

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria e Scienze Informatiche

Progettazione e realizzazione di un simulatore per l'irrigazione di precisione

Tesi di laurea in:
BASI DI DATI AVANZATE

Relatore

Matteo Golfarelli

Candidato

Davide Speciali

Correlatore

Manuele Pasini

Indice

1	Agricoltura di precisione	1
1.1	Introduzione generale all'agricoltura di precisione	3
1.1.1	Agricoltura e cambiamento climatico	3
1.1.2	Parametri di coltivazione	5
1.1.3	Agricoltura di precisione	8
1.2	Componenti chiave dell'agricoltura di precisione	11
1.2.1	Acquisizione dati	11
1.2.2	Simulazione del terreno	14
1.2.3	Sistemi di supporto alle decisioni	14
1.3	Irrigazione di precisione	15
1.3.1	Approcci di misurazione	15
1.3.2	Approcci all'irrigazione di precisione	16
2	Tecnologie utilizzate	18
2.1	Hardware	18
2.2	Software	19
2.2.1	Front-end	20
2.2.2	Back-end	22
2.2.3	Su Arduino	23
3	Un prototipo di irrigazione prescrittivo	24
		25
	Bibliografia	25

Capitolo 1

Agricoltura di precisione

La lotta al cambiamento climatico è uno dei temi più importanti per il futuro delle popolazioni del pianeta.

A partire dal 2015 l'Organizzazione delle Nazioni Unite (ONU), con l'obiettivo di rispondere in maniera sistematica al problema del cambiamento climatico, ha adottato l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile. In questo contesto vengono specificate 17 Sustainable Development Goals (SDG)(Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (OSS) in italiano): sono il programma per realizzare un futuro migliore e più sostenibile per tutti; affrontano le sfide globali che è necessario affrontare, tra cui quelle relative a povertà, disuguaglianza, cambiamento climatico, degrado ambientale, pace e giustizia[1]. Si tratta di un totale di 169 obiettivi da raggiungere entro il 2030, divisi in 17 categorie. Tra esse la sesta “Acqua pulita e sanificazione”, si concentra sul garantire un accesso sicuro e sostenibile alle risorse idriche [2]. Il punto 6.4 in particolare punta a un miglioramento dell'efficienza dell'uso di acqua in tutti i settori [3, 4]. Il settore agricolo è uno dei maggiori consumatori di acqua: dal 1970, la quantità di acqua utilizzata per l'agricoltura è quasi raddoppiata e attualmente rappresenta circa tre volte l'uso idrico rispetto a qualsiasi altro settore[5]. SDG 2 si pone l'obiettivo di combattere la fame globale. Uno dei target associati, il 2.4, afferma che è necessario “garantire sistemi di produzione alimentare sostenibili e implementare pratiche agricole resilienti che aumentino la produttività e la produzione, che aiutino a proteggere gli ecosistemi, che rafforzino la capacità di adattamento ai cambiamenti climatici, a condizioni meteorologiche

estreme, siccità, inondazioni e altri disastri e che migliorino progressivamente la qualità del suolo”[6].

Di conseguenza, è cresciuto l’interesse per lo sviluppo di tecnologie digitali avanzate, volte a monitorare e gestire in modo automatico ed efficiente l’intero settore agricolo. Queste tecnologie rientrano nell’ambito dell’agricoltura di precisione, i cui concetti principali e contesto operativo sono introdotti nella sezione 1.1. La sezione 1.2 descrive i principali componenti, mentre la sezione 1.3 si focalizza sull’irrigazione di precisione.

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: per questo motivo nei secoli ha subito enormi trasformazioni e l'era moderna non fa differenza [7]. Oggi è 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 [8].

La ricerca di metodi più sostenibili per la gestione del settore agricolo è diventata un obiettivo primario per affrontare nuove sfide a livello mondiale [9]. In primis il costante aumento della popolazione, che si stima raggiungerà i 10 miliardi persone entro il 2080 [10], porterà un aumento della richiesta di prodotti agricoli e quindi la necessità di un aumento dell'offerta. Diventa sempre più importante agire per quanto riguarda il tema dell'impatto che il settore ha sull'ambiente, come deforestazione, uso eccessivo di risorse idriche e fertilizzanti inquinanti [11]. Tutti questi fattori contribuiscono all'aumento delle temperature, che a loro volta incrementano la probabilità di eventi meteorologici estremi, capaci di danneggiare o distruggere completamente i raccolti. Gli autori di [12] stimano che, entro la fine del secolo, il gli effetti del cambiamento climatico potrebbe ridurre le rese di riso, grano e mais in Cina rispettivamente del 36,25%, 18,26% e 45,10%; in [13] vengono analizzati gli effetti di eventi di siccità sul territorio Italiano facendo riferimento agli anni 2003, 2006 e 2011: stimano una perdita del PIL tra lo 0,03% e lo 0,10%, quindi rappresentano un costo fino a 1.75 miliardi di euro.

