



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI

Corso di Laurea in
Valorizzazione e Tutela dell'Ambiente e del Territorio Montano

AGROSENSEBOT – ROBOT AUTONOMO PER TRATTAMENTI IN
VIGNA

Relatore: Prof. Davide Facchinetti

Correlatore: Ing. Enrico Piazza

Elaborato finale di:

Michele Fiallo

Matricola 00749A

Anno Accademico 2023/2024

Riassunto

L'elaborato finale sviluppa e sperimenta AgroSenseBot, una piattaforma robotica agricola innovativa. Il robot è progettato per adattarsi a diverse condizioni operative e colture, con la capacità di regolare larghezza e altezza per lavorare in vigneti, frutteti e serre. La tecnologia integra un atomizzatore per trattamenti fitosanitari e sensori avanzati (LIDAR, RTK, IMU) per rilevare e gestire la vegetazione, grazie a ciò AgroSenseBot è in grado di navigare autonomamente e regolare il flusso di fitofarmaci in base al volume delle chiome, riducendo sprechi e migliorando l'efficienza del trattamento. L'elaborato si incentra sullo sviluppo del robot per i trattamenti in vigneto, una delle operazioni più importanti e delicate per quanto riguarda la coltivazione della vite, diversi sono i problemi che si possono riscontrare in campo, essi possono essere di natura abiotica e biotica e causano ingenti danni alle piante e alla produzione. Diversi test sono stati eseguiti per valutare la capacità del robot di adattarsi a differenti ambienti e valutare l'integrazione dei sensori avanzati. Uno dei test iniziali ha coinvolto il controllo della capacità del robot di percorrere un tracciato lineare autonomo e la verifica dell'accuratezza della propulsione e del posizionamento. Altri test hanno analizzato la capacità di curvatura del robot, cruciale per operare tra i filari, e il dosaggio del fitofarmaco in base al volume di vegetazione rilevato dal LIDAR. Le simulazioni 3D hanno dimostrato come il robot riesca a regolare l'apertura e chiusura degli ugelli in base alla vegetazione effettivamente presente, evitando sprechi e ottimizzando l'uso dei prodotti fitosanitari. AgroSenseBot è inoltre dotato di un sistema di controllo a distanza per consentire un intervento manuale in caso di arresto di emergenza. I test sul campo hanno mostrato la precisione del robot nell'individuare ostacoli e correggere la traiettoria per evitare collisioni, inoltre il sistema di navigazione del robot sfrutta algoritmi avanzati di intelligenza artificiale per adattarsi a vari ambienti agricoli. In sintesi, l'elaborato finale dimostra il potenziale di AgroSenseBot per rendere più efficienti e sostenibili le operazioni agricole, riducendo l'impiego di fitofarmaci, migliorando la precisione del trattamento e ottimizzando il tempo di lavoro. Il robot rappresenta un passo avanti significativo nella robotica agricola, con ampie possibilità di applicazione in diversi contesti.

Sommario

Introduzione.....	5
Origini dell'agricoltura di precisione	7
Automazione di precisione.....	8
Le macchine irroratrici.....	10
Componenti fondamentali delle macchine irroratrici	14
Telaio	14
Serbatoio	16
Pompa.....	18
Sistemi di filtrazione, Dispositivi Anti-goccia e Strumenti di Misura	23
Ugelli.....	26
Dotazione macchine irroratrici e direttive europee	27
Leggi sull'impiego dei fitofarmaci e trattamenti fitosanitari	29
Prospettive future per la viticoltura	31
Telerilevamento, sistemi a controllo remoto e sensori	32
Radiazione elettromagnetica	34
Telerilevamento nel dominio ottico	35
Infrarosso termico.....	36
Telerilevamento nel dominio delle microonde.....	37
Satelliti.....	38
Catena di elaborazione dei dati	39
Viticultura di precisione.....	39
Fenologia e ciclo di sviluppo	40
Principali problematiche e patologie	43
Trattamenti fitosanitari principali	44
Scopo del lavoro.....	50
Materiali e Metodi.....	51
Sensori impiegati	52
Software	54
Framework.....	56
Server di navigazione	56
Raccolta ed elaborazione dati.....	57
Tenuta di carreggiata lungo filare	58
Raggio di curvatura	64
Simulazione 3D di un trattamento fitosanitario	65
Sperimentazione del sensore Lidar in campo	69

Conclusioni	70
Bibliografia	72
Ringraziamenti	79

Introduzione

Il Manuale di OSLO, pubblicato dall'OCSE, definisce l'innovazione come “un prodotto o un processo nuovo o migliorato (o una loro combinazione) che differisce in modo significativo dai precedenti prodotti o processi dell'unità e che è stato reso disponibile ai potenziali utenti (prodotto) o messo in uso dall'unità (processo).” Come spiega Rogers (1962) l'innovazione viene comunicata attraverso determinati canali, nel tempo, fra i membri di un sistema sociale. Si identifica per tanto una velocità con cui i differenti individui, all'interno di un sistema sociale, adottano un'innovazione, ovvero le innovazioni percepite come più vantaggiose, compatibili, possibili ad essere testate, osservabili e con minore complessità verranno adottate più velocemente. Nell'ultimo secolo sono stati fatti grandi passi avanti dalla società, in particolare in ambito agricolo, per migliorare il benessere globale, purtroppo però una grossa fetta della popolazione mondiale soffre ancora la fame, causata da mancanza di lavoro, guerre in corso e cambiamento climatico. Le sfide per il futuro sono tante, a partire dalle previsioni della crescita della popolazione mondiale, che nonostante il tasso di crescita sia in calo, si stima comunque in Africa e Asia, si avrà per i prossimi anni ancora un forte aumento.

Le sfide principali individuate dalla FAO che a partire dal 2020 con scadenza il 2030 dovranno essere affrontate sono le seguenti:

- Crescita della popolazione, urbanizzazione e l'invecchiamento
- Crescente competizione per le risorse naturali
- Cambiamento climatico
- Produttività agricola e innovazione
- Parassiti e malattie transfrontaliere
- Conflitti, crisi e disastri naturali
- Povertà, iniquità e sicurezza alimentare
- Nutrizione e salute
- Cambiamento dei sistemi alimentari
- Sprechi alimentari
- Sviluppo finanziari in agricoltura

Vari sono i modi in cui l'agricoltura di precisione è stata definita, a partire dalla più comune e utilizzata, cioè quella di Gebbers e Adamchuk nel 2010: “fare la cosa giusta, al posto giusto nel momento giusto”, la definizione incarna pienamente ai minimi termini lo scopo della

AP, migliorare l'efficienza utilizzando meno risorse possibili per ottenere lo stesso risultato, od ottenere un risultato migliore a parità di utilizzo di input. Secondo una definizione più estensiva di AdP, questa può essere descritta come “una gestione aziendale (agricola, ma anche forestale e zootecnica) basata sull'osservazione, la misura e la risposta dell'insieme di variabili quanti-qualitative inter ed intra-campo che intervengono nell'ordinamento produttivo. Ciò al fine di definire, dopo analisi dei dati sito-specifici, un sistema di supporto decisionale per l'intera gestione aziendale, con l'obiettivo di ottimizzare i rendimenti nell'ottica di una sostenibilità avanzata di tipo climatico e ambientale, economico, produttivo e sociale”. Come evidenziato da Auernhammer e Demmel (2016), l'Agricoltura di Precisione può essere considerata una tra le diverse tipologie di gestione di precisione del territorio (precision land management). Quella di Pierce e Novak (1999) sinteticamente riporta: “un sistema che fornisce gli strumenti per fare la cosa giusta, nel posto giusto, al momento giusto”, dove per "cosa giusta" si intende un intervento agronomico. In realtà, le recenti innovazioni tecnologiche portano ad un ampliamento delle opportunità di applicazione e, pertanto, tale definizione si può estendere. Il National Research Council americano (1997) invece la definisce: “Una strategia che usa le tecnologie d'informazione per integrare dati provenienti da più strati informativi ai fini decisionali per la gestione dei sistemi agricoli”. Non bisogna confondere l'Agricoltura di Precisione con l'informatizzazione o con l'introduzione di tecnologie elettroniche o di sensoristica nell'intera azienda agraria o nei singoli processi produttivi. L'agricoltura di precisione consiste nell'utilizzo di diverse tecnologie per monitorare e gestire la variabilità spaziale e temporale che caratterizza i vari aspetti della produzione agricola. L'obiettivo principale è ottimizzare l'efficienza produttiva e ridurre gli effetti negativi sull'ambiente. I requisiti fondamentali sulla quale si basa l'agricoltura di precisione sono innanzitutto un posizionamento geografico, grazie a sensori GPS, GNSS e GLONASS; e l'informazione geografica tramite strumenti come GIS che permettono l'utilizzo di mappe satellitari. Il secondo requisito fondamentale è l'impiego di macchine dotate di guida assistita o semiautomatica, il terzo è l'acquisizione di dati specifici attraverso sensori (remoti, satellitari/aerei o prossimali). La quarta è in costante evoluzione, cioè l'individuazione della risposta agronomica ed applicazione (attuatori per il dosaggio variabile, il controllo delle sezioni, i sistemi di guida, ecc.). (Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali).

Origini dell'agricoltura di precisione

Le principali tappe dello sviluppo dei sistemi agricoli: a partire dagli anni 50' con l'attenzione verso la massimizzazione della produzione a cui è seguita la "Green Revolution", definita anche come Agricoltura 2.0 (1920-1960) aveva come scopo la motorizzazione, l'introduzione e la diffusione delle innovazioni relative ai trattori (motore diesel, attacco a tre punti, pneumatici), ma la manodopera manuale era ancora preminente; l'agricoltura 3.0 (1990-2010) è basata sui sistemi di guida dei trattori, sui sensori e sui monitor di resa, sulla telematica e sulla gestione dei dati; l'attuale Agricoltura 4.0 (dal 2010) basata su sensori più economici e migliorati, microprocessori a basso costo, banda larga, sistemi ICT basati su cloud e analisi dei big data, si prefigge di ottimizzare l'efficienza produttiva, la qualità delle produzioni e dei processi, minimizzare non solo l'impatto ambientale ma anche i rischi per gli operatori e la collettività. L'agricoltura 5.0 prevede il consolidamento dell'elettronica e dell'automazione, diffusione dei sensori per il monitoraggio delle attività e dei sistemi di posizionamento a bordo dei trattori, protocolli di comunicazione tra i diversi dispositivi, deep learning per aumentare la produttività agricola. (stefano Cesco, et al., 2023).

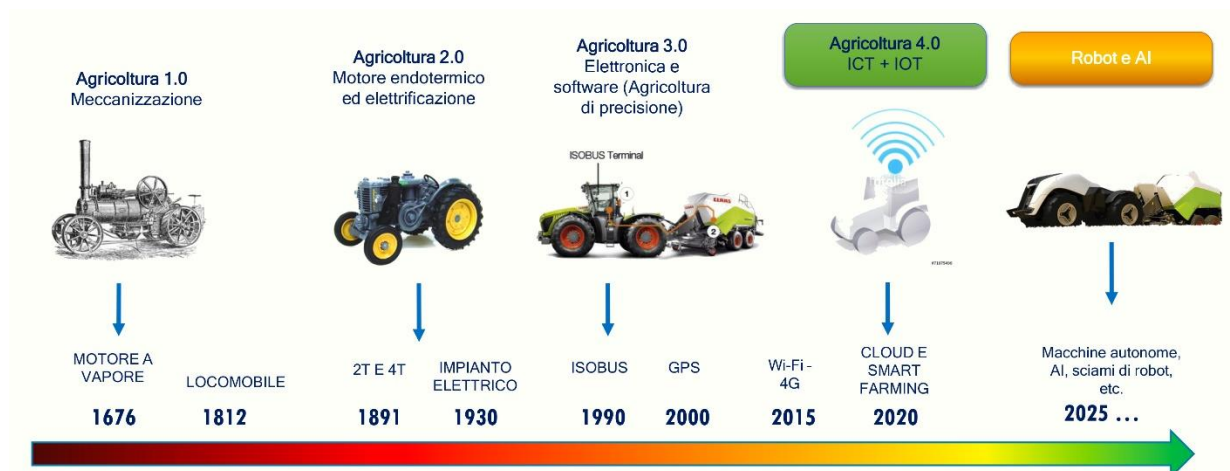


Figura 1: Linea temporale dell'evoluzione della meccanizzazione in agricoltura (Feder Unacoma)

L'agricoltura di precisione offre l'opportunità di rispondere alle mutevoli condizioni climatiche e al crescente costo delle sementi e degli altri input agricoli, che riducono la redditività delle aziende agricole a livello globale (Crowder e Reganold, 2015). Nei prossimi dieci anni, la nuova generazione di agricoltura di precisione sarà caratterizzata da cloud e

mobile computing ad alte prestazioni, analisi intensiva dei big data, percezione artificiale intelligente, controllo e automazione in tempo reale.

Automazione di precisione

Tenendo conto di quanto sopra, le tecnologie dell'AdP possono essere suddivise in due grandi categorie:

A) Relative alla guida assistita/semi-automatica: consentono alle macchine memorizzare i tragitti percorsi e replicarli in modo tale da evitare sovrapposizioni e garantire maggior efficienza delle operazioni a prescindere dall'operatore; tale tecnologia determina un aumento della capacità di lavoro delle macchine, la riduzione della fatica degli operatori, la drastica riduzione dei consumi di gasolio e dei costi di esercizio delle macchine in generale, quindi, la forte riduzione degli "sprechi" dei fattori di produzione (fitofarmaci, fertilizzanti, sementi) nonché degli effetti negativi dei sovradosaggi.

La guida assistita può essere:

- Guida assistita passiva che consiste nell'indicare al conducente tramite segnali visivi la direzione ottimale da seguire, per evitare sovrapposizioni con la passata precedente, può essere definito come l'evoluzione moderna dello schiumogeno delle barre irroratrici. Rimane comunque un sistema basato sul controllo totale dell'uomo e vanta una precisione dai 10 ai 50 cm.
- Guida assistita attiva prevede un'azione diretta sullo sterzo, tramite un attuatore cilindrico collegato al volante, tramite ciò si ha una correzione continua e in tempo reale sulla direzione del trattore. Il vantaggio di questo sistema è che permette di essere utilizzato su trattori differenti, semplicemente smontandolo e rimontandolo.
- Guida semi-automatica sono sistemi ancora più evoluti di guida autonoma già installati nel motore, che permettono una risposta allo sterzo maggiore e più precisa, permette di compiere manovre di routine in automatico, anche in questo caso però, la presenza del conducente rimane fondamentale per manovre più complesse e soprattutto emergenze.
- Guida autonoma sono sistemi che permettono l'assenza dell'operatore alla guida, non sono considerati robot intelligenti ma sono dotati delle più avanzate

tecnologie di navigazione per compiere percorsi già tracciati in maniera precisa e completamente autonoma.

- Trattori-robot sono sistemi dotati di guida completamente autonoma, non richiedono l'intervento dell'uomo in campo, sono dotate di un sistema di machine learning che permette oltre che a percorrere tratti già tracciati e svolgere le mansioni programmate nella massima precisione possibile, hanno la capacità di "imparare" dagli errori commessi e rielaborarli, per non compierli più al passaggio successivo. (D. Pessina, et al.,2021)

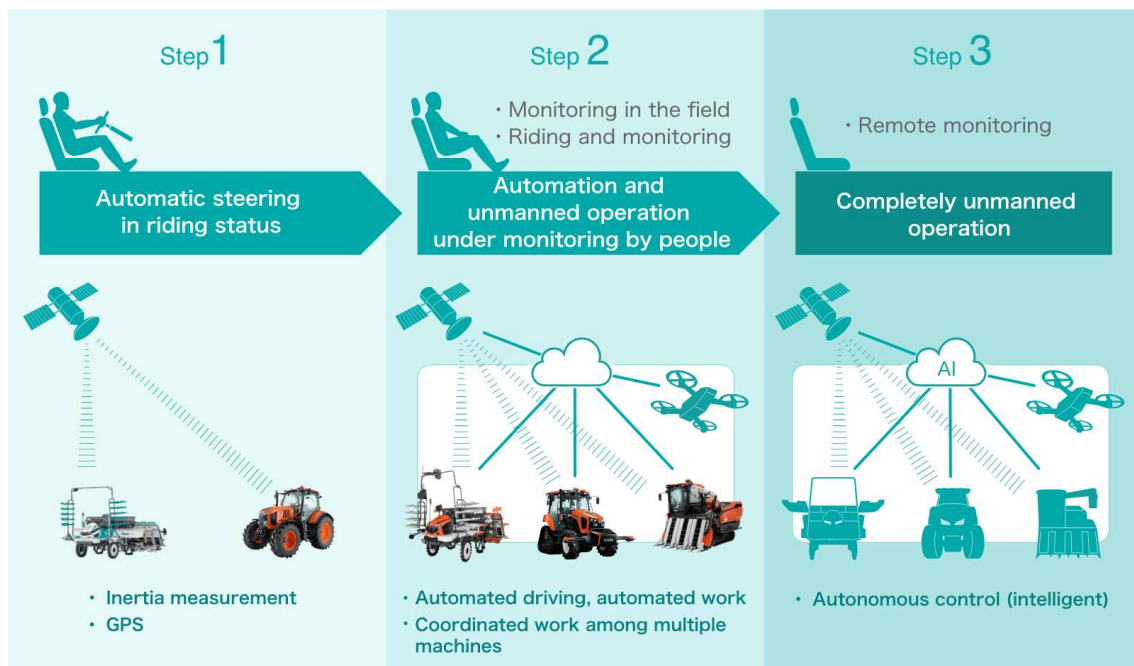


Figura 2: Foto che rappresenta i livelli di automazione delle macchine agricole (Kubota.com)

B) Il dosaggio variabile dei fattori produttivi permette di adattare l'apporto di risorse in base alle specifiche esigenze delle colture e alle caratteristiche del suolo. Questo approccio porta a una maggiore efficienza nell'uso delle risorse, riduce gli sprechi e di conseguenza l'inquinamento, oltre a massimizzare la resa agricola nelle condizioni disponibili. Il processo si articola in quattro fasi: raccolta dei dati (ambientali, produttivi, pedologici, meccanici, ecc.), analisi, decisione/azione e controllo. Questi passaggi sono fondamentali per gestire in modo sostenibile risorse come fertilizzanti, sementi, prodotti fitosanitari, combustibili, acqua e suolo, attraverso il controllo delle attrezzature che le applicano (Giuseppe Blasi, et al., 2015)

Le macchine irroratrici

Una prima distinzione utile tra queste macchine può essere fatta in base al loro utilizzo: alcune sono destinate a colture erbacee, altre a colture arboree. Nel caso delle colture erbacee, la distribuzione avviene generalmente dall'alto verso il basso, sfruttando la forza di gravità che facilita il raggiungimento del bersaglio da parte delle gocce rilasciate dalla macchina.



