 1–4. IEEE, 2019.
- [35] Mehmet C Vuran, Abdul Salam, Rigoberto Wong, and Suat Irmak. Internet of underground things in precision agriculture: Architecture and technology aspects. *Ad Hoc Networks*, 81:160–173, 2018.
- [36] Laura García, Lorena Parra, Jose M Jimenez, Jaime Lloret, and Pascal Lorenz. Iot-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and iot systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, 20(4):1042, 2020.

- [37] Nik Norasma Che'Ya, Nur Adibah Mohidem, Nor Athirah Roslin, Mohammadmehdi Saberioon, Mohammad Zakri Tarmidi, Jasmin Arif Shah, Wan Fazilah Fazlil Ilahi, and Norsida Man. Mobile computing for pest and disease management using spectral signature analysis: A review. *Agronomy*, 12(4):967, 2022.
- [38] Gilroy P. Pereira, Mohamed Z. Chaari, and Fawwad Daroge. Iot-enabled smart drip irrigation system using esp32. *IoT*, 4(3):221–243, 2023.
- [39] Ahmed A. Abdelmoneim, Roula Khadra, Angela Elkamouh, Bilal Derardja, and Giovanna Dragonetti. Towards affordable precision irrigation: An experimental comparison of weather-based and soil water potential-based irrigation using low-cost iot-tensiometers on drip irrigated lettuce. *Sustainability*, 16(1), 2024.
- [40] G. R. Blake and K. H. Hartge. *Bulk Density*, chapter 13, pages 363–375. John Wiley & Sons Ltd, 1986.
- [41] G. W. Gee and J. W. Bauder. *Particle-size Analysis*, chapter 15, pages 383–411. John Wiley & Sons, Ltd, 1986.
- [42] G. W. Thomas. *Soil pH and Soil Acidity*, chapter 16, pages 475–490. John Wiley & Sons, Ltd, 1996.
- [43] D. W. Nelson and L. E. Sommers. *Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter*, chapter 34, pages 961–1010. John Wiley & Sons, Ltd, 1996.
- [44] A. Klute. *Water Retention: Laboratory Methods*, chapter 26, pages 635–662. John Wiley & Sons, Ltd, 1986.
- [45] T.D. Kelly, T. Foster, and David M. Schultz. Assessing the value of adapting irrigation strategies within the season. *Agricultural Water Management*, 275:107986, 2023.
- [46] Robin B. Matthews, Mike Rivington, Shibu Muhammed, Adrian C. Newton, and Paul D. Hallett. Adapting crops and cropping systems to future climates to ensure food security: The role of crop modelling. *Global Food Security*, 2(1):24–28, 2013.

- [47] Xin Li, Chongsong Zhu, Jiankang Wang, and Jianming Yu. Chapter six - computer simulation in plant breeding. In Donald L. Sparks, editor, *Advances in Agronomy*, volume 116 of *Advances in Agronomy*, pages 219–264. Academic Press, 2012.
- [48] Marisa Gallardo, Antonio Elia, and Rodney B. Thompson. Decision support systems and models for aiding irrigation and nutrient management of vegetable crops. *Agricultural Water Management*, 240:106209, 2020.

Ringraziamenti

Optional. Max 1 page.