Sin dalle sue origini, l'agricoltura si è evoluta attraverso un processo di adattamento continuo ai parametri di coltivazioni come le condizioni ambientali e climatiche locali. Per millenni, le comunità agricole hanno osservato i cicli naturali, come il cambiamento delle stagioni, la variabilità delle precipitazioni e l'alternanza tra periodi di siccità e abbondanza di acqua. Queste conoscenze, tramandate di generazione in generazione, hanno permesso agli agricoltori di sviluppare tecniche

di coltivazione sempre più sofisticate e adatte alle specificità dei loro territorio. Tecniche come la rotazione delle colture, l'irrigazione e la selezione di varietà resistenti sono state frutto di un processo di sperimentazione e adattamento che ha richiesto secoli. Questo lungo percorso di evoluzione ha sempre avuto un ritmo relativamente lento, poiché i cambiamenti climatici ed ecologici si manifestavano su tempi geologici o lunghi periodi storici[14]. Il cambiamento climatico porta i parametri di coltivazione a modificarsi molto rapidamente, rendendo questo sistema inadeguato in quanto troppo lento. Diventa quindi importante essere in grado di monitorare questi parametri in modo da capire quali azioni possono garantire la salute del raccolto[15]. In sezione 1.1.2 vengono introdotti i principali parametri di coltivazione.

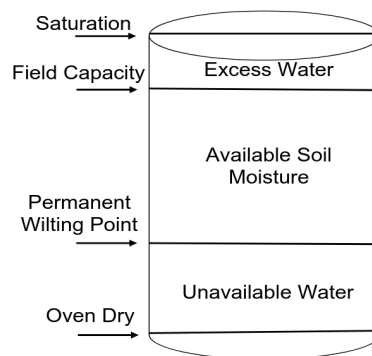


Figura 1.1: Valori soglia per SWC[16].

1.1.2 Parametri di coltivazione

Vengono definite proprietà idrauliche del suolo un insieme di caratteristiche del suolo che permettono di descrivere in maniera approssimata il rapporto tra suolo e acqua. Questi parametri possono essere tantissimi e dipendono dal contesto che si vuole analizzare.

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 fig. 1.1, è possibile vedere le condizioni del terreno in base a SWC.

Saturation indica uno stato in cui all'interno del terreno non è più presente l'aria e ogni poro è quindi pieno di acqua. Fatta eccezione per certi tipi di culture, come quella del riso, questo stato non è adatto alla crescita della pianta.

Oven dry al contrario, è lo stato con totale assenza di acqua, non è quindi adatto alla crescita di nessun tipo di pianta.

Field Capacity (FC) rappresenta 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.

Permanent Wilting Point (PWP) è il punto dopo il quale la pianta non riesce più a estrarre acqua dal terreno, per quanto sia ancora in minima parte presente.

Queste costanti, che sono meglio descritte in [17], permettono di definire quale dovrebbe essere la percentuale di acqua nel suolo per permettere la crescita sana delle piante: SWC deve essere compreso tra FC e PWP.

Un ulteriore parametro 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 alle piante. Viene espresso in termini di pressione e comprende diverse componenti che contribuiscono al valore finale[18]. Le principali sono:

- **Potenziale gravitazionale:** deriva dalla forza di gravità e rappresenta l'energia potenziale dovuta alla sua posizione verticale.
- **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.
- **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.

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[19].

Alcuni di questi parametri dipendono da fattori, come:

- **Proprietà fisiche del terreno:** caratteristiche del terreno come la tessitura (la percentuale di argilla, limo e sabbia) e la struttura (raggruppamento in composti porosi delle particelle del suolo) hanno peso nella stima di SWC. In fig. 1.4 si possono vedere delle classificazioni comuni per i tipi di terreni in base alla tessitura, mentre in fig. 1.2 in base alla struttura. Infine, in fig. 1.3 è possibile vedere come la tessitura altera il rapporto tra SWP e SWC.

- **Coltura:** l'apparato radicale di una pianta può influire sulle condizioni del suolo: l'assorbimento dell'acqua altera il bilancio idrico locale, la presenza di radici modifica della struttura del suolo, può avvenire la creazione di micro-canali che facilitano il movimento dell'acqua e infine il rilascio di sostanze organiche influenzano la tensione superficiale del suolo. In base a questi meccanismi l'apparato radicale ha un effetto sulla stima di SWP[20].

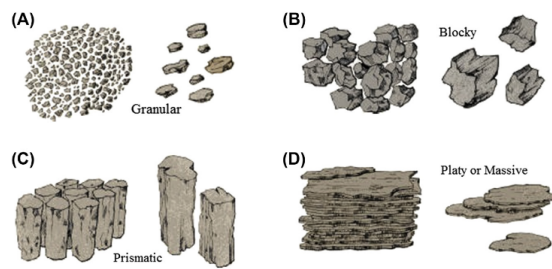


Figura 1.2: Classificazione del suolo in base alla struttura: (A) granulare, (B) a blocchi, (C) prismatico e (D) massiccio[17].

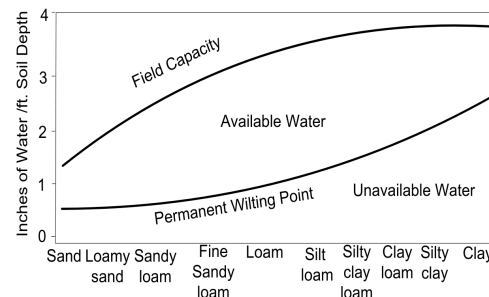


Figura 1.3: Relazione tra le soglie e la tessitura del terreno[16].