*Figura 3: Macchina irroratrice per colture erbacee
(Macchine Agricole)*

Per le colture arboree, invece, la distribuzione avviene solitamente dal basso verso l'alto o in modo quasi orizzontale, il che rende la forza di gravità un ostacolo che le gocce devono superare.



*Figura 4: Macchina irroratrice per colture arboree
(Maier Group).*

Nonostante queste differenze, le macchine condividono molte componenti comuni, che è importante conoscere in dettaglio per fare scelte corrette durante l'acquisto o la regolazione.

(Cristiana Baldoiu, 2014) Questo garantisce un funzionamento ottimale, minimizzando al contempo la dispersione indesiderata di sostanze attive nell'ambiente.

Una tipologia di classificazione riguarda la distinzione dei meccanismi di formazione delle gocce e le modalità di trasporto delle stesse sulla vegetazione. Combinando i due parametri, possiamo classificare irroratrici: a pressione: usualmente troviamo le irroratrici a barra per colture erbacee; ad aeroconvezione: principalmente impiegata nelle colture arboree e quelle per colture erbacee munite di manica d'aria; pneumatiche: relativamente impiegate quasi esclusivamente in viticoltura.

Dal punto di vista tecnico, in base alla tipologia di polverizzazione, le macchine irroratrici si possono sinteticamente classificare come:

- Macchine a polverizzazione meccanica

Le macchine a polverizzazione meccanica si dividono in due tipologie: a getto proiettato, tipiche delle barre irroratrici, e a getto portato, come gli atomizzatori, utilizzati per le colture arboree. Questi ultimi impiegano un ventilatore per trasportare le goccioline verso la vegetazione, operando a pressioni elevate e velocità d'aria superiori a 200 km/h, migliorando la penetrazione delle gocce. Le barre irroratrici con manica d'aria, inoltre, utilizzano una corrente d'aria aggiuntiva per ottimizzare la distribuzione dei liquidi e ridurre la deriva, risultando efficaci per trattamenti su colture avanzate (Pessina, n.d.). La citazione fornisce una panoramica chiara e concisa delle macchine a polverizzazione meccanica, evidenziando le loro due principali tipologie e i meccanismi di funzionamento. L'uso di ventilatori per il trasporto delle goccioline e l'operazione a pressioni elevate sono aspetti cruciali che garantiscono una distribuzione efficace e mirata dei trattamenti. Inoltre, l'inclusione delle barre irroratrici con manica d'aria sottolinea come queste tecnologie possano migliorare l'efficienza dei trattamenti, riducendo al contempo il rischio di deriva, un aspetto importante per la sostenibilità ambientale. Questo approccio innovativo risponde alle esigenze delle colture in fase avanzata, contribuendo così a ottimizzare la protezione delle piante.

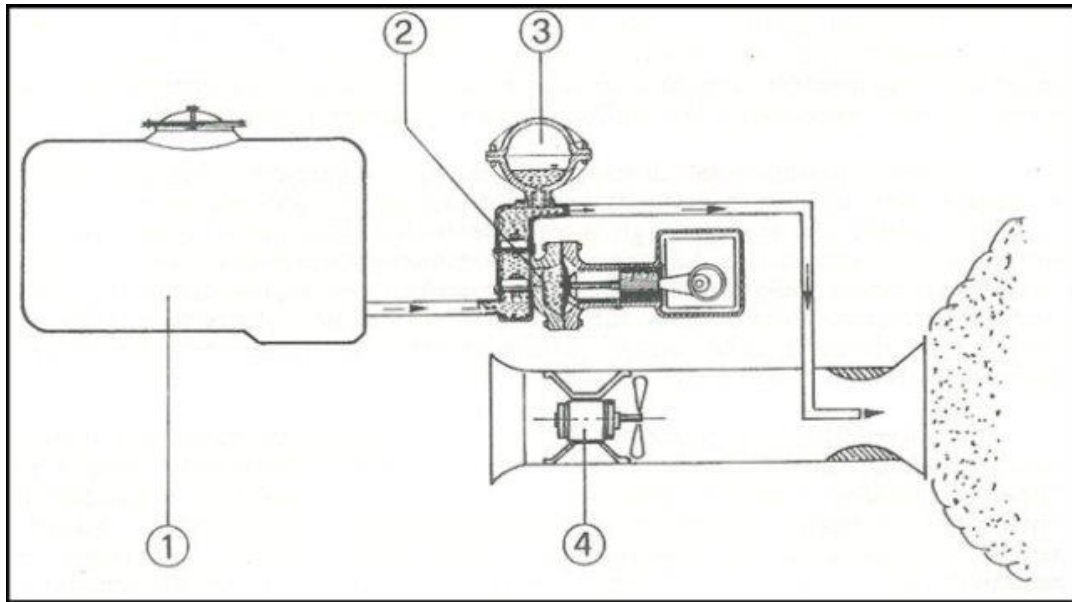


Figura 5: Polverizzatore meccanico (Paolo Amirante)

- Macchine a polverizzazione pneumatica

Le macchine a polverizzazione pneumatica utilizzano una corrente d'aria per nebulizzare e trasportare il liquido, generata da un ventilatore assiale ad alta velocità (80-160 m/s). Questo sistema garantisce una distribuzione uniforme delle gocce, comprese tra 50 e 300 μm , che variano inversamente alla velocità dell'aria. Grazie alla loro capacità di penetrare nella vegetazione, sono particolarmente adatte per trattamenti fungicidi e insetticidi su colture arboree. Tuttavia, richiedono trattrici potenti a causa dell'elevato assorbimento del ventilatore assiale (Pessina, nd).

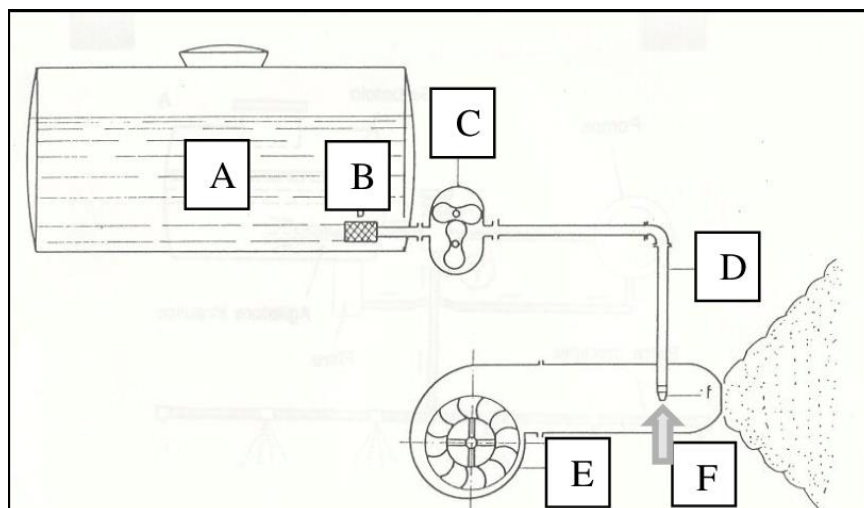


Figura 6: Polverizzatore pneumatico (Paolo Amirante)

- Macchine a polverizzazione centrifuga

Questi meccanismi basati su dischi rotanti offrono un alto livello di precisione e flessibilità nelle operazioni di irrorazione, consentendo un'applicazione mirata e ottimizzata dei prodotti fitosanitari.

Le macchine utilizzano un disco rotante ad alta velocità per frammentare il liquido in gocce uniformi, la cui dimensione varia in base alla velocità del disco e al flusso di liquido. Questa tecnologia, adatta per volumi ridotti e con eccellente uniformità delle gocce, può essere combinata con cariche elettrostatiche per aumentare l'efficacia del trattamento, sebbene il suo utilizzo su larga scala sia limitato dai costi elevati (Facchinetti, n.d.).

Si tratta al momento di un sistema per lo più applicato in combinazione con la polverizzazione pneumatica della miscela (atomizzatori pneumatici) che presenta l'indiscutibile vantaggio di diminuire in maniera piuttosto consistente il fenomeno della deriva, specie in presenza di quantità elevate di vegetazione. Il rovescio della medaglia è costituito dal fatto che con il sistema elettrostatico attivato risulta più difficile effettuare distribuzioni mirate all'interno di vegetazioni molto spesse, ad esempio sull'uva per colpire solamente i grappoli, in quanto le particelle liquide caricate elettrostaticamente dimostrano una maggiore attitudine ad aderire alle parti esterne della vegetazione trattata.

Può essere presentata una ulteriore classificazione di macchine irroratrici:

1. **atomizzatori:** ricoprono totalmente le piante con gocce fini, in particolare vengono impiegati nei frutteti;
2. **nebulizzatori:** realizzano una nube estremamente fitta che riesce a penetrare anche nelle zone della pianta più complesse da trattare;
3. **pompe a spalla:** la loro peculiarità è la portabilità e la precisione di intervento, proprio per questo sono utilizzati in piccoli appezzamenti di terreno o colture di piccola estensione;
4. **irrigatori:** sfruttando lo stesso meccanismo impostato per l'irrigazione, il prodotto fitosanitario viene diluito nell'acqua d'irrigazione;
5. **droni:** l'uso di droni per l'applicazione di prodotti fitosanitari riguarda volare su aree ampie o difficili da raggiungere ed eseguire un'applicazione mirata dei prodotti; qui occorre specificare che ad oggi, in Italia, l'impiego dei fitosanitari con droni è equiparato per legge ai trattamenti con aeromobili, e deve quindi essere autorizzato

in deroga dai servizi fitosanitari regionali. Per questa ragione, di fatto, rimane difficilissimo impiegarli per distribuire fitofarmaci (Certificazione CE, 2023).



*Figura 7: Drone applicato in agricoltura di precisione
(aapsky - Adobe Stock)*

Componenti fondamentali delle macchine irroratrici

Una conoscenza approfondita del funzionamento e delle caratteristiche delle macchine irroratrici è essenziale per scegliere con criterio la macchina più adatta alle specifiche esigenze. Tale conoscenza permette inoltre di effettuare le regolazioni più opportune, massimizzando l'efficienza operativa e minimizzando l'impatto ambientale.

In questo capitolo verranno illustrati i componenti fondamentali delle macchine irroratrici.

Telaio

Il telaio è composto da profilati metallici in acciaio e fornisce principalmente supporto a tutti i componenti essenziali della macchina. È necessario che il telaio venga sottoposto a trattamenti anticorrosione, a causa della corrosività dei prodotti fitosanitari. Nella parte anteriore, solitamente, è dotato di un gancio per il collegamento degli attrezzi trainati al trattore, o di attacchi standard per il collegamento all'attacco a tre punti del trattore nel caso delle attrezzature portate.



Figura 8: Telaio a carreggiata variabile di Agrosensebot

Nelle macchine irroratrici per colture erbacee, conosciute come "barre irroratrici," è presente un'ulteriore struttura metallica chiamata barra, che si può trovare in varie dimensioni. Questa barra è generalmente suddivisa in sezioni e ospita i componenti (gli ugelli) che atomizzano la miscela per produrre le gocce e le tubazioni necessarie per la loro alimentazione.

Un accessorio utile tipico delle barre irroratrici è il marcatore di schiuma o schiumogeno. Questo dispositivo adagia a terra agglomerati di schiuma alle estremità della barra, indicando al conducente, al momento della svolta a fine campo, quale porzione di terreno è già stata trattata, così in questo modo, si evitano sovrapposizioni del trattamento e effetti dannosi alla coltura e all'ambiente (Facchinetti D., nd)

L'ultima evoluzione sul tema mostra l'utilizzo sempre più insistente dell'elettronica che, grazie soprattutto all'implementazione dell'utilizzo dei segnali satellitari consente di conoscere istante per istante la posizione esatta della macchina, con un delta di precisione che può arrivare a 2 cm, essa permettere inoltre alla centralina elettronica di aprire e chiudere automaticamente ogni singolo ugello per limitare il più possibile dannose sovrapposizioni anche in presenza di campi con forme irregolari.

Serbatoio

Il serbatoio delle macchine irroratrici, progettato per contenere la miscela da distribuire, può variare in forma e materiale in base al tipo di irroratrice. I materiali comunemente utilizzati includono vetroresina, polietilene e poliestere, noti per la loro resistenza alla corrosione e facilità di riparazione. L'acciaio inossidabile è invece usato per prodotti chimici altamente aggressivi. È importante che il serbatoio abbia una conformazione priva di spigoli per facilitare la pulizia e prevenire la formazione di sacche stagnanti che causerebbero la separazione del principio attivo dalla miscela.

Per mantenere omogenea la miscela, sono installati sistemi di agitazione all'interno del serbatoio. Sebbene un tempo fossero diffusi agitatori meccanici con palette o eliche collegate alla presa di potenza della trattrice, oggi sono quasi completamente sostituiti da agitatori idraulici. Questi sfruttano il ricircolo della miscela in eccesso attraverso la pompa, che alimenta gli ugelli e reimmette la miscela nel serbatoio per favorire una miscelazione continua. Inoltre, l'efficacia di questi sistemi può essere potenziata dall'uso di dispositivi basati sul principio del tubo di Venturi, che aumenta ulteriormente la miscelazione e uniformità della miscela all'interno del serbatoio.

Il serbatoio principale di una macchina irroratrice per quanto riguarda piccoli modelli portati a spalla ha una capienza compresa tra 10 e 25 litri, mentre per le macchine da collegare ai motocoltivatori si ha capacità di 150-300 litri. Nei modelli portati dai trattori si hanno in media dai 300 ai 1000 litri mentre per i modelli trainati si hanno capacità che vanno mediamente dai 600 ai 3.000 litri. Il serbatoio principale è generalmente provvisto di un



Figura 9: Serbatoio di AgrosenseBot di capienza 300 l

indicatore di livello per la misurazione della quantità di liquido presente; il livello viene determinato o con un galleggiante abbinato ad un indicatore esterno posto sopra il serbatoio o sul serbatoio stesso, oppure per mezzo di una banda laterale traslucida munita di scala graduata.

Nelle macchine irroratrici più moderne, dotate di sistemi elettronici per il controllo della portata (DPA), è generalmente integrato un sistema di controllo elettronico avanzato. Questo sistema, tramite sensori a galleggiante o celle di carico, consente di visualizzare il livello della miscela su display collocati nella postazione di guida e interfacciati con i sistemi elettronici di controllo della distribuzione (Pessina, nd)

Il serbatoio principale delle macchine irroratrici, oltre a contenere la miscela da distribuire, presenta un'apertura superiore dotata di un filtro a maglie larghe, chiamato "filtro a panierino", che previene l'ingresso di detriti come foglie o sabbia, evitando danni al sistema di pompaggio o ostruzioni nei tubi. Alcuni modelli dispongono di sistemi di riempimento ausiliari, come idro-iniettori o pompe centrifughe autoadescanti, che permettono di prelevare acqua da fonti esterne, con sistemi anti-reflusso per evitare contaminazioni.



Figura 10: Serbatoi con acqua pulita di

Inoltre, le macchine più moderne includono serbatoi supplementari, come il serbatoio lavamacchina, che contiene acqua pulita (almeno il 10% della capacità del serbatoio principale) per effettuare un lavaggio sul campo dopo il trattamento. Questa pratica riduce i

residui di miscela e aumenta la frequenza dei risciacqui, mantenendo l'attrezzatura in efficienza. Un'altra opzione è il serbatoio di premiscelazione, che consente di preparare la miscela in modo sicuro, minimizzando il contatto dell'operatore con i prodotti concentrati e semplificando le operazioni. Questi sistemi rendono le macchine più sicure, efficienti e facili da mantenere, migliorando l'efficacia dei trattamenti e riducendo il rischio di contaminazioni.

Quando possiede un idro-eiettore nella parte sommitale è possibile anche effettuare una rapida ed efficace pulizia dei contenitori di agrofarmaci semplificandone il successivo smaltimento. Si rammenta che per effettuare un ottimo lavaggio del contenitore questo deve essere risciacquato almeno tre volte e l'acqua proveniente da tale operazione deve essere immessa nel serbatoio principale. Per evitare contaminazioni successive alla fase di riempimento è bene porre attenzione affinché durante l'effettuazione del rifornimento di acqua il tubo di riempimento che porta l'acqua al serbatoio non venga mai a contatto con il liquido posto all'interno della cisterna. Si consiglia di immettere nella cisterna solamente la quantità di acqua e di formulato necessaria per effettuare il trattamento, lasciando inutilizzato un volume di circa il 10-20% della capacità del serbatoio per evitare sversamenti accidentali in presenza di buche o avvallamenti. Per consentire un'elevata durata ai serbatoi è necessario che la macchina sia posta a riposo in luogo innanzitutto riparato dal sole (i raggi u.v.a. contribuiscono ad invecchiarlo precocemente) e, se possibile, poco soggetto al verificarsi di gelate o cospicui sbalzi di temperatura.

Una ulteriore tipologia di serbatoio accessorio è il serbatoio lavamani, utile all'operatore in caso di contaminazione o contatto con il prodotto fitosanitario, il serbatoio è provvisto di acqua pulita e viene erogato da un rubinetto a lato del serbatoio.

Pompa

La pompa ha il compito di mettere in pressione il liquido nel circuito idraulico, assicurando così una pressione e una portata adeguata a ottenere la polverizzazione della miscela, ossia la fase di creazione delle gocce. Nella maggior parte dei casi, la pompa è azionata dalla presa di potenza (P.d.P.) del trattore, tuttavia, nelle macchine con distribuzione proporzionale alla velocità di avanzamento a controllo meccanico, la pompa viene azionata dal movimento di una delle ruote dell'irroratrice tramite ingranaggi e/o giunti cardanici.

Nel caso più comune delle macchine che utilizzano pompe centrifughe, tipiche delle macchine a polverizzazione pneumatica per trattamenti su colture arboree, maggiormente note come "nebulizzatori" o "atomizzatori a basso volume", il moto alla pompa può essere fornito anche dal circuito idraulico del trattore tramite gli attacchi idraulici. Pochi sono i casi in cui può essere presente una pompa ad azionamento elettrico, tipica di piccole macchine accoppiate a seminatrici che utilizzano un numero limitato di ugelli a bassa portata e che quindi richiedono basse portate (Facchinetti D., nd)

Oltre a garantire una pressione e una portata sufficienti per alimentare gli ugelli, la pompa deve sempre fornire un consistente surplus di portata (noto anche come ricircolo), che viene continuamente reimmesso nel serbatoio per assicurare una corretta miscelazione della soluzione. La quantità minima che deve rientrare nel serbatoio, espressa in litri al minuto, deve essere pari ad almeno il 10% della capacità del serbatoio principale, per esempio, su un'irroratrice dotata di un serbatoio da 1.000 litri, sarà necessario un ricircolo di almeno 100 litri al minuto.

La pompa deve quindi essere dimensionata tenendo conto della portata richiesta dagli ugelli installati o installabili, a cui va sommata la quantità di ricircolo necessaria per miscelare la soluzione nel serbatoio. Entrambe le esigenze devono essere soddisfatte simultaneamente per garantire la massima efficienza distributiva della macchina e più in generale, è preferibile un ulteriore sovradimensionamento della pompa, in quanto garantisce una buona miscelazione anche operando a regimi parzializzati del motore e quindi della presa di potenza. Se la pompa non è in grado di soddisfare entrambe le esigenze, si rischia di distribuire una soluzione con concentrazioni variabili di principio attivo tra l'inizio e la fine del trattamento, con conseguenze disastrose sulla sua efficacia.

Le pompe più diffuse in campo agricolo sono quelle centrifughe e quelle volumetriche. Le pompe centrifughe si caratterizzano per avere portate elevate (fino a 900 litri al minuto), ma pressioni di esercizio relativamente basse (quelle impiegate sulle macchine irroratrici raggiungono normalmente pressioni massime di 3-4 bar). Queste pompe sono molto semplici e mettono in pressione il fluido mediante la rotazione di una girante dotata di palette. Le pompe centrifughe richiedono minore manutenzione e sono solitamente impiegate su macchine a bassa pressione per la distribuzione di bassi volumi o per operazioni di agitazione della miscela in serbatoi di grandi dimensioni; in alcuni casi, sono presenti sulla macchina

irroratrice come pompe ausiliarie utilizzate per il riempimento del serbatoio principale direttamente dai corsi d'acqua, e in questo caso devono essere di tipo autoadescante.

Nell'uso di queste pompe è necessario assicurarsi che non girino mai in assenza di liquido, cioè a vuoto, poiché diventerebbe molto alto il rischio di una precoce bruciatura degli anelli di tenuta, a causa del riscaldamento. Una caratteristica negativa delle pompe centrifughe è la riduzione della portata in proporzione all'uso; in pompe centrifughe con molti anni di esercizio, la portata massima può ridursi anche del 25%, con conseguenze estremamente negative sulla capacità di garantire un adeguato ricircolo, per ovviare a ciò, i costruttori provvedono normalmente già in fase di progettazione a un congruo sovradimensionamento.

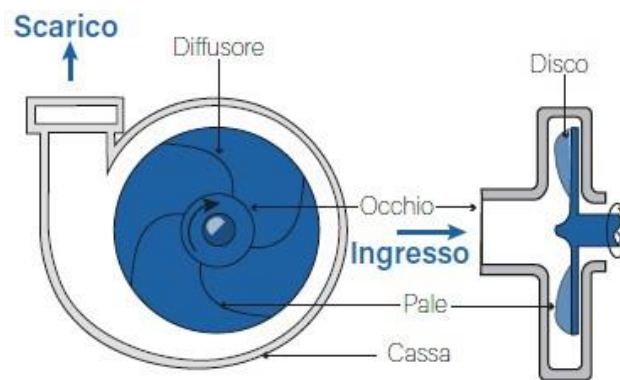


Figura 11: Rappresentazione del funzionamento di una pompa centrifuga (Idro Elettrica)

Le pompe volumetriche sono impiegate sulle macchine che utilizzano dei sistemi di formazione della goccia di tipo meccanico (polverizzazione meccanica della vena liquida), dove è sovente necessario raggiungere pressioni elevate per ottenere un buon livello di polverizzazione, ovvero per riuscire ad ottenere delle dimensioni della goccia medio piccole. Questa tipologia di pompe può raggiungere pressioni anche molto elevate, mentre la loro portata varia in funzione della cilindrata (volume della camera di compressione in cui lavora il cilindro) nonché del numero dei cilindri e del regime di rotazione.

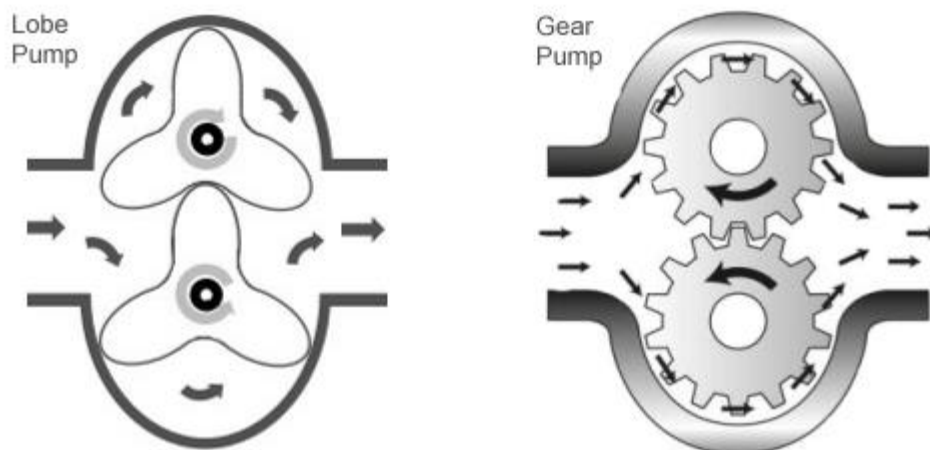


Figura 12: Rappresentazione di pompe volumetriche (Area Tecnica)

Per garantire longevità alle pompe è necessario risciacquarle al termine di ogni trattamento con acqua pulita, affinché non rimangano a contatto con i principi attivi, e controllare frequentemente il livello e il colore dell'olio, circa ogni 20-30 ore di utilizzo. Un colore chiaro e una sua opacizzazione indicano possibili lesioni a qualche membrana, quando si verifica ciò occorre arrestare la pompa e sostituire prontamente le membrane danneggiate per evitare conseguenze peggiori (Pessina, nd). È fortemente consigliato di non utilizzare mai la pompa ad una velocità di rotazione superiore al limite massimo indicato sulla targhetta, solitamente 540 giri/min. Nel periodo invernale, se l'irroratrice viene posta in locali ove la temperatura scende sotto lo zero, per evitare danni da congelamento si consiglia di: immettere una soluzione di acqua e liquido anticongelante nella cisterna; mettere in funzione la pompa per alcuni secondi affinché la soluzione venga distribuita a tutti i componenti della macchina (filtri, pompa, raccordi, antigoccia ecc.).

Per quanto riguarda la portata, sono necessari degli organi di regolazione e controllo, tra i quali: a pressione costante (PC); a pressione variabile e Distribuzione Costante (DC), come i DPM (a Distribuzione Proporzionale al regime Motore e i DPA Distribuzione Proporzionale all'Avanzamento, altri sistemi (CPA) che sta per Concentrazione Proporzionale all'Avanzamento.

I dispositivi a pressione costante mantengono una pressione uniforme indipendentemente dalla portata della pompa, assicurando una distribuzione regolare solo se la velocità di avanzamento è costante. In caso di variazioni, come terreni irregolari o pendenze, si rischia

il sovradosaggio o il sottodosaggio. Al contrario, i dispositivi a pressione variabile, come i sistemi DPM (Distribuzione Proporzionale al regime Motore), adattano la portata degli ugelli in base alla velocità di avanzamento e alla pompa volumetrica, mantenendo costante la distribuzione anche con variazioni del 20% nella velocità. Il sistema DPM regola la quantità di liquido in base al regime del motore, accoppiando l'irroratrice al trattore, garantendo precisione nelle applicazioni.

I dispositivi DPA (Distribuzione Proporzionale all'Avanzamento) funzionano meccanicamente collegando la pompa a una delle ruote dell'irroratrice. La portata viene regolata tramite ingranaggi che modificano il rapporto di trasmissione, adattandosi automaticamente alla velocità della trattrice. Questo sistema assicura che la quantità di liquido distribuito vari in modo proporzionale alla velocità del mezzo, rendendo la distribuzione efficiente anche su terreni con caratteristiche variabili o durante cambiamenti di marcia.

In conclusione, mentre i dispositivi a pressione costante richiedono un'attenzione costante alla velocità di avanzamento, i sistemi a pressione variabile come DPM e DPA offrono maggiore flessibilità e garantiscono una distribuzione più uniforme, adattandosi meglio alle variazioni di velocità e alle condizioni del terreno.

È possibile impiegare sistemi di controllo DPA di tipo elettronico, nei quali la pompa è collegata direttamente alla presa di potenza della trattrice e a una centralina elettronica che controlla la pressione di erogazione agli ugelli utilizzando sensori e dispositivi per la rilevazione della velocità di avanzamento. Tali dispositivi possono includere magneti posizionati sulla ruota del trattore e sensori di prossimità per rilevarne il passaggio, nonché sistemi ottici, radar o GPS.

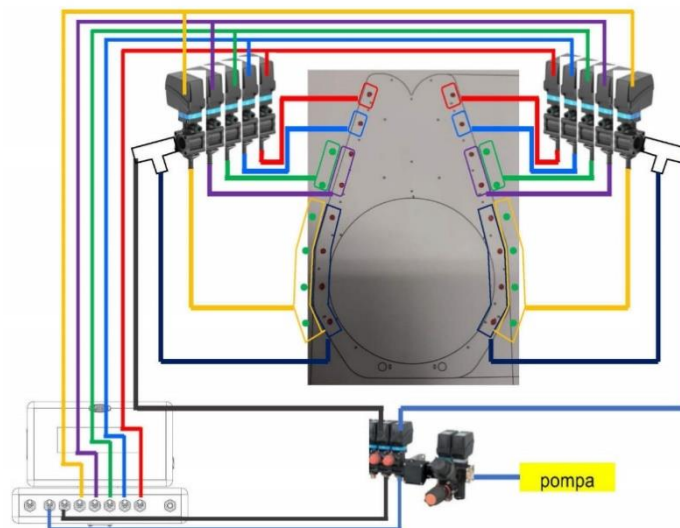


Figura 13: Esempio di schema idraulico per atomizzatore multi-sezione con comando a elettrovalvola (Edagricole, 2023)

I dispositivi CPA (Concentrazione Proporzionale all'Avanzamento) mantengono una pressione costante dell'acqua, mentre il prelievo del formulato avviene tramite una pompa micro-dosatrice proporzionale alla velocità di avanzamento. Questo sistema permette di miscelare il prodotto chimico poco prima della distribuzione, richiedendo solo acqua pulita nel serbatoio. Tra i principali vantaggi si annoverano la costanza del dosaggio, la riduzione del rischio di contatto dell'operatore con il prodotto e la possibilità di regolare la concentrazione in base alle necessità. Inoltre, è possibile la distribuzione simultanea di più formulati liquidi, anche grazie all'optoelettronica che rileva il livello di infestazione. Tuttavia, questi dispositivi non si sono ancora diffusi ampiamente, a causa dell'elevato costo delle attrezzature e della compatibilità limitata con formulati liquidi, più costosi e meno comuni rispetto a quelli in polvere. Inoltre, i contenitori di formulati sul mercato italiano hanno capacità limitata, il che riduce l'autonomia operativa di queste macchine.

Sistemi di filtrazione, Dispositivi Anti-goccia e Strumenti di Misura

I sistemi di filtrazione garantiscono l'eliminazione di particelle solide di varie dimensioni o di altri corpi estranei che potrebbero danneggiare la pompa e causare intasamenti e usura agli ugelli. I filtri sono realizzati con reti in nylon o metalliche, montate su un telaio in materiale plastico o in acciaio inox. Una caratteristica fondamentale dei filtri è la dimensione delle maglie, che deve variare in base alla funzione e al tipo di ugelli utilizzati, infatti nella

sceita del filtro, è importante considerare che all'aumento della densità delle maglie corrisponde un aumento della perdita di pressione a valle del filtro stesso.

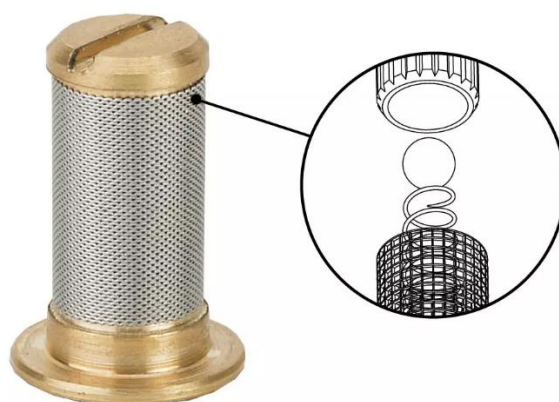


Figura 14: Filtro metallico per ugello (SuperAgri)

Un filtro, noto come "filtro di aspirazione", è solitamente presente sul tubo di aspirazione che trasporta il liquido dal serbatoio alla pompa, con la funzione di impedire il passaggio di particelle che potrebbero danneggiare la pompa; la dimensione delle sue maglie è tipicamente compresa tra 0,3 e 2 mm (Facchinetti D, nd). Data la probabilità di intasamenti in prossimità del filtro principale, spesso causati dalla scarsa compatibilità tra diversi prodotti utilizzati contemporaneamente, è necessario poter effettuare la pulizia del filtro di aspirazione anche con il serbatoio a pieno carico.

Dispositivi anti-goccia

I dispositivi anti-goccia sono progettati per prevenire la percolazione di liquido dagli ugelli una volta interrotta l'alimentazione e il loro funzionamento è basato su un semplice meccanismo, sebbene esistano anche varianti meno comuni in cui il funzionamento avviene per aspirazione, rendendoli di tipo pneumatico, tuttavia, la velocità di intervento dei sistemi pneumatici è inferiore rispetto a quella dei più diffusi dispositivi meccanici. Gli anti-goccia meccanici rappresentano la tipologia maggiormente impiegata e sono costituiti essenzialmente da una molla calibrata, questa molla è in grado di chiudere il condotto che trasporta il liquido verso l'ugello quando la pressione di esercizio scende al di sotto di determinati valori (normalmente compresi tra 0,4 e 0,5 bar). A seconda del sistema di chiusura del tubo adduttore, gli anti-goccia meccanici possono essere classificati in due categorie: a valvola a sfera o a membrana. Nei dispositivi a membrana, la molla non entra

mai in contatto con la miscela da distribuire, garantendo così una maggiore durata del dispositivo, questa caratteristica permette di preservare l'integrità e l'efficienza del sistema anti-goccia nel tempo, con ulteriori vantaggi di riduzione della necessità di manutenzione e di sostituzioni frequenti.

Strumenti di misura

Gli strumenti di misura, come manometri, flussimetri, trasduttori di pressione e sensori di velocità, sono cruciali per garantire una corretta distribuzione dei prodotti fitosanitari sulle macchine irroratrici. Tra questi, il manometro è il più comune e permette all'operatore di controllare la pressione del circuito e la portata del liquido. Il manometro più diffuso è quello a molla Bourdon, che copre il 90% del mercato. È importante che il manometro sia posizionato in modo visibile, con un diametro minimo di 63 mm se entro un metro dall'operatore, e fino a 110 mm se più distante, garantendo la corretta lettura. Per preservarne l'efficienza, il manometro deve essere rimosso durante i periodi di gelo.



Figura 15: Manometro che regola la pressione del circuito (Agro Forestale)

I flussimetri, montati soprattutto sulle irroratrici con sistemi DPA a controllo elettronico, misurano il quantitativo di liquido che attraversa il circuito in tempo reale.

Questi strumenti possono essere di tipo elettromagnetico o meccanico. Nei flussimetri elettromagnetici, la portata viene determinata tramite la variazione del campo magnetico prodotto dal passaggio del liquido attraverso un condotto calibrato, generando un flusso di induzione elettromagnetica che consente di misurare con precisione il liquido.

I flussimetri meccanici, invece, misurano la portata tramite il movimento di palette la cui rotazione è proporzionale al flusso del liquido.