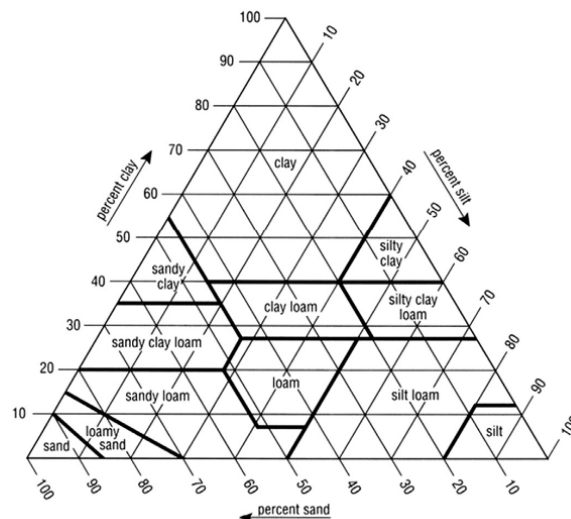


Figura 1.4: Classificazioni della distribuzione granulometrica del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti[17].

È inoltre importante notare che sia l'apparato radicale che le proprietà fisiche del suolo non sono costanti all'interno dello stesso campo.

Un ulteriore fattore da tenere in considerazione riguarda le variabili atmosferiche. 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[21]. 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[22] sono in grado di derivare, in un dato momento, il *potential evapotranspiration* (ET_0), coefficiente di evapotraspirazione potenziale, 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, offre quindi una rappresentazione dell'acqua "persa" e che non è più presente nel suolo. È possibile moltiplicare ET_0 per un *crop coefficient* (K_c), coefficiente di coltura, che dipende dal tipo e dallo stato di crescita di una determinata coltura, per ottenere ET_a : reale evapotraspirazione.

Questo permette quindi di approssimare la quantità di acqua evaporata in atmosfera 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'area potenzialmente molto estesa e potrebbe quindi non essere adeguato per campi con zone ombreggiate.

Per permettere agli agricoltori la raccolta e l'analisi di queste variabili, viene fatto uso di tecnologie di agricoltura di precisione.

1.1.3 Agricoltura di precisione

Consiste nell'uso di tecnologie avanzate per aumentare l'efficienza, la produzione e la qualità dei prodotti[23].

I primi esempi di agricoltura di precisione, per come viene intesa oggi, risalgono già agli anni '80, quando lo sviluppo di modelli di crescita delle colture e l'utilizzo del Global Positioning System (GPS) ha consentito di rilevare dati spaziali sui

campi e monitorare variabili come la fertilità del suolo e le esigenze idriche[25].[24]. 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[24]. Oggi l'arrivo di nuove tecnologie come Cloud Computing, Internet of Thing (IoT) e intelligenza artificiale hanno portato un aumento sostanziale delle ricerche nel campo[25].

L'obiettivo principale è quello di aumentare l'efficienza produttiva, per farlo si interessa di:

- **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:** la riduzione del lavoro manuale richiesto agli agricoltori, grazie a tecnologie come i sistemi di monitoraggio automatico, insieme a un uso più efficiente delle risorse, ha un effetto positivo anche dal punto di vista economico. Inoltre, questo approccio rende le colture più resilienti alle variazioni climatiche, riducendo i costi di manutenzione in caso di eventi meteorologici estremi.

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 dei campi. 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 [26].

- **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 [27].
- **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 [28].
- **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 [29].
- **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 [30].

1.2 Componenti chiave dell'agricoltura di precisione

1.2.1 Acquisizione dati

La raccolta dei dati è il fulcro dell'agricoltura di precisione: permette di avere un'immagine reale delle condizioni dei campi, sia per quanto riguarda il suolo che a livello atmosferico. Esistono diversi metodi utilizzati per raccogliere dati, tra questi Remote Sensing, sensori on-site e rilevazioni in laboratorio.

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[31]. 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 [32]. 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 [33].

Il Geographical Information System (GIS), sistema d'informazioni geografico, un sistema informativo che consente la raccolta, l'organizzazione, l'analisi e la visualizzazione di dati geografici.

Integrando tecnologie come GPS e GIS, il Remote Sensing consente di 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. 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 [34].

Sensori on-site

Un ambito di ricerca molto attivo riguarda lo sviluppo di sensori in grado di monitorare in tempo reale le variabili delle coltivazioni, tenendo conto delle limitazioni legate all'uso in contesti agricoli: la rete internet potrebbe non coprire totalmente o parzialmente i campi estesi, 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[35].

Sono spesso utilizzate tecnologie di comunicazione wireless a lungo raggio, in particolare opzioni Low-Power Wide-Area (LPWA) come LoRa, NB-IoT e Sigfox, che sono emerse come alternative alle reti cellulari tradizionali[36]. Le tecnologie LPWA sono caratterizzate da una bassa velocità di trasmissione dati, compensata però da un basso consumo energetico e un'ampia copertura. Le tecnologie LPWA eccellono nel collegare dispositivi che richiedono una trasmissione minima di dati su lunghe distanze con una lunga durata della batteria[37].