Questi strumenti di misurazione offrono un'ampia gamma di rilevamento delle portate, da 0,5 a 500 litri al minuto, e sono in grado di operare con pressioni fino a 50 bar. La presenza di strumenti di misura precisi e affidabili è fondamentale per garantire che la quantità di prodotto distribuita per unità di superficie sia corretta, ottimizzando così l'efficacia del trattamento e riducendo gli sprechi.

Ugelli

Gli ugelli delle macchine irroratrici, cruciali per la corretta distribuzione del liquido sulla vegetazione, variano notevolmente per tipologia e materiali, in base alle esigenze specifiche delle colture e delle condizioni operative. I materiali più utilizzati includono polimeri plastici, ceramica e acciaio. Gli ugelli in plastica sono i più economici, ma quelli in ceramica, sebbene più costosi, offrono una maggiore durata, risultando più convenienti nel lungo termine. Gli ugelli in acciaio, invece, sono indicati per applicazioni che richiedono pressioni di esercizio molto elevate, ma hanno un costo di acquisto superiore. Tra le tipologie più diffuse troviamo gli ugelli a ventaglio (singolo o doppio), a cono vuoto o pieno, e quelli a più getti rettilinei, ciascuno adatto a differenti tipi di trattamenti: dalle colture arboree ai trattamenti localizzati. Una corretta manutenzione è fondamentale per garantire la funzionalità nel tempo. Oltre ai controlli visivi regolari e alla pulizia, da effettuare con strumenti adeguati come aria compressa o spazzolini, è necessario monitorare la portata d'acqua ogni 100 ore di utilizzo per assicurarsi che non superi una deviazione del 10% rispetto al valore nominale, evitando così usura e malfunzionamenti. La citazione evidenzia l'importanza degli ugelli nelle macchine irroratrici, sottolineando come la scelta del materiale e della tipologia influisca direttamente sull'efficienza del trattamento e sulla durata degli ugelli stessi. La distinzione tra materiali economici, come i polimeri plastici, e quelli più duraturi, come la ceramica e l'acciaio, riflette una considerazione attenta del rapporto costi-benefici a lungo termine. Inoltre, l'accento posto sulla manutenzione regolare, attraverso controlli visivi e pulizia adeguata, evidenzia quanto sia essenziale la cura continua per garantire prestazioni ottimali e prolungare la vita utile degli ugelli, rendendo così più efficiente l'intero processo di irrorazione (Facchinetti, D., nd).

Dotazione macchine irroratrici e direttive europee

Prima di acquistare una qualunque irroratrice, è necessario verificare che l'irroratrice sia marcata CE, riporti la targhetta di identificazione e sia accompagnata dal documento noto come "dichiarazione CE di conformità" e dal manuale di uso e manutenzione. La marcatura CE garantisce a chi utilizza una macchina che la stessa è stata costruita nel rispetto della "direttiva macchine", cioè una serie di direttive comunitarie che hanno l'obiettivo di stabilire gli standard minimi comuni di sicurezza a cui tutti i costruttori presenti nella Comunità Europea devono adeguarsi nella costruzione di macchine di vario tipo.

La targhetta di identificazione deve riportare, in forma leggibile e indelebile, almeno le seguenti informazioni: nome e indirizzo del costruttore; anno di costruzione; designazione della serie o del tipo; numero di serie; pressione ammissibile del circuito; massa a vuoto; massa totale ammissibile.

LOGO DEL COSTRUTTORE INDIRIZZO N° DI TELEFONO STATO...	CE
MODELLO - MODEL - MODELL MODELE - MODELO	<input type="text"/>
TIPO - TYPE - TYP TYPE - TIPO	<input type="text"/>
MATICOLA - SERIAL NUMBER KENN-NUMMER - MATRICULE - MATRICULA	<input type="text"/>
ANNO DI COSTRUZIONE - MANUFACTURING YEAR - BAUJAHR ANNÉE DE CONSTRUCTION - AÑO DE CONSTRUCCION	<input type="text"/>

Figura 16: Targhetta di identificazione della macchina irroratrice
(Pessina, nd)

Sulla pompa deve esserci una targhetta di identificazione con i seguenti dati: nome ed indirizzo del costruttore; numero di serie; portata massima della pompa (l/min); pressione massima fornita dalla pompa; portata massima della pompa alla pressione massima di utilizzo (l/min); frequenza di rotazione nominale e massima (giri/min).



Figura 17: Targhetta di identificazione della pompa (Pessina, nd)

I tubi invece devono essere muniti di una targhetta con la pressione massima alla quale possono essere utilizzati. Sull'irroratrice devono essere presenti e ben visibili dei pittogrammi di segnalazione del pericolo che riconducono al manuale di uso e manutenzione.



Figura 18: Targhetta della pressione dei tubi (Pessina, nd)

Il manuale di uso e manutenzione deve essere sempre impiegato inizialmente per conoscere la macchina, i suoi meccanismi di funzionamento e le modalità di utilizzo insicurezza; in un secondo momento esso diventa la guida da consultare prima di procedere nelle operazioni di manutenzione ordinaria.

La Dichiarazione CE di conformità è una dichiarazione del costruttore che la macchina commercializzata presenta le stesse caratteristiche di sicurezza e tutela della salute degli operatori previste dalla già citata direttiva comunitaria (direttiva macchine). Infatti, essa riporta i dati identificativi del costruttore, le disposizioni e le norme cui la macchina è conforme, inoltre deve essere consegnata dal rivenditore con la macchina e deve sempre essere conservata.



Figura 19: Targhetta informativa di AgroSenseBot

Leggi sull'impiego dei fitofarmaci e trattamenti fitosanitari

Il Regolamento Macchine stabilisce requisiti specifici per le macchine irroratrici, oltre a quelli previsti per le altre macchine agricole, con l'obiettivo di ridurre gli sprechi, salvaguardare l'ambiente e aumentare la sicurezza sul lavoro. Le macchine che applicano prodotti fitosanitari devono garantire un arresto immediato e un controllo totale durante l'applicazione dei pesticidi. Devono inoltre assicurare che il serbatoio possa essere riempito e svuotato senza rischi di contaminazione esterna, con particolare attenzione a non inquinare le risorse idriche. È fondamentale che la distribuzione del prodotto sia precisa e che il fitofarmaco raggiunga esattamente la zona desiderata, evitando di colpire aree vicine non interessate. La macchina deve poter essere spenta in sicurezza e mantenuta con cura, seguendo procedure di pulizia adeguate. Infine, è richiesta l'inclusione di informazioni aggiuntive nel manuale d'uso per garantire una gestione corretta e sicura (Parlamento Europeo, 2023). Il Regolamento Macchine introduce misure fondamentali per garantire un uso responsabile e sicuro delle macchine irroratrici, con particolare attenzione alla riduzione dell'impatto ambientale e alla protezione dell'operatore. Queste norme promuovono un'accurata applicazione dei prodotti fitosanitari, prevenendo contaminazioni accidentali e

sprechi, e rafforzano l'importanza della manutenzione e della pulizia regolare. L'inserimento di ulteriori dettagli nel manuale d'uso rappresenta un passo importante per assicurare una gestione informata e consapevole delle macchine, in linea con le esigenze moderne di sostenibilità e sicurezza.

Trattamenti fitosanitari in agricoltura di precisione

I trattamenti fitosanitari in agricoltura di precisione possono essere distinti in due macrocategorie:

1) il Real time system, cioè sistemi in grado di intervenire in maniera diretta e immediata in campo, grazie a sensori, montati sulla macchina irroratrice, in grado di individuare istantaneamente il problema. Questa tecnica consente di evitare sprechi di prodotto con conseguente deriva e inquinamento ambientale, consente all'agricoltore di ottenere una maggiore efficacia nei trattamenti. Possiamo considerarle un'evoluzione diretta delle macchine irroratrici a distribuzione proporzionale all'avanzamento.

2) l'intervento mirato invece è un sistema di intervento pianificato precedentemente attraverso mappe di prescrizione, esso supera il concetto di distribuzione uniforme lungo tutto l'appezzamento di terreno, e si concentra sull'intervento su specifiche aree delimitate in partenza.

Queste operazioni sono necessarie, soprattutto se si considerano gli effetti disastrosi che una distribuzione tradizionale può causare; infatti, è stato dimostrato che si raggiunge fino al 70% di prodotto disperso nell'ambiente e solo il 30 % che raggiunge il bersaglio. (Balsari 2007)

Entrambi i sistemi di precisione necessitano di un sistema a distribuzione mirata, che consenta di modificare continuamente la portata erogata dagli ugelli o la concentrazione di prodotto erogato nella miscela.

Una ulteriore distinzione va fatta sui sistemi di distribuzione, infatti ne esistono molteplici tipologie tra cui: sistemi a portata costante, sistemi con distribuzione proporzionale all'avanzamento a controllo elettronico e sistemi a portata variabile. Quest'ultimi sono i più recenti sistemi messi sul mercato, possono essere dotati di porta ugelli doppi, quadrupli, ugelli a portata variabile, a pulsazione modulata, a iniezione diretta con concentrazione proporzionale all'avanzamento, a iniezione diretta con concentrazione costante (Raffaele Casa, 2016).

Prospettive future per la viticoltura

La viticoltura di precisione si pone l'obiettivo di aumentare l'efficienza delle applicazioni di input agricoli e delle operazioni al fine di avere una maggiore sostenibilità ambientale ed economica, ciò tramite la conoscenza della variabilità spaziale e temporale che permettono gestioni in campo sito specifiche. Il progetto Kattivo, sperimentato nelle colline del Chianti, ed è stato dimostrato che grazie a sensori e ultrasuoni di ultima generazione, si è misurata la densità e il volume delle chiome, di conseguenza l'elaborazione dei dati di un software ha permesso di regolare la potenza e la dose fornita da ogni singolo ugello, raggiungendo un risparmio di prodotto irrorato pari a circa il 30%. (Kattivo.it)

L'interesse verso la viticoltura di precisione è in costante aumento per diverse ragioni, tra cui il risparmio sugli interventi in campo, sui prodotti fitosanitari e il miglioramento della qualità delle uve, che permette di incrementare i prezzi di mercato. Il monitoraggio dello stato fisiologico di un vigneto si basa sull'uso di strumenti che sfruttano la fluorescenza. Questo processo si fonda sull'energia luminosa assorbita dalle molecole di clorofilla, utile per monitorare le variazioni nutrizionali e dei pigmenti delle piante (Agati, 2013). La fluorescenza si dimostra un valido metodo di monitoraggio perché consente di ottenere informazioni sulla salute delle piante senza metodi invasivi o dannosi, facilitando un intervento tempestivo e mirato, riducendo sprechi e migliorando la qualità complessiva delle colture.

Per quanto riguarda la difesa del vigneto, studi dimostrano che l'uso di macchine per la distribuzione degli agrofarmaci permette di ridurre del 40% i trattamenti a base di rame, senza compromettere il controllo delle malattie della vite (Garcia-Ruiz, 2023). Questa riduzione non solo consente un notevole risparmio economico per l'agricoltore, ma contribuisce anche a una gestione più sostenibile e rispettosa dell'ambiente. Infatti, ridurre l'impiego di sostanze chimiche come il rame è cruciale per preservare la qualità del suolo e la biodiversità dell'ecosistema viticolo, promuovendo una produzione più eco-compatibile. Altri metodi, come l'uso di droni per la distribuzione di prodotti liquidi, agiscono in modalità semi-autonoma con un carico utile superiore a 10 kg. Tuttavia, l'efficacia di questi sistemi non è ancora completamente comprovata, poiché fattori come l'altitudine e la velocità di volo possono influenzare il rischio di deriva ambientale (Chen, 2022). I droni rappresentano un'opzione tecnologica interessante per l'agricoltura di precisione, poiché possono raggiungere aree difficilmente accessibili e ridurre i tempi di intervento. Tuttavia, la

complessità di variabili come l'altitudine e le condizioni atmosferiche richiede ulteriori studi per garantire una distribuzione uniforme dei trattamenti e per minimizzare il rischio di impatti negativi sull'ambiente circostante.

In aggiunta, la ricerca si concentra anche su robot terrestri, impiegati per il controllo delle piante infestanti tra i filari e per operazioni di lavorazione del suolo, con alcuni prototipi destinati persino all'automazione della potatura (Teng, 2021; Saiz-Rubio, 2021). Questi robot rappresentano una nuova frontiera nella gestione dei vigneti, poiché permettono di ridurre l'uso di erbicidi chimici, migliorando al contempo la precisione e l'efficienza delle operazioni. La possibilità di automatizzare processi complessi, come la potatura, potrebbe ridurre i costi di manodopera e aumentare la produttività, pur mantenendo alta la qualità delle operazioni agronomiche.

Tuttavia, per raggiungere la massima efficienza e realizzare una vera rivoluzione nel settore, è necessaria l'integrazione di sistemi IoT, intelligenza artificiale e automazione. Queste tecnologie, operando sinergicamente, possono risolvere molte delle sfide che i viticoltori affrontano quotidianamente. L'integrazione di queste innovazioni permette di raccogliere dati in tempo reale e di prendere decisioni più informate, migliorando la gestione delle risorse e riducendo sprechi e inefficienze. In un contesto globale in cui la sostenibilità e la qualità sono sempre più cruciali, queste tecnologie possono rappresentare un vantaggio competitivo significativo per i produttori.

Telerilevamento, sistemi a controllo remoto e sensori

Il telerilevamento è un insieme di tecniche che permette di rilevare, a distanza e tramite l'uso di sensori specifici, alcune proprietà fisiche o chimiche di un materiale. Nell'ambito dell'agricoltura di precisione, il materiale osservato comprende i tessuti vegetali delle colture agricole e il suolo, oltre alla loro combinazione nota come canopy. Con i progressi tecnologici, i sensori sono diventati sempre più potenti, precisi e accessibili. In particolare, lo sviluppo di sensori satellitari, come quelli a bordo delle piattaforme Sentinel-2, ha consentito di ottenere informazioni adeguate dal punto di vista spaziale e temporale per un monitoraggio in tempo reale della canopy (Stefano Amaducci, et al., nd).

La vista è una forma di telerilevamento o rilevamento a distanza. Con il termine telerilevamento, infatti, si intende il processo di acquisizione di informazioni su un oggetto (come volume, colore, caratteristiche della superficie, ecc.) senza che l'osservatore entri in

contatto diretto con esso. In ambito scientifico, il telerilevamento si riferisce alla raccolta di dati su oggetti molto distanti dall'osservatore mentre la vista, che è in grado di rilevare dettagli principalmente su oggetti vicini, viene classificata come rilevamento di prossimità. La disciplina conosciuta come Geo Intelligence acquisisce informazioni sullo stato della superficie terrestre, sugli eventi naturali o su quelli provocati dall'azione umana e sono rilevate dai Geo Intelligence Systems (GIS).

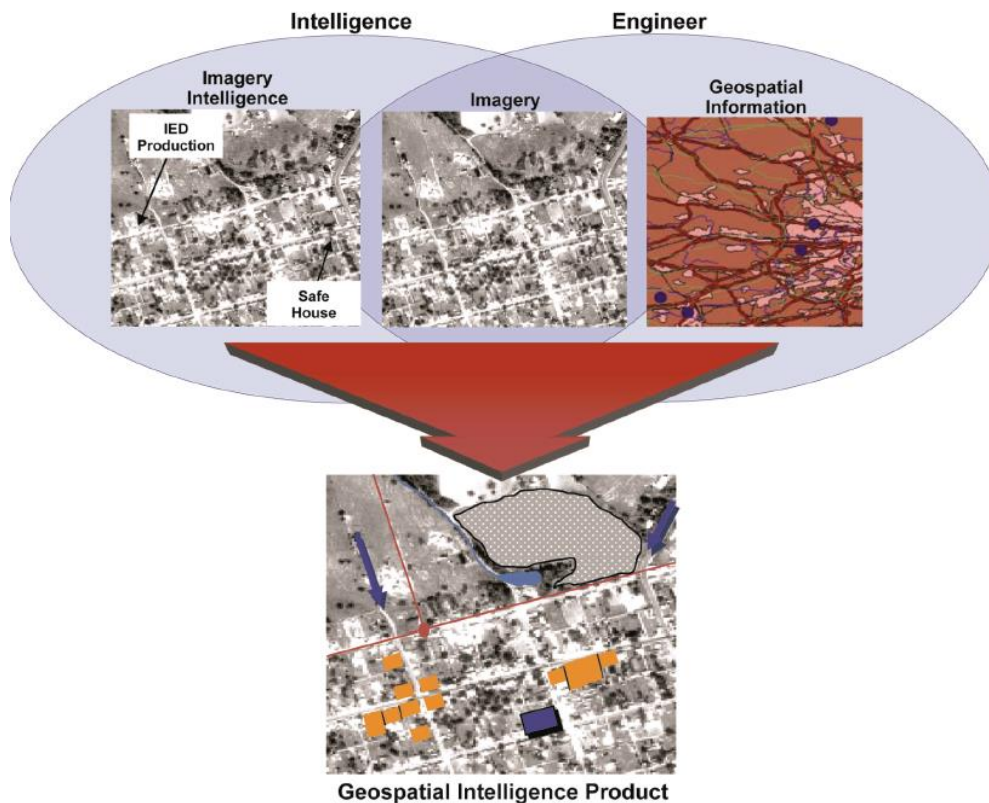


Figura 20: Rappresentazione grafica della disciplina Geo Intelligence (U.S. ARMY, 2016)

Il telerilevamento come è inteso oggi dalla comunità scientifica, vede come protagonisti i satelliti che ogni giorno scattano milioni di immagini relative alla superficie terrestre. Un esempio tangibile è il satellite Landsat-8 di proprietà della NASA che è stato lanciato nel 2013, esso esegue ininterrottamente operazioni di telerilevamento della superficie terrestre. I satelliti sono in grado di fornire molteplici informazioni per ogni tipo di immagine da essi scattata, in particolare viene presa in considerazione una visione satellitare per le pratiche agricole, quella che rileva l'umidità del suolo su appezzamenti molto vasti. Ciò consente di ottenere informazioni molto precise sull'idratazione di una determinata area di suolo o sull'aridità (Oikos Engineering, nd).

Radiazione elettromagnetica

I sensori di telerilevamento hanno alla base l'interazione tra la radiazione elettromagnetica e le superfici da cui si vogliono trarre informazioni. La radiazione elettromagnetica è il risultato di una variazione di intensità e di direzione di un campo elettrico e magnetico, che si manifesta con delle oscillazioni periodiche di questi campi. La frequenza è il numero delle oscillazioni complete in un secondo, ν , e si misura in hertz (1 Hz) che corrisponde a 1 ciclo al secondo: $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$. L'altezza dell'onda rispetto all'asse orizzontale centrale è definita ampiezza e il suo quadrato ne determina l'intensità, ossia la brillantezza, della radiazione. La lunghezza d'onda λ è la distanza tra un picco e quello successivo; la luce visibile ha la lunghezza d'onda che si aggira attorno ai 500 nm. Le diverse lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica corrispondono alle diverse regioni dello spettro. I nostri occhi percepiscono la radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda compresa tra 700 nm (luce rossa) e 400 nm (luce violetta), chiamata luce visibile; il colore è determinato dalla frequenza della luce visibile (Zanichelli)

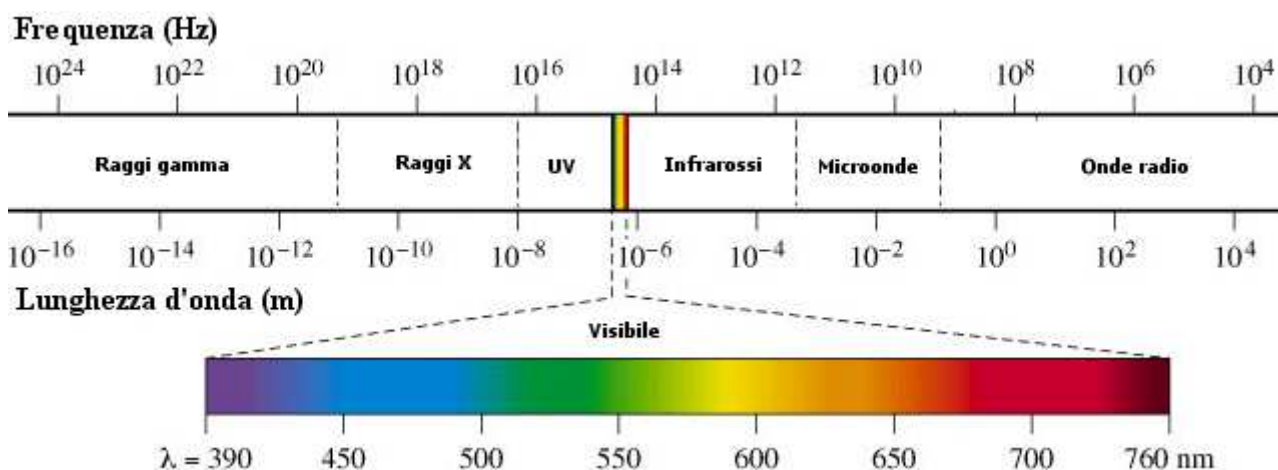


Figura 21: Scala della radiazione elettromagnetica (Chimica Online)

Lo spettro comprende tutti quei corpi che emettono radiazioni in un intervallo di lunghezze d'onda. Le radiazioni dei corpi ad alte temperature hanno lunghezze d'onda più corte a confronto dei corpi a basse temperature che emettono radiazioni a lunghezza d'onda più lunga; tali proprietà caratterizzano le interazioni con le superfici in funzione delle loro caratteristiche chimico fisiche.

Telerilevamento nel dominio ottico

Il Telerilevamento Ottico utilizza quella porzione della radiazione elettromagnetica caratterizzata dalle lunghezze d'onda che vanno dal visibile (0.4 μm) all'infrarosso vicino (NIR: Near Infra Red) fino all'Infrarosso termico (15 μm) dove la radiazione studiata è di tipo riflesso od emesso in forma naturale dalle superfici. I sensori che vengono utilizzati per acquisizione dei dati come segnali e immagini, all'interno di questo dominio dello spettro elettromagnetico, sono strumenti che hanno come collettore di energia dei sistemi ottici, sia a rifrazione, come le lenti, che a riflessione, come gli specchi. La presenza di nubi e dell'atmosfera in generale, quando si considera questo intervallo di lunghezze d'onda (0.4-15 μm) rappresenta un grosso elemento di disturbo per l'osservazione della superficie terrestre (Raffaele Casa, 2016).

La concentrazione dei vari pigmenti clorofilliani caratterizza il comportamento spettrale della coltura, quest'ultimo è ottenuto dalla somma della concentrazione dei pigmenti e del LAI (leaf area index), cioè la superficie coperta dalle foglie.

Grazie al telerilevamento ottico, si può osservare la fluorescenza: uno specifico fenomeno causato dai pigmenti presenti nelle foglie, tra cui clorofilla e carotenoidi, i quali assorbendo l'energia dei raggi solari causano un effetto chiamato eccitazione delle molecole, successivamente alcune molecole perdono energia e rilasciano radiazioni di minor energia, cioè a lunghezza d'onda più lunga rispetto a quelle che la foglia ha ricevuto inizialmente. L'impiego principale in agricoltura tramite la fluorescenza è misurare la vitalità delle piante (Filippo Bussotti, 2012), di conseguenza individuare possibili stress idrici o termici, inoltre la fluorescenza può risultare un utile strumento per l'individuazione e la diagnosi di malattie fungine.

Altro sistema di telerilevamento ottico è il Lidar (light detection and ranging) grazie al quale si può rilevare con precisione la distanza tra il sensore e il bersaglio, spesso viene usato in parallelo con sistemi GPS e sistemi inerziali di navigazione, l'elaborazione di queste informazioni porta a ricreare un'immagine tridimensionale della vegetazione. Recenti sviluppi di lidar 3D, permettono non solo di avere informazioni più precise sulla copertura del suolo, ma anche sulle concentrazioni di azoto nelle diverse aree.

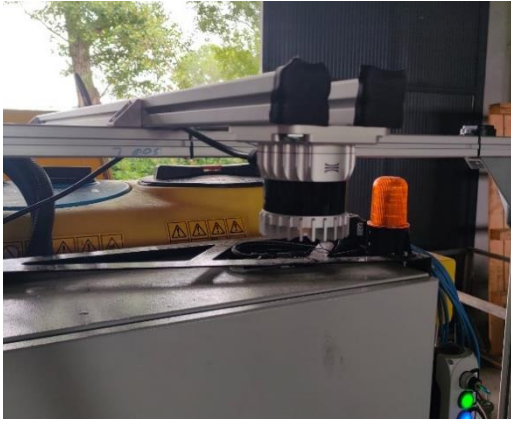


Figura 22: Sensore Lidar montato su AgrosenseBot

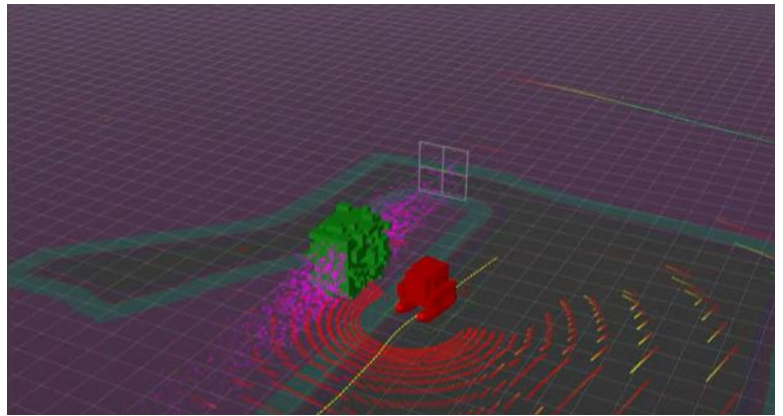


Figura 23: Rappresentazione dell'immagine trasmessa dal Lidar

Il sistema lidar ha un sistema di funzionamento molto simile a quello del radar, la differenza è che il lidar utilizza la radiazione nel dominio ottico mentre il radar utilizza le microonde. Inviando degli impulsi luminosi su un determinato obiettivo, tramite un detector si riesce a registrare il tempo di ritorno del raggio luminoso e quindi calcolare la distanza tra lidar e bersaglio. (Sourabhi Debnath, et al., 2023)

Infrarosso termico

L'infrarosso termico è principalmente impiegato per la rilevazione della temperatura del suolo, dei tessuti vegetali e il loro stress idrico (Zheng Zhou, et al., 2021), stimare il livello di maturazione dei frutti, individuazione dei patogeni (R. Vadivambal, et al., 2011); infatti, più un corpo ha temperatura elevata e più tende a emettere radiazioni. L'emissività è il fattore principale da conoscere per poter stimare la temperatura di un oggetto, essa cambia a seconda del materiale di cui è composto quest'ultimo, per il suolo e le foglie è compresa tra 0,92 e 0,99. L'impiego dell'infrarosso termico in agricoltura ha molteplici criticità, e per questo è utilizzato meno rispetto ad altri sistemi; alcuni dei principali difetti sono: bassa qualità delle camere a infrarossi dei satelliti che non tengono conto solo della radiazione infrarossa ma anche dei gas presenti nell'atmosfera, con conseguenti errori di valutazione e diminuzione

di precisione, il vapore acque può interferire con le radiazioni e infine la forte asintropia dovuta dalla diversa percentuale di suolo e vegetazione osservati.

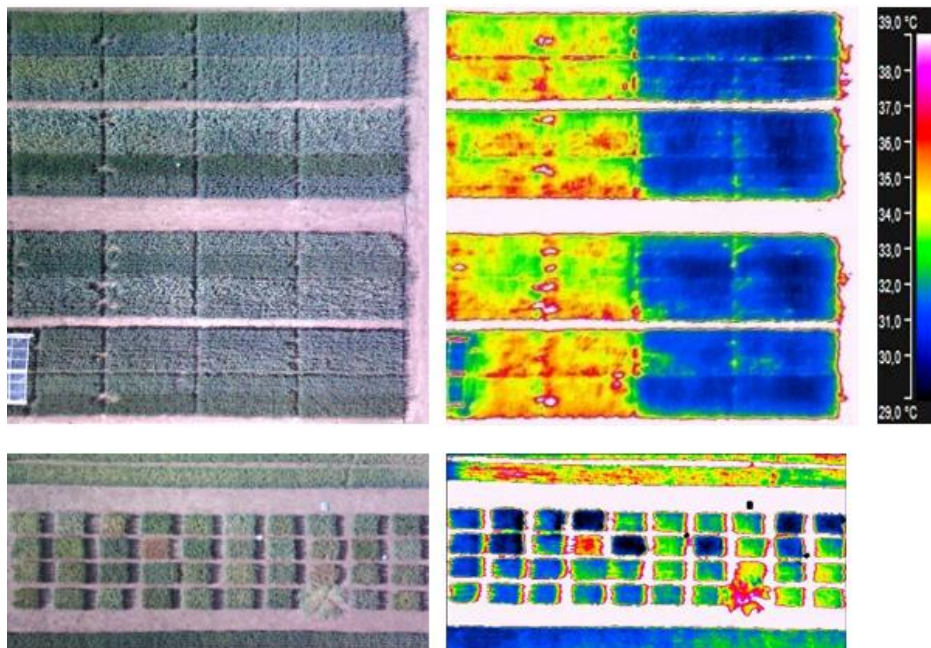


Figura 24: Rappresentazione dello stress idrico rilevato da una telecamera a infrarossi (Workswell)

Telerilevamento nel dominio delle microonde

Per quanto riguarda il telerilevamento nel dominio delle microonde lo strumento protagonista è il radar (Radio Detection and Ranging), con due principali applicazioni, metodo passivo e quello attivo. Il metodo passivo misura l'emissione naturale della superficie del terreno. Poiché questo segnale è relativamente debole, questi sensori devono aggregare l'emissione su un'area relativamente ampia (Entekhabi et al., 2010). Il metodo attivo, il trasmettitore emettere radiazioni continue, che tramite un'antenna vengono focalizzate in un determinato raggio, con un ricevitore si intercetta la frazione riflessa dagli oggetti, in questo le piante, colpiti. Il dato su cui trarre le conclusioni è il ritardo tra la trasmissione dell'impulso e la ricezione. I vantaggi del sistema attivo a radar, cioè a microonde, sono molteplici, tra cui: non subisce l'interferenza delle nuvole, penetra nelle colture e nei suoli, fornisce informazioni sulla struttura geometrica della vegetazione, monitora contenuto idrico fogliare, individua precipitazioni in corso.

Satelliti

Le produzioni agricole che adottano metodi di agricoltura di precisione utilizzano quotidianamente le immagini satellitari per gestire in maniera specifica e differenziata ogni area del podere. Per quanto riguarda la gestione dei satelliti delle informazioni raccolte, esistono satelliti di dominio pubblico e satelliti di agenzie private. Un esempio di satelliti di dominio pubblico è il programma Copernicus dell'Unione europea per l'osservazione della Terra: fornisce dati e immagini gratuite grazie alla costellazione di satelliti chiamati "Sentinels", è uno tra i più diffusi in campo agricolo. Sentinel-1 fornisce ininterrottamente giorno e notte immagini radar con qualsiasi condizione meteorologica, sia sulla superficie terrestre che sui mari; mentre Sentinel-2 fornisce immagini ottiche ad alta risoluzione (10 metri) per il monitoraggio della vegetazione, dello stato idrico e del suolo (Chiara Albicocco). I satelliti possono essere di supporto nel valutare l'uso della terra, registrare i cambiamenti stagionali e facilitare l'implementazione di politiche di sviluppo sostenibili. Il Governo italiano ha messo a disposizione una parte dei fondi del PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza) per finanziare la realizzazione di una nuova costellazione di satelliti chiamata IRIDE, essa tende a diventare, entro cinque anni, il più importante programma spaziale satellitare europeo di osservazione della Terra a bassa quota. IRIDE sarà affidato all'ESA (European Space Agency) e all'Agenzia Spaziale Italiana che delegheranno poi gli incarichi ad aziende del settore.



Figura 25: Progetto Iride (ESA, 2022)

Una parte di questa costellazione si concentrerà sull'impiego dei satelliti nella precision farming. Ad esempio, nei vigneti saranno in grado di monitorare il vigore delle colture fornendo mappe di immediata interpretazione per la vendemmia (Chiara Pertosa, 2022).

Catena di elaborazione dei dati

L'acquisizione dei dati è solo una parte del complesso e lungo lavoro che serve a raggiungere l'intervento di precisione in campo. Il passaggio successivo alla raccolta dei dati è la sua preelaborazione (pre-processing), cioè un'interfase tra il dato grezzo e l'elaborazione finale, nel quale si ha la calibrazione radiometrica che consente di convertire i dati grezzi chiamati anche digital number, in unità fisiche come radianza e riflettanza. La prima tipologia di calibrazione è la correzione atmosferica è un'azione di compensazione degli effetti di assorbimento dei gas atmosferici, aerosol e vapore acqueo che deviano le radiazioni solari al momento dello scatto del satellite. Un altro tipo di calibrazione è la correzione geometrica ha la funzione di correggere le irregolarità che possono verificarsi al momento dello scatto causati dal sistema di ripresa, dalla topografia e dal movimento del satellite. Infine, è fondamentale l'impiego di indici della vegetazione, finora in letteratura sono stati utilizzati più di cinquanta diversi indici di vegetazione (Bannari et al., 1995). I principali indici sono: il DVI, l'NDVI e il SAVI. Il DVI (Difference Vegetation Index) è un indice semplice, sensibile alla quantità di vegetazione, ha la capacità di distinguere il suolo e la vegetazione, ma non nelle aree in ombra. Pertanto, non fornisce informazioni adeguate quando le lunghezze d'onda riflesse sono influenzate dalla topografia, dall'atmosfera o dall'ombra. Una versione avanzata e migliorata del DVI è il NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Infine, troviamo il SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) (Diofantos G., et al., 2010).

Viticultura di precisione

Le piante d'uva appartengono al genere *Vitis L.* della famiglia delle Vitaceae. La quasi totalità delle viti coltivate appartiene alla specie *Vitis vinifera L.*, originaria del Mediterraneo e del Vicino Oriente. La *Vitis vinifera*, originariamente diffusa con continuità dall'Europa all'Asia, durante le glaciazioni del Pleistocene si rifugiò nei territori del bacino del Mediterraneo e nei territori asiatici che oggi corrispondono all'Armenia, alla Georgia e all'Iran. Crescendo in differenti condizioni ambientali, si diversificò dando origine a due

sottospecie: *Vitis vinifera* L. subsp. *sylvestris* (Gmelin) Hegi, in Europa, e *Vitis vinifera* L. subsp. *sativa* Hegi (*V. vinifera caucasica* Vavilov), in Oriente (Agraria.org).

All'interno del sottogenere *Euvitis* troviamo: la vite Americana, una specie usata prevalentemente come portinnesto della vite europea, in quanto resistente al freddo, alla fillossera, all'asfissia e alle malattie; una specie Asiatica, sensibile alla fillossera e alle malattie e generalmente poco produttiva; infine quella Europea, la specie più importante e per le sue caratteristiche, diffusa ormai in tutte le zone viticole del mondo, è *Vitis vinifera* L., che a sua volta è suddivisa nelle due sottospecie, *Vitis vinifera sativa* D.C. e *Vitis vinifera sylvestris*.