Aspetto fondamentale riguarda i sensori del suolo: sono in grado di misurare proprietà essenziali del suolo come il contenuto di umidità, la presenza e la quantità di nutrienti, la temperatura e il PH. Sono usati 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 [38].

Sono inoltre disponibili sensori di qualità dell'acqua che sono in grado di monitorare aspetti come 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 [39].

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[40].

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 vengono utilizzati per la lettura dei dati rilevati dai sensori e l'invio di suddetti dati a server esterni. Permettono di ridurre l'utilizzo di risorse e il costo

del sistema, pur avendo un'elevata semplicità di programmazione. Possono essere programmati per agire da attuatori, per esempio per attivare automaticamente sistemi d'irrigazione[41, 42].

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/delle piante. Tra le tecniche più comuni si trovano:

- 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[43].
- 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[44].
- 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[45].
- 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[46].
- Test di capacità di ritenzione idrica: misura la quantità di acqua che un campione di suolo può trattenere dopo la saturazione. È utile per comprendere la gestione dell'irrigazione e la sostenibilità delle colture[47].

In generale sono misurazioni che richiedono tempo e un elevato costo in termini di strumentazioni, per questo motivo vengono effettuate saltuariamente.

1.2.2 Simulazione del terreno

Un altro componente chiave è rappresentato dai Crop Simulation Model (CSM), modelli di simulazione delle colture, sono strumenti che simulano la crescita delle colture utilizzando equazioni biofisiche[48]. Esistono diversi CSM, ognuno progettato per differenti casi d'uso. Possono essere utilizzati per applicazioni di ricerca o per la gestione delle colture. Nel ramo della ricerca vengono usati come strumento per aggregare le conoscenze o per integrare sperimentazioni sul campo, tipicamente molto costose. Un'altra applicazione dei modelli è quella di dimostrare l'impatto delle pratiche di gestione su una coltura o sull'ambiente agli agricoltori[49]. Per esempio in [50] si fa uso di CSM per valutare l'impatto climatico sulla produzione in diverse zone, considerando molteplici combinazioni di suoli e condizioni climatiche, varietà e gestione delle colture

I parametri dei modelli vengono generalmente tarati confrontandoli con i dati osservati sul campo, attraverso un processo iterativo di regolazione; Questo porta i valori stimati dei parametri a essere imprecisi a causa degli errori sperimentali intrinseci associati all'osservazione sul campo[51].

1.2.3 Sistemi di supporto alle decisioni

Infine, i Decision Support System (DSS), sistema di supporto alle decisioni, coprono un ruolo importante nell'agricoltura di precisione. Sono 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 luogo, come il clima, le date di semina, i tipi di terreno, le caratteristiche del sistema d'irrigazione. 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 [52].

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, già definita nella sezione 1.1.3.

1.3.1 Approcci di misurazione

Tra i sensori descritti in sezione 1.2, quelli utilizzati in questo contesto possono essere sia sensori on-site che remoti. I primi sono tipicamente posizionati sotto il terreno in modo da monitorare l'umidità del suolo, offrendo misurazioni precise. Gli ultimi invece vengono utilizzati per raccogliere valori a livello globale e sono di natura meno precisi. In [53] 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 sistemi che fanno uso di sensori on-site possono essere classificati in base alla quantità di sensori posizionati per pianta. L'installazione più utilizzata, in quanto più economica, è quella a sensore singolo. Questa però pecca dell'impossibilità di monitorare l'umidità a diverse profondità[54]. 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 sotto a ogni pianta[55, 56, 57]. Le griglie bidimensionali[58, 59] prevedono l'installazione di più sensori per ogni strato, formando una matrice che descrive un'intera fetta di terreno. Le installazioni a griglia tridimensionale[60, 61] possono essere viste come la visualizzazione di più fette di terreno. Questi ultimi due tipi d'installazione sono meno utilizzati a causa del maggior costo. In fig. 1.5 sono mostrate le tre disposizioni multi-sensore.

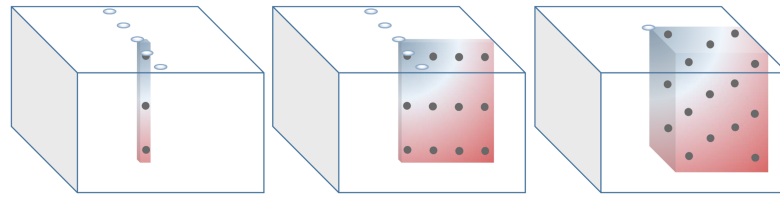


Figura 1.5: In ordine, un esempio d'installazione monodimensionale, bidimensionale e tridimensionale[62].

1.3.2 Approcci all'irrigazione di precisione

Contrariamente alla sezione 1.3.1, che si poneva l'obiettivo di descrivere approcci alla misurazione, questa sezione ha come obiettivo quello di descrivere alcuni approcci all'irrigazione: ogni approccio utilizza in modo diverso i dati raccolti nei diversi approcci di misurazione, con l'obiettivo ultimo di somministrare la corretta quantità di acqua.