Figura 26: Rappresentazione della fenologia della vite (Agraria.org)

Fenologia e ciclo di sviluppo

La vite è un arbusto a foglia caduca, rampicante (liana sarmentosa), con fusto che può caratterizzarsi in branche con tralci o unico, il frutto è l'acino, una bacca con pochi semi (vinaccioli, molto importanti poiché contengono i tannini, che possono caratterizzare la composizione finale del vino), portato da un corto pedicello; l'insieme degli acini costituisce un racemo, quello che comunemente viene chiamato grappolo d'uva.

Il ciclo vitale della vite è di circa 40 anni, fino ai 3 anni di vita la pianta rimane improduttiva, nei due anni seguenti entra in una fase di produzione crescente, dal quinto al venticinquesimo

anno circa, si ha la produzione massimale, dopo circa 20 anni di produzione alta e costante, entra in fase di senescenza e non risponde più alle richieste di produzione del viticoltore in termini sia quantitativi che qualitativi.

Nelle viti in produzione, il ciclo annuale si manifesta con fasi fenologiche diverse, frutto delle caratteristiche genetiche della vite che interagiscono sia con le condizioni ambientali che con le pratiche colturali: si avrà da una parte l'attività vegetativa della pianta e dall'altra l'attività riproduttiva, con la formazione di frutti e semi. Si può quindi suddividere il ciclo annuale della vite in due sottocicli: il sottociclo vegetativo e il sottociclo riproduttivo (Marengi, 2007).

Il sottociclo riproduttivo ha inizio con la fioritura, le gemme ibernanti selezionate e lasciate sulla pianta dopo la potatura invernale, si schiudono; dopodiché si ha la fase di allegagione verso il mese di giugno, in questa fase il raspo (organo di collegamento tra acino e ramificazioni) si accresce e l'ovario si ingrossa e assume una forma sferica. Con l'avanzare della stagione estiva verso la fine di luglio e gli inizi di agosto avviene un importante aumento del volume degli acini, chiamato fase di invaiatura. Infine, si ha la maturazione, nei mesi tra settembre e ottobre, considerata come la fase fondamentale per i grappoli d'uva. Gli acini raggiungono lo stadio finale di sviluppo, raddoppiando il loro volume e peso, si accumulano zuccheri, si formano coloranti e si ha la maturazione dei vinaccioli (Agraria.org).



Figura 27: Ciclo annuale della vite (Quattroclici)

Il sottociclo vegetativo riguarda l'accrescimento vegetativo, la fase che va da marzo-aprile fino a inizio agosto. Esso comprende il Pianto, emissione di liquidi dai vasi xilematici dai

tagli di potatura dovuto alla riattivazione del metabolismo degli zuccheri e all'assorbimento delle radici. Si ha poi il germogliamento e la sua fase di accrescimento, un periodo di agostamento, cioè la fase di lignificazione dei germogli e immagazzinamento delle sostanze di riserva e infine il periodo di riposo, caratterizzato dalla caduta delle foglie.

Due caratteristiche importanti per la vite sono l'acrotonia, quindi un maggiore sviluppo dei germogli che si trovano nella parte apicale dei tralci, e la dominanza apicale, quel processo biochimico nel quale le gemme apicali inibiscono la crescita delle gemme laterali presenti sul germoglio tramite la produzione di ormoni (Agraria.org).

I metodi di allevamento della vite sono molti e vari, poiché devono rispondere a diverse esigenze e obiettivi specifici. I principali scopi di un sistema di allevamento sono: ottimizzare il microclima della pianta per minimizzare l'incidenza delle malattie; garantire un'adeguata esposizione alla luce per le foglie e i grappoli; mantenere un equilibrio ottimale tra la parte vegetativa e quella produttiva; agevolare le pratiche di gestione e manutenzione del vigneto, come la potatura, la gestione della chioma, la distribuzione dei prodotti fitosanitari e la raccolta; assicurare costi di gestione contenuti e l'economicità dei materiali utilizzati per l'impianto; adattarsi alle caratteristiche del vitigno e al clima locale; infine, bilanciare quantità e qualità del raccolto in base alle esigenze del produttore.

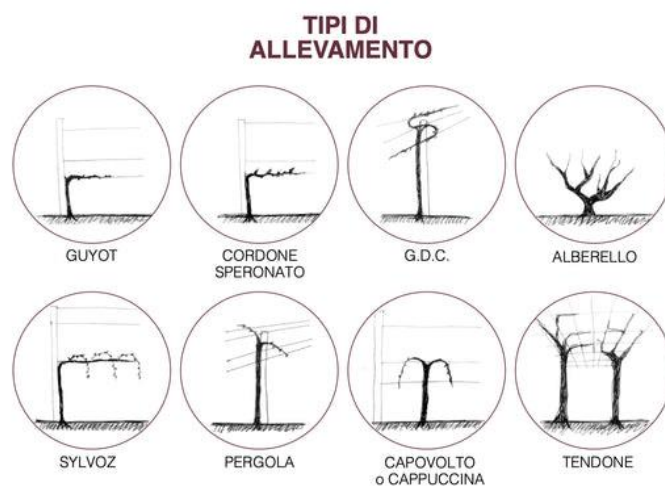


Figura 28: Rappresentazione delle tipologie di allevamento della vite (losaicheilvino.it)

Principali problematiche e patologie

L'allevamento della vite deve tenere conto di tutte le problematiche che riguardano avversità abiotiche e biotiche, spesso causa di perdite ingenti in termini di quantità e qualità. Per quanto riguarda le avversità abiotiche si prendono in considerazione eventi climatici avversi,

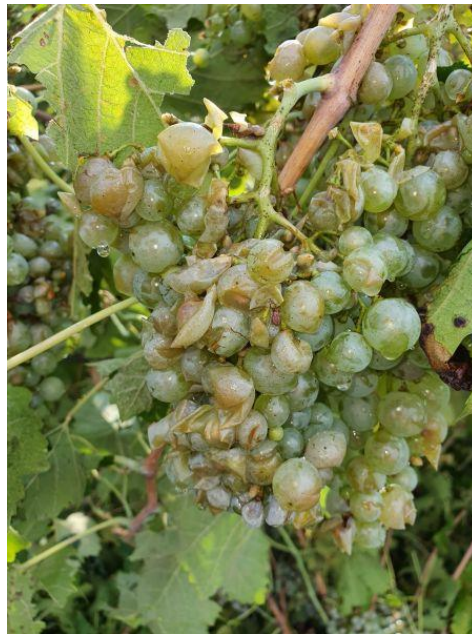


Figura 29: Danno da grandine su grappolo d'uva (Confagricoltura)

uno dei principali antagonisti è la grandine, causa di lacerazioni fogliari irreparabili e causa primaria di ingresso di patogeni di debolezza; alcuni viticoltori hanno optato per reti antigrandine come barriera protettiva. Non in tutti i vigneti però è applicabile, e apporta costi di manutenzione non trascurabili. Altra causa abiotica è lo stress o l'eccesso idrico, che in entrambi i casi, danneggia la pianta nella crescita e nella produzione. Altre cause abiotiche sono squilibri nutrizionali nel terreno, errato uso di fitofarmaci, antiparassitari, diserbanti e inquinanti ambientali.

Per quanto riguarda le cause biotiche troviamo le micosi, cioè le malattie causate da funghi parassiti, i quali tramite sviluppo di austeri, strutture vocate alla penetrazione delle cellule dell'organismo ospite e dalle quali il patogeno trae nutrimento). Le malattie fungine più importanti sono l'oidio, la peronospora e la botrite, altre malattie presenti sono i marciumi radicali, il mal dell'esca e il "black rot".

Le cause biotiche non riguardano soltanto le micosi, infatti i parassiti animali sono oggetto di molta attenzione e studio per contrastarli. I fitofagi di *Vitis vinifera* si distinguono in fitofagi che causano danno diretto, cioè, aggrediscono e si nutrono del prodotto finale, il

grappolo. Alcuni esempi di questi insetti carpo-fagi sono la tignola dell'uva e la tignoletta dell'uva. Gli insetti, invece, che causano un danno indiretto come lo *Scaphoideus titanus*, vettore della flavescenza dorata, si nutrono delle sostanze nutritive all'interno della pianta ma che nel processo di perforatura della foglia, immettono il fitoplasma che una volta entrato in circolo nella pianta, causa danni irreparabili (Ruzzene E., 2013).

Per quanto riguarda i batteri invece, essi compiono penetrazione diretta solo attraverso aperture naturali o ferite. Non esistono principi attivi ammessi in agricoltura per il loro contenimento (Marenghi M., 2007).

Trattamenti fitosanitari principali

La protezione integrata si basa sull'impiego combinato di mezzi biologici, biotecnici, agronomici, fisici e chimici, con l'obiettivo di mantenere il livello di presenza di patogeni o parassiti al di sotto di una soglia che causerebbe danni economici, nel rispetto dei principi ecologici e tossicologici. In particolare, l'uso di prodotti chimici viene preso in considerazione solo dopo il superamento di questa soglia, selezionando i prodotti più specifici, meno tossici, meno persistenti e più sicuri sia per la salute umana che per l'ambiente (Marenghi M., 2007).

Sono da distinguere i trattamenti contro l'agente di causa diretto (oidio, peronospora) e il vettore (*Scaphoideus titanus* con flavescenza dorata).

La lotta contro lo *Scaphoideus titanus* come illustrato dal bollettino di (ERSA, agenzia regionale per lo sviluppo, Regione autonoma Friuli-Venezia Giulia) è definita lotta obbligatoria e prevede un intervento obbligatorio. La finestra di tempo ottimale per effettuare il trattamento è dal 28 giugno all'8 luglio, chiaramente le date sono specifiche da regione a



Figura 30: Scaphoideus titanus, vettore della flavescenza dorata (Agroscope)

regione, in base a temperatura media, esposizione solare, se fosse già stato effettuato un intervento con sostanze insetticide legato all'epoca di fioritura. L'obbligo prevede l'utilizzo di principi attivi Piretroidi (Acrinatrina*, Deltametrina, Etofenprox, Lambda-cialotrina, Tauflualinate).



Figura 31: Sintomi di infezione di flavescenza dorata (Cropscience Bayer)

Le misure per aumentare l'efficacia degli insetticidi sono: evitare interferenze con altri principi attivi, effettuare il trattamento nelle ore meno calde della giornata, effettuare una bagnatura totale della vegetazione, comprese le piante più giovani, cimare e palizzare le viti prima dell'intervento per permettere all'insetticida una penetrazione totale, effettuare gli interventi insetticidi quando il periodo della fioritura della vite è terminata. se la vegetazione sottostante fosse in fioritura, sarebbe vietato trattare, salvo che quest'ultima venga preventivamente sfalciata (Regione Lombardia, 2023).

A livello pratico, nei vigneti in cui si può adottare la meccanizzazione, il trattamento insetticida contro *Scaphoideus titanus*, si consiglia di utilizzare volumi medio-alti di irrorazione (almeno 400 litri di miscela per ettaro, ideale 700- 800 l/ha) e tenere una velocità di marcia inferiore ai 6 km/h per permettere una dispersione di prodotto efficace.

Una strategia efficace contro l'oidio deve puntare a prevenire l'inizio dell'infezione primaria causata dall'inoculo che ha svernato e a mantenere bassa la pressione del fungo durante le diverse fasi di sviluppo della vite. La fioritura rappresenta un momento delicato per il vigneto, poiché da questa fase dipende la futura produzione di uva a fine stagione. È quindi fondamentale proteggere in modo adeguato non solo le foglie, che supportano la crescita della pianta, ma soprattutto i grappoli in formazione. Durante la fioritura, infatti, l'oidio può

provocare danni significativi alle viti. Il fungo riesce facilmente a penetrare nei tessuti erbacei giovani, che siano foglie, tralci o fiori. In particolare, i grappoli mostrano la massima vulnerabilità nella fase pre e post-fioritura, mentre diventano meno suscettibili dopo l'invasatura (Crop Science Italia, nd)

È importante non sottovalutare una presenza limitata di oidio nel vigneto, pensando che sia irrilevante per la produzione di uva. In primo luogo, perché, se le condizioni ambientali diventano favorevoli, anche poche aree infette possono rilasciare spore che si diffonderanno rapidamente, causando nuove infezioni in tutto il vigneto. In secondo luogo, anche i grappoli con una percentuale ridotta di superficie colpita dal fungo daranno origine a mosti di scarsa qualità. L'oidio, infatti, non solo ostacola lo sviluppo ottimale del grappolo, ma riduce la qualità delle bacche e facilita l'insediamento di altri patogeni, come la botrite.



Figura 32: Grappolo d'uva colpito da oidio (WiForAgri)

Una buona strategia di difesa agronomica è fondamentale nella lotta contro l'oidio della vite. Ad esempio, è utile evitare l'uso di portainnesti troppo vigorosi, limitare le concimazioni eccessive di azoto, ridurre le potature lunghe e abbondanti (che creano addensamenti e limitano la luce) ed eliminare le viti infette.

Per quanto riguarda il controllo chimico, effettuato con macchine irroratrici, si possono utilizzare zolfi di copertura attraverso diverse tecniche, come ventilazione, polverizzazione o l'uso di colloidi bagnabili. Si può impiegare il Methyl-dinocap, tenendo però presente che diventa tossico a temperature elevate. Tra gli altri prodotti, ci sono quelli endoterapici, come gli inibitori della biosintesi degli steroli, e le strobilurine. È importante prestare attenzione nell'uso dello zolfo, poiché alle alte temperature può trasformarsi in SO₂ all'interno dei mosti; generalmente viene applicato in polvere o in forma bagnabile mediante atomizzatori.

La difesa contro l'oidio inizia solitamente nello stesso periodo di quella contro la peronospora.

Peronospora

Le infezioni di Peronospora in Italia del 2023, con attacchi prevalenti al Centro-Sud, hanno provocato perdite di produzione stimate dal 30% al 100%. Alla peronospora è attribuibile quasi nella totalità il calo produttivo registrato quest'anno, è di circa 11 milioni di ettolitri con una produzione di 38 milioni di ettolitri, il 23 % in meno rispetto al 2022. (Palma Esposito, 2024)

Il fungo attacca solo le parti verdi della pianta, in quanto penetra dagli stomi. La prima manifestazione dell'infezione è una decolorazione, prevalentemente circolare, della foglia. Gravi infezioni fogliari causano la caduta anticipata delle foglie. I germogli che sono attaccati dal fungo a seguito di infezioni localizzate presentano distorsioni e spaccature. I giovani grappoli infetti, a causa delle diverse velocità di crescita tra i tessuti infetti e non infetti, presenta una distorsione ad "S" del rachide. (Marengi, 2007)



Figura 33: Giovani grappoli attaccati da peronospora

(Informatore Agrario, 2024)

La strategia principale alla lotta alla peronospora è la prevenzione, ciò che permette alle infezioni fungine di essere limitate maggiormente. La lotta parte fin dall'impianto del vigneto, la scelta di portainnesti vigorosi causerebbero una chioma fitta e poco penetrabile dalla luce e dall'aria, inoltre ostacolerebbe la bagnatura totale durante i trattamenti fitosanitari. Una soluzione può essere usare portainnesti meno vigorosi e adottare forme di allevamento alte con netta separazione tra terreno e zona vegetativa.

Adottare una concimazione corretta per evitare eccessivo sviluppo vegetativo, con stesso scopo si effettuano interventi di potatura verde come spollonatura, sfemminellatura e

sfogliatura. La tecnica di inerbimento è consigliata perché può ostacolare la migrazione delle spore verso le foglie della vite, inoltre tende a mantenere il vigneto più asciutto e quindi ambiente sfavorevole al patogeno (Adama, 2021).

Per quanto riguarda i trattamenti in campo, c'è la regola dei tre dieci da rispettare per effettuare il primo intervento in campo. Essa dice che le condizioni indispensabili per l'avvio dell'infezione primaria sono la presenza di: precipitazioni di 10 mm nell'arco di 24-48 ore; temperatura media di 10 °C; una lunghezza dei tralci di circa 10 cm, valore indicativo per rappresentare un tralcio con almeno una foglia distesa.

La regola dei tre dieci è dipendente dall'umidità e dalla temperatura; infatti, all'aumentare delle temperature aumenta la velocità di incubazione del patogeno. Per quanto riguarda i prodotti di copertura, è possibile calcolare, utilizzando delle apposite tabelle, la finestra di tempo di intervento, che generalmente si aggira intorno al 60-80% del periodo d'incubazione. Per i prodotti citotropici e sistemici, data la loro maggiore persistenza, si calcola di norma un periodo prestabilito da un trattamento all'altro che va dai 10-14 giorni. Nelle zone viticole in cui è presente un servizio agrometeorologico specifico, viene pubblicato un bollettino settimanale con precise indicazioni per i viticoltori, così da evitare trattamenti superflui. (Agraria.org)

Botrite

La botrite o muffa grigia, è una malattia endemica che sulla vite trova condizioni particolarmente favorevoli e che causa danni sulla quantità e sulla qualità del prodotto. È un fungo ad elevata attitudine saprofitaria, in grado di crescere a basse temperature e che viene favorito da condizioni di elevata umidità.

Colpisce tutti gli organi della pianta, i sintomi sulle foglie si manifestano come macchie brune che si ricoprono e causano un'efflorescenza gialla; sulle infiorescenze, tralci e gemme causa disseccamenti e marciumi mentre sugli acini, in particolare quelli già colpiti da oidio, causa marcescenza.



Figura 34: Acini marcescenti a causa di botrite

(S. Lavezzaro, 2017)

I criteri di lotta si possono distinguere in misure indirette e dirette. Per quanto riguarda quelle indirette si interviene riducendo l'umidità relativa in campo con defoliazioni, potature verdi e arieggiamento della vegetazione. Inoltre, sono consigliate le varietà con grappoli poco compatti che hanno minor umidità al loro interno. Le misure dirette riguardano i trattamenti fitosanitari con utilizzo di principi attivi polivalenti, spesso contro peronospora e botrite, come Folpet o dicarbossimidici, e si hanno quattro fasi di trattamento, la prima in post fioritura, la seconda e più importante è alla chiusura del grappolo, la terza all'invaiaatura e la quarta a 20/25 giorni dalla vendemmia.

Scopo del lavoro

L'obiettivo primario di questa ricerca è lo sviluppo di una piattaforma robotica, denominata AgroSenseBot, progettata per adattarsi a una vasta gamma di condizioni operative. Essa è in grado di regolare la larghezza della carreggiata e l'altezza dal suolo, rendendola idonea per lavorare in vari contesti, come le colture a pieno campo, i vigneti, i frutteti e le serre. Gli obiettivi principali includono: migliorare l'efficacia dei trattamenti fitosanitari, ridurre il numero di interventi sul campo rendendoli più mirati, ridurre l'uso di fitofarmaci con conseguenti risparmi economici e benefici ambientali, oltre a ottimizzare il tempo di lavoro.

Materiali e Metodi

Il robot complessivamente ha altezza di 2,2 m e larghezza totale di 1,5 m, il telaio è una piattaforma a carreggiata variabile che permette di cambiare da 0,88 m fino a 2,5 m, e la luce libera dal suolo da circa 0,2 m fino a circa 0,5 m. Come organo di propulsione si è optato per un carro cingolato in gomma di larghezza e di lunghezza rispettivamente 0,23 m e 1,9 cm, affinché si possa limitare il fenomeno di compattamento del suolo e incrementare al contempo le capacità di trazione.

Per contenere i costi, sono state scelte comuni batterie al piombo a ciclo profondo: in particolare, sono state montate in serie a bordo otto batterie da 6 V con una capacità di 310 Ah, che forniscono una tensione nominale di funzionamento di 48 V e una capacità di 14,88 kWh, più che sufficiente per il funzionamento sperimentale. Una volta terminata la fase sperimentale, è già previsto l'utilizzo di batterie al litio del tipo LiFePO₄ con capacità simile. Queste batterie possono accettare elevate correnti in ingresso per la ricarica in tempo reale, consentendo inoltre al robot di portare a bordo un generatore elettrico con un motore a combustione interna di circa 10 kW, trasformando così AgroSenseBot in un veicolo a propulsione ibrida in serie con un'autonomia di lavoro molto elevata.

Il robot includendo le strumentazioni e l'atomizzatore, nella configurazione a carreggiata ridotta con altezza libera dal suolo ridotta a circa 0,2 m, ha un peso di circa 1400 kg mentre nella configurazione a carreggiata larga con un'altezza da terra di 0,5 m, sempre con il serbatoio vuoto, raggiunge i 2050 kg.

L'atomizzatore è una delle componenti principali del robot e occupa tutta la parte posteriore della macchina, il suo peso complessivo è di 215 kg ed è composto dal sistema di pompaggio che ha portata massima di 71,3 l/min e 550 giri/minuto e pressione massima esercizio di 50 bar. Il serbatoio ha capacità di 300 l ed è composto da serbatoio principale, il quale contiene la miscela con il fitofarmaco, due serbatoi con acqua pulita di cui uno per il risciacquo del serbatoio principale e l'altro per esigenze dell'operatore. La dispersione del fitofarmaco avviene tramite 14 ugelli a ventaglio singolo, specularmente 7 per lato, in materiale plastico specifico.

Nella tabella sottostante viene illustrato il peso che può assumere AgroSenseBot nelle sue diverse conformazioni strutturali.

	Atomizzatore vuoto		Atomizzatore pieno	
Peso robot min - basso e stretto	1410	kg	1710	kg
Peso robot - alto e stretto	1505	kg	1805	kg
Peso robot - largo e basso	1650	kg	1950	kg
Peso robot max - largo e alto	1745	kg	2045	kg

Tabella 1: Peso robot nelle diverse conformazioni

Sul lato sinistro di AgroSenseBot è installata la cabina computer, punto focale del progetto e crocevia di tutte le informazioni in entrata e in uscita, il computer ASUS ROG Strix SCAR 18 G834JY-N6048 elabora i dati accumulati dai sensori e fornisce al robot le informazioni per il movimento e l'attivazione dell'atomizzatore. Le informazioni però non arrivano dal sensore al computer per via diretta ma passano per un altro tassello fondamentale della macchina, cioè il quadro elettrico generale, posizionato nella parte anteriore e contiene tutto ciò che è il cablaggio del robot ed è il centro per il radiocomando.

Sensori impiegati

Il robot è dotato di computer, software e sensori che gli permettono di essere autonomo e intelligente, sul fronte e sul retro sono posizionati i sensori lidar, i quali grazie a una specifica struttura costruita sul telaio, gli permettono di avere la visuale ottimale verso l'ambiente esterno, oltre all'ampio spettro visivo è importante posizionarli in modo tale da fargli avere il miglior angolo di azione rispetto al terreno e al target. Nella parte superiore del telaio infine è posizionato il sensore RTK che permette di localizzare il robot nello spazio.

Il robot è dotato di telecomando che permette di manovrare manualmente i movimenti e inoltre nel caso di situazione in guida autonoma l'operatore può fermare repentinamente la macchina, tramite il pulsante di arresto di emergenza.

Il computer portatile (ASUS ROG Strix SCAR 18 G834JY-N6048) dotato di un processore da 24 core, 32GB di memoria RAM, e una GPU di ultima generazione (Nvidia RTX 4090) con 16 GB di memoria grafica. Queste specifiche ci permetteranno di utilizzare complessi algoritmi di intelligenza artificiale per la percezione basati su reti neurali, la navigazione autonoma all'interno del campo e della serra, anche in prossimità di persone, e l'elaborazione dei dati da una varietà di sensori che comprendono LIDAR, IMU, GPS RTK, e telecamere iperspettrali.

I pianificatori richiedono informazioni dai sensori LiDAR per percepire gli ostacoli. I LiDAR multipiano sono montati sulla parte anteriore e posteriore del robot, consentendoci di navigare sia in avanti che indietro. Il volume della chioma viene stimato lungo il filare e per diversi strati orizzontali costruendo un modello 3D. Il modello 3D, chiamato octomap, è costruito utilizzando la libreria OctoMap discretizzando lo spazio in voxel di 5 cm (una griglia di volumi cubici di uguali dimensioni) per determinare le regioni di spazio occupate dalla coltura. Ogni voxel è considerato spazio libero o occupato in base a un modello probabilistico. La probabilità che un voxel sia occupato aumenta quando un raggio LiDAR colpisce la chioma all'interno del voxel e diminuisce quando un raggio lo attraversa senza colpire un oggetto. L'estensione dell'OctoMap è limitata a una regione di spazio entro le coordinate cartesiane minime e massime nel quadro di riferimento della chioma, che si trova a terra e ha l'asse x allineato con il filare. Questo si ottiene considerando solo il LiDAR e la chioma. Questo si ottiene considerando solo i dati LiDAR entro questi limiti. La copertura viene suddivisa in N strati (ad esempio, strato superiore, medio e inferiore) semplicemente costruendo otto mappe distinte con coordinate z minime e massime diverse. Il numero di strati e la loro estensione verticale devono essere scelti in base alla cultivar e al sistema di allevamento dell'uva. Il modello 3D viene costruito utilizzando il sensore LIDAR anteriore in tempo reale mentre il robot avanza lungo l'asse x del filare. Il flusso di irrorazione viene regolato tenendo conto del volume della chioma misurato in corrispondenza della coordinata x degli ugelli dell'irroratore, montati sul retro del robot. Inoltre, il flusso viene regolato per diverse serie di ugelli in base al volume degli strati della chioma di altezza corrispondente. Per ovviare a questo problema, misuriamo la velocità angolare del veicolo direttamente con il giroscopio di un'unità di misura inerziale (IMU), mentre la velocità lineare del veicolo viene ancora calcolata con una funzione cinematica analitica della velocità delle tracce. Il controllo della piattaforma si basa anche sulla misura della velocità angolare dell'IMU, utilizzando un controllore proporzionale integrale (PI) che calcola la differenza tra la velocità della traccia sinistra e quella della traccia destra. Le misure IMU e RTK sono fornite dal sensore MicroStrain 3DM-GQ7, che supporta la bussola GNSS a doppia antenna, consentendoci di misurare direttamente la direzione del veicolo (anche se a bassa frequenza) utilizzando il segnale GNSS. L'odometria del veicolo e le misure di posizione e direzione RTK sono utilizzate dalla componente di localizzazione del sistema, che stima la posizione e la direzione corrente del veicolo utilizzando un filtro di Kalman esteso (EKF).

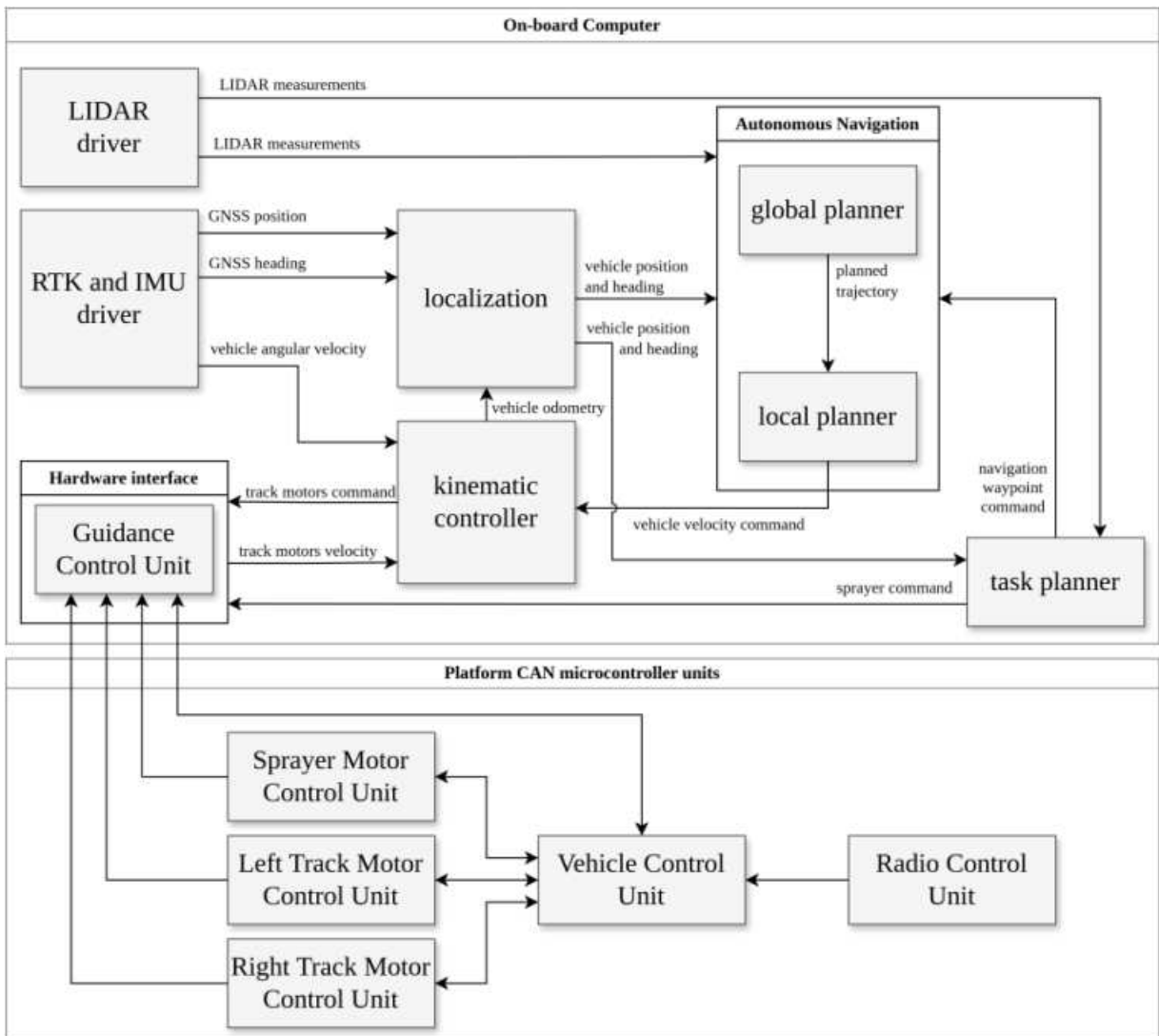


Figura 35: Schema della comunicazione tra le unità di microcontrollo CAN bus che controllano la piattaforma e i componenti del sistema ROS2 che implementano la navigazione autonoma.

Software

Per garantire un adeguato livello di sicurezza, si è optato per la divisione della logica di controllo del robot in due strati. Lo strato a più basso livello è implementato con moduli di controllo di grado industriale che comunicano su una rete CAN. Qui un modulo di controllo del veicolo comanda i motori che azionano i cingoli e l'atomizzatore in base ai comandi ricevuti dallo strato superiore e da un radiocomando. Il radiocomando permette all'operatore sia di comandare il veicolo manualmente che di interrompere il movimento tramite pulsante

di arresto di emergenza. Nello strato superiore viene implementato il livello di controllo più alto, come per esempio la fusione di dati da vari sensori, la guida autonoma e la pianificazione del task agricolo. In modo complementare alla piattaforma fisica, abbiamo sviluppato un modello di simulazione fisica della piattaforma utilizzando il software Webots2. Questo ci permette di sviluppare e testare il software in un ambiente completamente virtuale, inclusa la correttezza della comunicazione di dati su una rete CAN virtuale, lo sviluppo e il test in sicurezza degli algoritmi di navigazione autonoma, e l'esecuzione di task agricoli. In futuro la piattaforma robotica permetterà oltretutto di validare l'interfacciamento con un conduttore remoto che attraverso la realtà aumentata, potrà non solo supervisionare l'esecuzione dei task, ma grazie alla capacità di azionare gli strumenti del robot in un ambiente virtuale tridimensionale, anche istruire l'intelligenza artificiale per superare problematiche derivanti dall'operatività in campo, fornendo ulteriori dati che consentono all'intelligenza artificiale di migliorare.

La piattaforma stessa è un sistema autosufficiente gestito attraverso un radiocomando, che può essere controllato anche da un computer esterno. La logica necessaria per garantire la sicurezza e controllare i motori e gli attuatori è implementata sulla piattaforma con microcontrollori che utilizzano il protocollo CANopen. Sebbene i microcontrollori comunichino su una rete con topologia a stella, sono configurati per inviare e ricevere solo dati. L'unità di radiocomando riceve lo stato del telecomando tenuto dall'operatore. Le unità di controllo dei motori dello spruzzatore, del cingolo sinistro e del cingolo destro sono inverter che controllano la rotazione dei motori e inviano informazioni sul CAN-BUS, come la velocità effettiva dei motori. La Guidance Control Unit (GCU), implementata sul computer di bordo come nodo CANopen software, comunica sul CAN-BUS per inviare i comandi di velocità del motore alla piattaforma e trasmettere le informazioni necessarie al software di controllo di livello superiore. Infine, l'unità di controllo del veicolo (VCU) implementa la logica di controllo della piattaforma, che può essere riassunta in tre stati operativi che determinano il modo in cui la piattaforma viene controllata: manuale, autonomo e fermo. Nello stato manuale, solo i comandi dei motori e degli attuatori provenienti dall'unità di controllo radio vengono inoltrati dalla VCU alle rispettive unità di controllo motore. Nello stato autonomo, i comandi motore vengono inoltrati dalla VCU dalla GCU alle unità di controllo motore. In questo stato, i comandi manuali applicati dall'operatore sovrascrivono i comandi autonomi della GCU. Se l'operatore impartisce

comandi manuali per più di due secondi, la VCU passa allo stato manuale. Nello stato di arresto, la VCU blocca i motori e disattiva gli attuatori ponendo la piattaforma in uno stato di sicurezza. Per sicurezza, la piattaforma deve essere sempre collegata al radiocomando, che consente all'operatore di arrestare la piattaforma tramite un pulsante di arresto di emergenza.

Framework

Il Robot Operating System (ROS) è un insieme di librerie e strumenti software per la realizzazione di applicazioni robotiche. ROS offre gli strumenti open source necessari generalmente per progetti di robotica, esso comprende driver e algoritmi all'avanguardia per gli sviluppatori.

Il controllo di alto livello è implementato usando il framework ROS2, dove possibile utilizzando componenti software open source, e adeguandoli quando necessario. Nonostante molti algoritmi generali di guida autonoma di robot siano disponibili per diversi tipi di piattaforme robotiche all'interno del framework ROS2, per il nostro caso specifico di una piattaforma cingolata agricola si è reso necessario adeguare vari componenti software. La principale funzione di ROS2 è di implementare sul computer di bordo il software di controllo di alto livello, necessario per svolgere il compito agricolo autonomo.

Le funzioni di navigazione autonoma della piattaforma sono implementate utilizzando lo stack di navigazione Nav2 (anch'esso parte del framework ROS2), adeguando, dove necessario, all'ambito di navigazione agricola i componenti software ROS2, che sono stati sviluppati per ambiti generali.

Server di navigazione

I pianificatori e i controllori sono il cuore di un compito di navigazione. I recuperi vengono utilizzati per far uscire il robot da una situazione negativa o per cercare di affrontare varie forme di problemi per rendere il sistema tollerante ai guasti. Gli smussatori possono essere utilizzati per migliorare ulteriormente la qualità del percorso pianificato. In questa sezione vengono analizzati i concetti generali e il loro utilizzo in questo progetto. L'obiettivo del software di navigazione è inviare comandi di velocità al controllore cinematico per spostare il veicolo in una posizione specifica o attraverso una serie di waypoint. A tal fine, la funzionalità di navigazione è suddivisa in due componenti: il pianificatore globale, che

pianifica una traiettoria dalla posizione attuale del veicolo alla destinazione attraverso più waypoint, e il pianificatore locale, che invia comandi di velocità per spostare il veicolo lungo la traiettoria garantendo l'evitamento di ostacoli (come colture, pendenze eccessive del terreno e persone vicine al robot).