Approcci basati su teoria dei controlli

L'approccio più semplice è rappresentato da sistemi basati su soglie, dove l'irrigazione viene fornita quando la misura dell'umidità del terreno è al di sotto di una determinata soglia. Questo genere di approcci soffre dell'inabilità di determinare il corretto volume di acqua necessaria al terreno, rendendoli adatti solo in ambienti controllati con poche variabili[63].

Un altro approccio può essere trovato nell'utilizzo della teoria dei controlli 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[64]. [65] propone un sistema basato su un PID che permette di modellare, oltre all'umidità del terreno in input, le precipitazioni cadute. [66] propone l'utilizzo di un Model Predictive Control (MPC), che secondo lo studio ha permesso un risparmio nel quantitativo di acqua utilizzato, mantenendo l'umidità all'interno di un intervallo ideale.

Approcci basati sull'apprendimento automatico

Esistono approcci basati sull'apprendimento autonomo che sfruttando la diffusione dei dispositivi IoT per raccogliere grandi quantità di dati attraverso i quali ad-

destrare modelli di *machine learning*: dalla classificazione[67], alla regressione[68], fino a sistemi più complessi che coinvolgono le reti neurali[69] e il *deep reinforcement learning*[70].

Il problema principale in questo genere di approcci si trova nel rischio di overfitting 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 sia in termini economici che di tempo, soprattutto considerando che la raccolta dei dati è possibile solo durante le stagioni d'irrigazione.

In [71] è proposto un modello di predizione basato su reti neurali applicabile in contesti in cui la quantità di dati a disposizione è considerata limitata, ma la procedura di addestramento utilizza dati storici inerenti due anni solari di coltivazione, quantità superiore a quella spesso disponibile, generando quindi un problema di *cold-start*: prima di avere un sistema d'irrigazione in funzione, è necessaria la disponibilità di una grande quantità di dati raccolti per l'addestramento dei modelli prima di poterli utilizzare.

Lo studio [72] mostra un modello *Deep Reinforcement Learning* applicato in un campo di pomodori in Portogallo, il cui obiettivo è quello di massimizzare il guadagno rapportato alla quantità d'acqua utilizzata per la coltura. Gli autori di [73, 74] descrivono lo stato dell'arte in termini di sistemi d'irrigazione intelligente. Gli autori di [56] confrontano tecniche di classificazione e di regressione mostrando che in ambi gli approcci i risultati sono stati corretti, rispetto alle scelte che avrebbe fatto un agronomo, con un accuratezza maggiore del 93%. Gli autori di [75] fanno riferimento solamente all'utilizzo di repressori, considerati più adatti visto il range continuo dell'output da determinare, portando a risultati con accuratezza del 71% rispetto ad altri modelli, inoltre enfatizza l'importanza di una corretta modellazione e parametrizzazione del suolo. Gli autori di [76] propongono un esempio di applicazione di un sistema d'irrigazione intelligente su vasta scala utilizzando un *Gaussian Process Regression Model*.

In questo documento è stato deciso di produrre un simulatore con un sistema basato su un PID.

Capitolo 2

Tecnologie utilizzate

Il lavoro che questo documento descrive riguarda lo sviluppo di una soluzione di irrigazione intelligente. In questo contesto, le tecnologie utilizzate sono state numerose, in particolare sono state divise in tecnologie hardware e software.

2.1 Hardware

- **Sensori**, TODO modello
- **Pompa**, TODO modello
- **Breadboard**, TODO ???
- **Arduino UNO R3** è una scheda basata sul microcontrollore ATmega328P. È in grado di elaborare programmi scritti in linguaggio C++ usando un'architettura SuperLoop: un unico segmento di codice viene ripetuto fin tanto che il dispositivo riceve alimentazione. Questo loop è interrompibile momentaneamente solo tramite degli interrupt di sistema. Le routine di gestione degli interrupt non sono interrompibili, il che implica che durante la loro esecuzione non è possibile gestire eventuali altri interrupt. È quindi consigliabile suddette routine siano particolarmente brevi: oltre che essere indispensabili per diminuire la possibilità di perdita di eventi, molte librerie di sistema sfruttano internamente gli interrupt, per esempio `delay` (equivalente a `sleep` di Python). Questo Arduino offre l'utilizzo di un totale di 22 pin General Purpose Input/Output (GPIO): 16 dei quali utilizzabili sia come input che

output digitali e 6 utilizzabili solo come input analogici. Può inoltre gestire una comunicazione seriale tramite USB con la quale è possibile comunicare con altri dispositivi come un computer. Esistono diversi altri modelli, ma per semplicità nel corso del documento questo specifico modello verrà chiamato “Arduino”.

- **Raspberry Pi 4 model B** è un Single Board Computer (SBC) in grado di utilizzare sistemi operativi 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. Anche in questo caso, si farà riferimento a “Raspberry” per intendere questo specifico modello.

2.2 Software

Questo progetto comprende lo sviluppo di tre diversi software:

1. Front-end: interfaccia web.
2. Back-end: software per la gestione delle logiche di irrigazione, elaborazione dati dei sensori e offerta dati per l'interfaccia.
3. Su Arduino: software per la gestione di sensori e pompa.

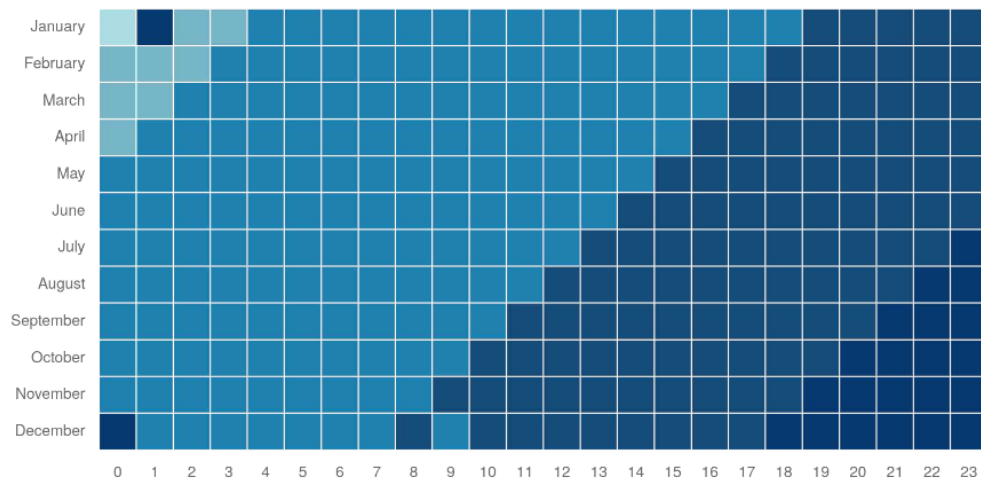


Figura 2.1: Esempio di una mappa delle temperature medie giornaliere per mese, l'intensità del colore è proporzionale alla temperatura.

Il capitolo 3 va più in dettaglio riguardo la struttura del progetto.

2.2.1 Front-end

- **JavaScript (JS)** è un linguaggio di programmazione interpretato, usato principalmente per la programmazione web sia a livello del client, è infatti compatibile con tutti i browser attualmente utilizzati, che server, per esempio tramite 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 grande ecosistema di librerie e framework che ne aumentano 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.

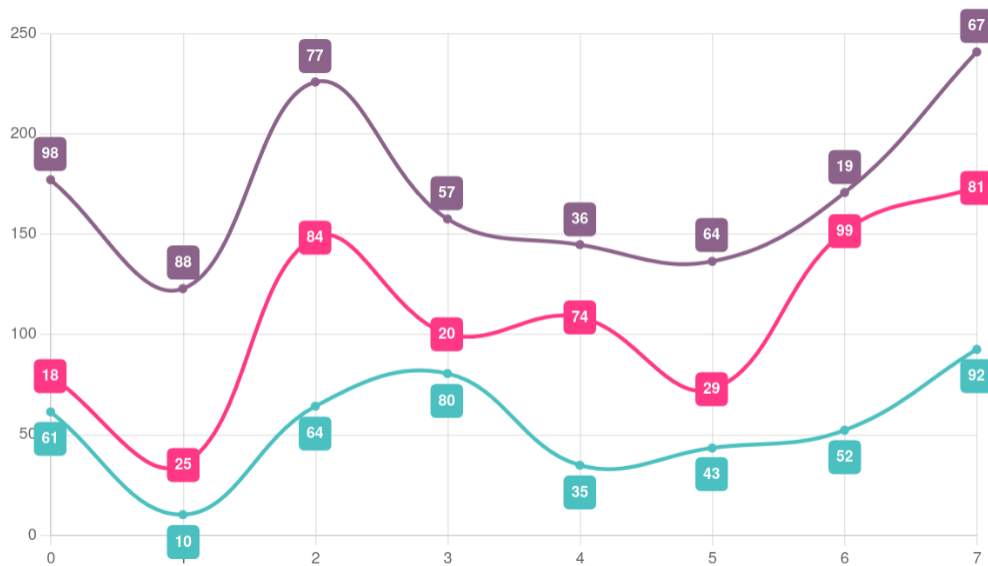


Figura 2.2: Esempio utilizzo di datalabels dove in ogni linea la posizione del label è differente.

- * **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 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.

2.2.2 Back-end

- **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.
 - **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.
 - **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 avanza-

te. È molto utilizzata per esempio nei campi della fisica, dell'ingegneria, della biologia computazionale.

- **sqlite3** è una libreria che permette l'utilizzo di un database su disco locale senza necessità di utilizzo di un server separato.

2.2.3 Su Arduino

- **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. Questo caso viene utilizzato 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

Bibliografia

- [1] Take Action for the Sustainable Development Goals - United Nations Sustainable Development — un.org. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>. [Accessed 15-10-2024].
- [2] UN. Goal 6: Ensure access to water and sanitation for all. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/>, 2015. [Accessed 22-08-2024].
- [3] 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].
- [4] UN-Water. UN-Water analytical brief - Water-use efficiency, 2021. UN-Water publication.
- [5] FAO. Aquastat dissemination system. <https://data.apps.fao.org/aquastat/>, 2020. [Accessed 22-08-2024].
- [6] UNO. Obiettivo 2: Porre fine alla fame, raggiungere la sicurezza alimentare, migliorare la nutrizione e promuovere un’agricoltura sostenibile — unric.org. <https://unric.org/it/obiettivo-2-porre-fine-alla-fame-raggiungere-la-sicurezza-alimentare-migliorare-> [Accessed 09-10-2024].

- [7] Giovanni Federico. *Feeding the World: An Economic History of Agriculture, 1800-2000*. Princeton University Press, Princeton, UNITED STATES, 2005.
- [8] Agricultural production statistics 2000–2022, December 2023.
- [9] 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-land-use> [Accessed 23-09-2024].
- [10] 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.
- [11] R M Harrison, R E Hester, Roy Harrison, and Ron Hester. *Environmental Impacts of Modern Agriculture*. The Royal Society of Chemistry, 07 2012.
- [12] 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.
- [13] David García-León, Gabriele Standardi, and Andrea Staccione. An integrated approach for the estimation of agricultural drought costs. *Land Use Policy*, 100:104923, 2021.
- [14] Higgoda K. Janani, Chamaka Karunanayake, Miyuru B. Gunathilake, and Upaka Rathnayake. Integrating indicators in agricultural vulnerability assessment to climate change. *Agricultural Research*, May 2024.
- [15] 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.

- [16] Xianzhong Ding and Wan Du. Drlic: Deep reinforcement learning for irrigation control. In *2022 21st ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN)*, pages 41–53, 2022.
- [17] 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.
- [18] T. J. (Theo John) Marshall. *Soil physics*. Delve Publishing, third edition.. edition, 1996.
- [19] S. Assouline, D. Tessier, and A. Bruand. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resources Research*, 34(2):223–231, 1998.
- [20] 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.
- [21] M.B. Kirkham. *Potential Evapotranspiration*, page 501–514. Elsevier, 2014.
- [22] Richard Allan, L. Pereira, and Martin Smith. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-fao irrigation and drainage paper 56, 01 1998.
- [23] Naiqian Zhang, Maohua Wang, and Ning Wang. Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36(2):113–132, 2002.
- [24] Annie Bobby Zachariah. *Precision Agriculture and the Future of Farming*. Delve Publishing, 2019.
- [25] Sjaak Wolfert, Lan Ge, Cor Verdouw, and Marc-Jeroen Bogaardt. Big data in smart farming – a review. *Agricultural Systems*, 153:69–80, 2017.
- [26] 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.

- [27] Praveen Verma, Akriti Chauhan, and Tanzin Ladon. Site specific nutrient management: A review. *Research Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10 2020.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Prashant P Jambhulkar and Naresh M Meshram. Site specific crop protection, 2013.
- [31] 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].
- [32] 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].
- [33] GPS.gov: GPS Overview — [gps.gov. https://www.gps.gov/systems/gps/](https://www.gps.gov/systems/gps/). [Accessed 26-09-2024].
- [34] 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].
- [35] 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.

- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Gilroy P. Pereira, Mohamed Z. Chaari, and Fawwad Daroge. Iot-enabled smart drip irrigation system using esp32. *IoT*, 4(3):221–243, 2023.
- [42] 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.
- [43] G. R. Blake and K. H. Hartge. *Bulk Density*, chapter 13, pages 363–375. John Wiley & Sons Ltd, 1986.

- [44] G. W. Gee and J. W. Bauder. *Particle-size Analysis*, chapter 15, pages 383–411. John Wiley & Sons, Ltd, 1986.
- [45] G. W. Thomas. *Soil pH and Soil Acidity*, chapter 16, pages 475–490. John Wiley & Sons, Ltd, 1996.
- [46] D. W. Nelson and L. E. Sommers. *Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter*, chapter 34, pages 961–1010. John Wiley & Sons, Ltd, 1996.
- [47] A. Klute. *Water Retention: Laboratory Methods*, chapter 26, pages 635–662. John Wiley & Sons, Ltd, 1986.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] Valentina Mereu, Gianluca Carboni, Andrea Gallo, Raffaello Cervigni, and Donatella Spano. Impact of climate change on staple food crop production in nigeria. *Climatic Change*, 132(2):321–336, 09 2015. Copyright - Springer Science+Business Media Dordrecht 2015; Ultimo aggiornamento - 2024-10-04; CODEN - CLCHDX; SubjectsTermNotLitGenreText - Nigeria; Environmental.
- [51] Xin Li, Chengsong 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.
- [52] 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.

- [53] Ebrahim Babaeian, Sidike Paheding, Nahian Siddique, Vijay K. Devabhaktuni, and Markus Tuller. Estimation of root zone soil moisture from ground and remotely sensed soil information with multisensor data fusion and automated machine learning. *Remote Sensing of Environment*, 260:112434, July 2021.
- [54] Chusnul Arif, Masaru Mizoguchi, Budi Setiawan, and Ry Doi. Estimation of soil moisture in paddy field using artificial neural networks. *Int. J. Adv. Res. Artif. Intell.*, 1, 03 2013.
- [55] Fatemeh Karandish and Jiří Šimůnek. A comparison of numerical and machine-learning modeling of soil water content with limited input data. *Journal of Hydrology*, 543:892–909, December 2016.
- [56] Anat Goldstein, Lior Fink, Amit Meitin, Shiran Bohadana, Oscar Lutenberg, and Gilad Ravid. Applying machine learning on sensor data for irrigation recommendations: revealing the agronomist’s tacit knowledge. *Precision Agriculture*, 19(3):421–444, May 2017.
- [57] Andrés F. Jiménez, Brenda V. Ortiz, Luca Bondesan, Guilherme Morata, and Damianos Damianidis. Evaluation of two recurrent neural network methods for prediction of irrigation rate and timing. *Transactions of the ASABE*, 63(5):1327–1348, 2020.
- [58] Gregorio Egea, Antonio Diaz-Espejo, and José E. Fernández. Soil moisture dynamics in a hedgerow olive orchard under well-watered and deficit irrigation regimes: Assessment, prediction and scenario analysis. *Agricultural Water Management*, 164:197–211, January 2016.
- [59] Marcos R.C. Cordeiro, Vanessa Krahn, Ramanathan Sri Ranjan, and Steve Sager. Water table contribution and diurnal water redistribution within the corn root zone. *Canadian Biosystems Engineering*, 57(1):1.39–1.48, February 2016.
- [60] Antonio Zapata-Sierra, José Roldán-Cañas, Rafael Reyes-Requena, and María Moreno-Pérez. Study of the wet bulb in stratified soils (sand-covered soil) in intensive greenhouse agriculture under drip irrigation by calibrating the hydrus-3d model. *Water*, 13(5):600, February 2021.

- [61] Zhongwei Liang, Xiaochu Liu, Tao Zou, and Jinrui Xiao. Adaptive prediction of water droplet infiltration effectiveness of sprinkler irrigation using regularized sparse autoencoder–adaptive network-based fuzzy inference system (rsae–anfis). *Water*, 13(6):791, March 2021.
- [62] Matteo Francia, Joseph Giovanelli, and Matteo Golfarelli. Multi-sensor profiling for precision soil-moisture monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture*, 197:106924, 2022.
- [63] Haoteng Zhao, Liping Di, Liying Guo, Chen Zhang, and Li Lin. An automated data-driven irrigation scheduling approach using model simulated soil moisture and evapotranspiration. *Sustainability*, 15(17), 2023.
- [64] Karl Johan Åström and Tore Hägglund. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. ISA - The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1995.
- [65] Martin Goodchild, K Kühn, A Burek, Malcolm Jenkins, and A Dutton. A method for precision closed-loop irrigation using a modified pid control algorithm. *Sensors and Transducers*, 188:61–68, 05 2015.
- [66] Camilo Lozoya, Carlos Mendoza, Alberto Aguilar, Armando Roman-Flores, and Rodolfo Castello. Sensor-based model driven control strategy for precision irrigation. *Journal of Sensors*, 2016:1–12, 01 2016.
- [67] André Glória, João Cardoso, and Pedro Sebastião. Sustainable irrigation system for farming supported by machine learning and real-time sensor data. *Sensors*, 21(9), 2021.
- [68] H. Navarro-Hellín, J. Martínez del Rincon, R. Domingo-Miguel, F. Soto-Valles, and R. Torres-Sánchez. A decision support system for managing irrigation in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124:121–131, 2016.
- [69] Li Gong, Jinlong Yan, Yiqiao Chen, Jinjing An, Lei He, Lirong Zheng, and Zhuo Zou. An iot-based intelligent irrigation system with data fusion

- and a self-powered wide-area network. *Journal of Industrial Information Integration*, 29:100367, 2022.
- [70] Mengting Chen, Yuanlai Cui, Xiaonan Wang, Hengwang Xie, Fangping Liu, Tongyuan Luo, Shizong Zheng, and Yufeng Luo. A reinforcement learning approach to irrigation decision-making for rice using weather forecasts. *Agricultural Water Management*, 250:106838, 2021.
- [71] Rafael González Perea, Emilio Camacho Poyato, Pilar Montesinos, and Juan Antonio Rodríguez Díaz. Optimisation of water demand forecasting by artificial intelligence with short data sets. *Biosystems Engineering*, 177:59–66, 2019. Intelligent Systems for Environmental Applications.
- [72] Khadijeh Alibabaei, Pedro D. Gaspar, Eduardo Assunção, Saeid Alirezazadeh, and Tânia M. Lima. Irrigation optimization with a deep reinforcement learning model: Case study on a site in portugal. *Agricultural Water Management*, 263:107480, 2022.
- [73] Laura García, Lorena Parra, Jose 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*, 20:1042, 02 2020.
- [74] Abioye Emmanuel, Oliver Hensel, Travis Esau, Olakunle Elijah, Mohamad Shukri Zainal Abidin, Ajibade Sylvester, Omosun Yerima, and Abozar Nasirahmadi. Precision irrigation management using machine learning and digital farming solutions. *AgriEngineering*, 4:70–103, 02 2022.
- [75] Ravneet Kaur Sidhu, Ravinder Kumar, and Prashant Singh Rana. Machine learning based crop water demand forecasting using minimum climatological data. *Multimedia Tools and Applications*, 79(19-20):13109–13124, January 2020.
- [76] Mohammad Emami, Arman Ahmadi, Andre Daccache, Sara Nazif, Sayed-Farhad Mousavi, and Hojat Karami. County-level irrigation water demand estimation using machine learning: Case study of california. *Water*, 14(12), 2022.

Ringraziamenti

Optional. Max 1 page.