I Behaviour, definibili anche come comportamenti di recupero hanno l'obiettivo di affrontare condizioni sconosciute o di guasto del sistema e di gestirle autonomamente. Ad esempio, si possono verificare guasti nel sistema di percezione, per cui la rappresentazione dell'ambiente è piena di ostacoli falsi. Per l'affinamento del percorso sono stati introdotti gli smoothers, che in genere hanno il compito di ridurre l'irregolarità del percorso e di smussare le rotazioni brusche, ma anche di aumentare la distanza dagli ostacoli e dalle aree ad alto costo, poiché gli smoothers hanno accesso a una rappresentazione ambientale globale.

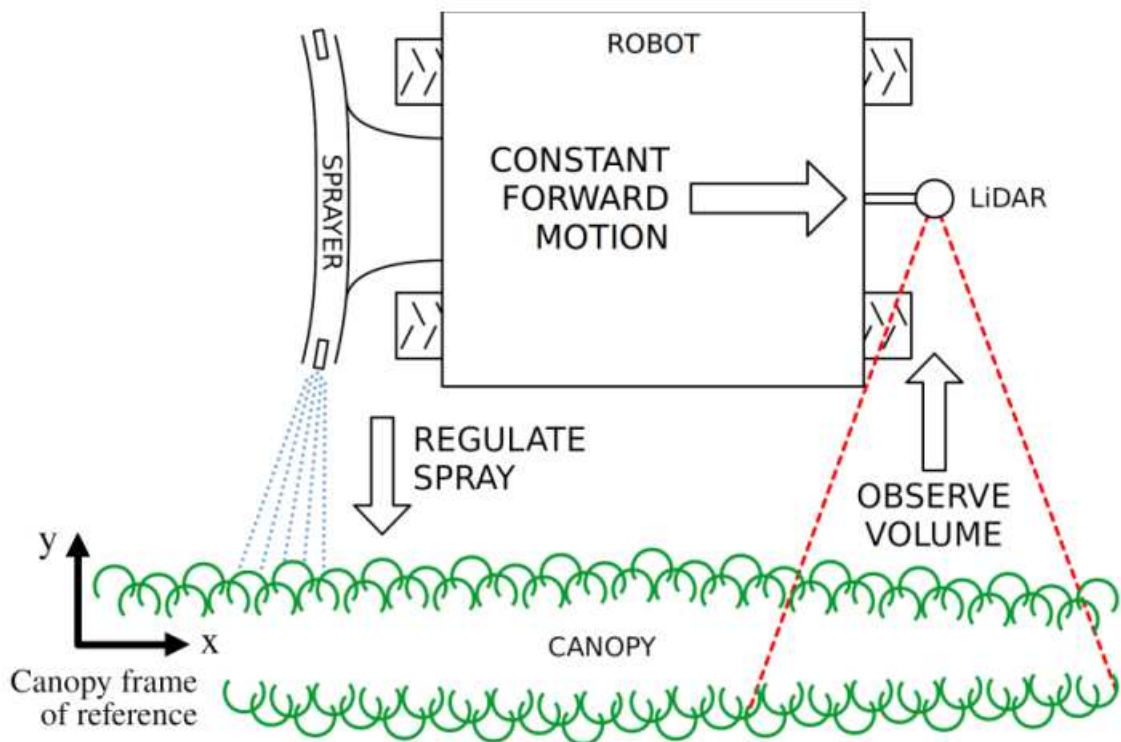


Figura 36: Schema dell'attività di stima del volume della chioma e di irrorazione in tempo reale.

Raccolta ed elaborazione dati

I primi test effettuati si sono incentrati sulle misurazioni della percorrenza del robot e della tenuta di carreggiata, al fine di calibrare la potenza di propulsione più idonea e la capacità dei cingoli di rispondere agli input delle batterie. Il secondo test aveva lo scopo di individuare il raggio di curvatura ottimale del robot con prospettiva di vederlo operare tra i filari del

vigneto; infine, è stato effettuato un test sulla capacità del robot di dosare l'erogazione del fitofarmaco in proporzione alla canopy del filare rilevata dal sensore lidar e processata dal software.

Tenuta di carreggiata lungo filare

Il primo test è stato effettuato all'esterno del capannone dell'Università Statale di Milano, situato a Cornaredo, più precisamente in località Cascina Baciocca su un terreno composto prevalentemente da ghiaia grossolana.

Il test consisteva nel far percorrere al robot 10 metri in linea retta, in modalità completamente autonoma tramite un percorso preimpostato dal software, che usufruisce del segnale GPS fornito dal sensore RTK montato sul tetto del robot. L'esperimento era volto a simulare la percorrenza della macchina attraverso il filare di un tipico vigneto di pianura, quindi senza particolari pendenze e curve lungo il percorso, inoltre in condizioni pressoché ottimali del terreno e in assenza di ostacoli. Questo primo test aveva l'ulteriore funzione di comprendere le dinamiche attorno alla capacità di propulsione dei cingoli in gomma, la potenza reale che le batterie riuscivano a erogare in condizioni quasi perfette, quanto influisse il peso dell'atomizzatore, seppur a serbatoio vuoto, sulla locomozione, verificare le risposte che il robot dava ai vari input del computer, osservare se il segnale di posizionamento del robot nello spazio fosse corretto, siccome anche solo un discostamento della posizione di pochi centimetri potrebbe causare danni ingenti.



Figura 37: AgroSenseBot durante l'esperimento per la tenuta di carreggiata lungo filare

I test hanno riportato delle ottime risposte da parte del robot, il quale non si è mai allontanato dalla traiettoria originale per più di 20 cm, solo nel terzo test a inizio percorrenza si è verificato un grosso allontanamento, anche se successivamente verrà spiegato il motivo. Prima di entrare nello specifico dei tre percorsi effettuati, è necessario rendere noto che: la linea blu descrive il percorso da seguire, la linea rossa indica la distanza, istante per istante, dal percorso, infine il rettangolo nero raffigura il footprint del robot. Per quanto riguarda la base dell'immagine, sono presenti, anche se poco visibili, due linee verdi che rappresentano i filari, e in grigio la griglia vettoriale con dimensione del quadrato maggiore di 1 m, mentre quelli minori di 0.1 m.



Figura 38: Da sinistra verso destra sono rappresentati Percorso 1, Percorso 2 e Percorso 3

I tre percorsi hanno rispettato egregiamente le aspettative, ripercorrendo quasi perfettamente il tracciato preimpostato, dai segmenti rossi perpendicolari alla linea blu, si può notare dalla loro lunghezza, che tendenzialmente il robot non si è mai discostato più di 10 cm dal target per l'intera percorrenza, garantendo per il futuro sicurezza e affidabilità. L'unico allontanamento importante da evidenziare, si è verificato nel Percorso 3 a causa di un orientamento eccessivo al punto di partenza del robot, ciò spiega il distacco per i primi 4 metri di circa 40 cm dal percorso. Da sottolineare come il robot in maniera totalmente autonoma sia riuscito a correggere la sua traiettoria e ritornare al tracciato corretto in pochi metri.

I grafici di figura 39,40 e 41, descrivono rispettivamente la velocità angolare del robot lungo il tracciato, sull'asse delle ascisse il tempo e sulle ordinate la velocità angolare, la linea blu

indica il setpoint, cioè la velocità angolare richiesta al veicolo mentre in rosso la misura della velocità effettiva del robot.

I primi due percorsi mostrano una risposta corretta del robot alle richieste, mentre nel percorso 3, a causa di ciò che è stato precedentemente descritto, si può notare un grande discostamento tra velocità richiesta e velocità effettiva nei primi secondi del percorso.

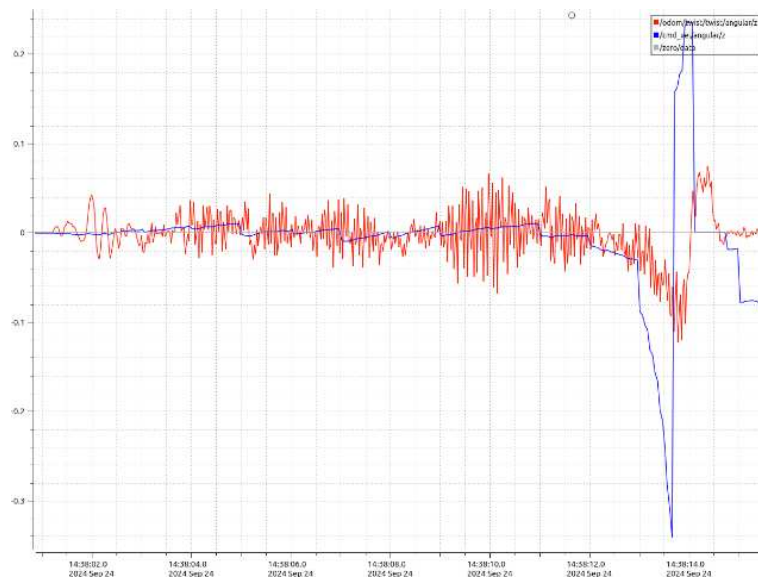


Figura 39: Velocità angolare Percorso 1

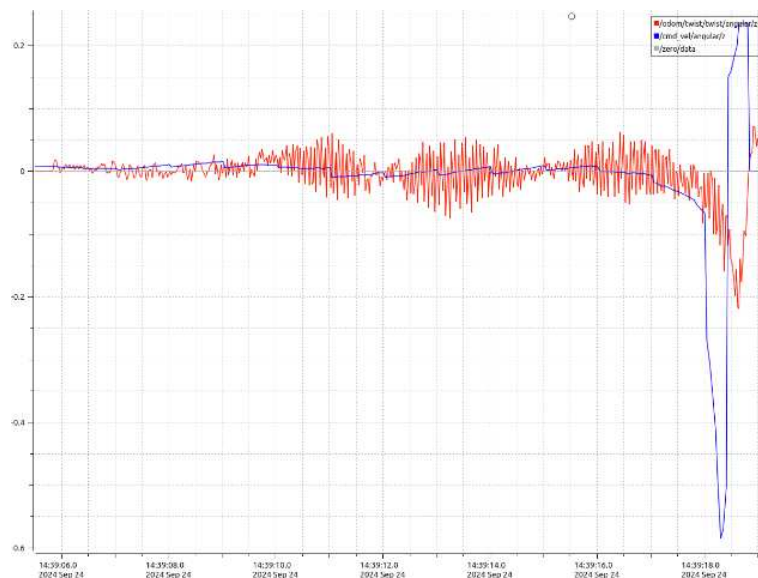


Figura 40: Velocità angolare Percorso 2

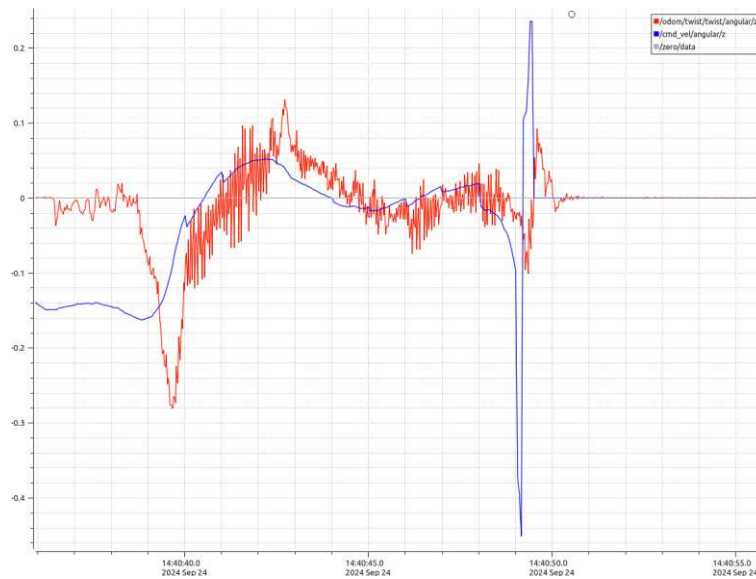


Figura 41: Velocità angolare Percorso 3

I grafici sottostanti riportano la velocità lineare tenuta dal robot, come per la velocità angolare, si può notare come nei percorsi 1 e 2 si ha un'ottima risposta del robot, mentre nel percorso 3 si riscontrano svariate irregolarità a inizio corsa.

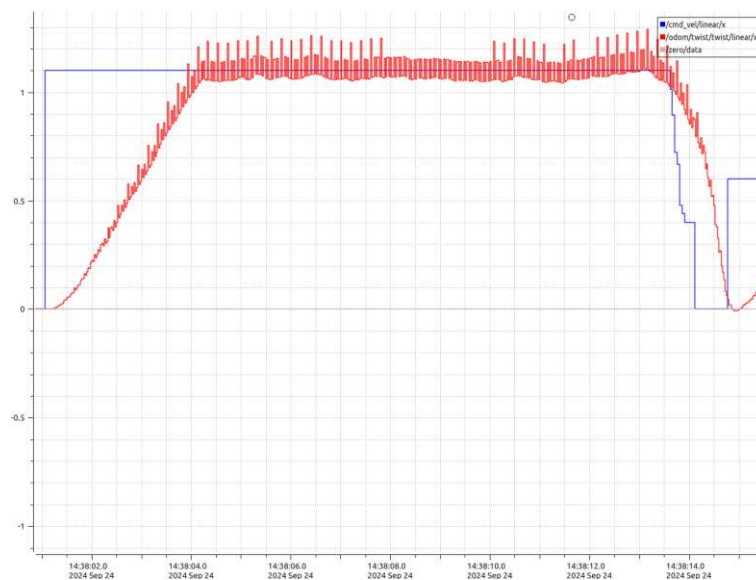


Figura 42: Velocità lineare Percorso 1

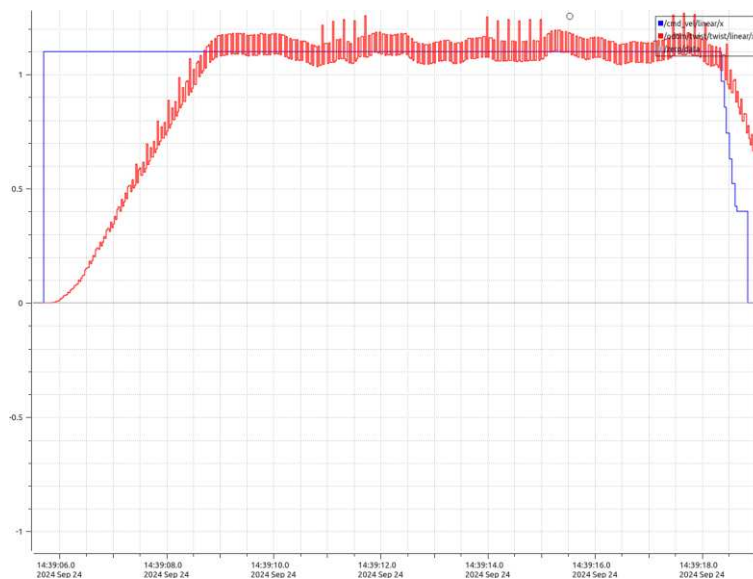


Figura 43: Velocità lineare Percorso 2

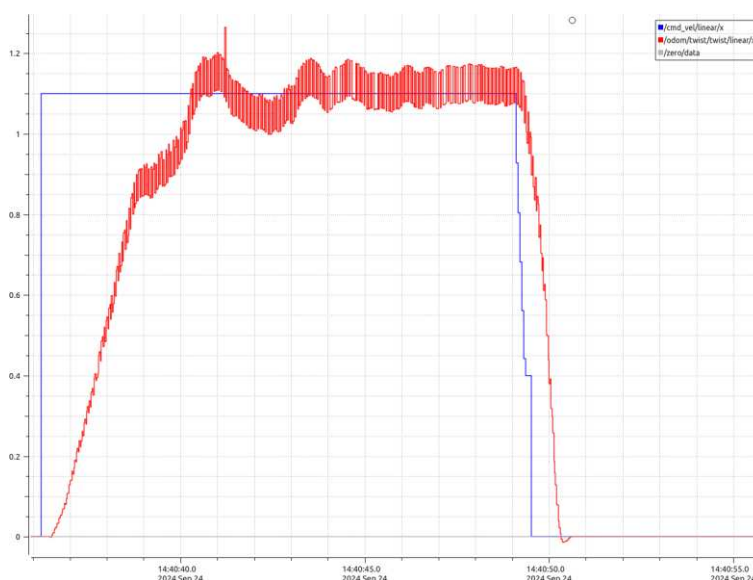


Figura 44: Velocità lineare Percorso 3

Per quanto riguarda i grafici in figura 45, 46 e 47, si può notare come la distanza all'inizio del grafico si riferisce al percorso precedente che porta il robot all'inizio dell'inter-fila. Appena il robot comincia la navigazione inter-fila, il percorso viene adeguato alla posizione del robot, siccome non è esattamente nel punto in cui doveva posizionarsi. Per questo motivo, la distanza passa istantaneamente da 0.25 a quasi 0, infatti in tutti e 3 i percorsi, si può notare che il robot non si posiziona mai esattamente sul target ma dai 10 ai 30 cm da dove inizierebbe il percorso, per poi aggiustare la sua traiettoria lungo il percorso. Complessivamente, come già accennato, il livello di precisione è molto alto, rilevando

mediamente picchi di allontanamento dal target di 9 cm; infatti, l'allontanamento maggiore si è verificato nel terzo percorso, di 38 cm con il successivo riassetto del robot che infatti nella seconda parte di tracciato, come evidenzia il grafico, rispecchia i valori medi dei due percorsi precedenti.

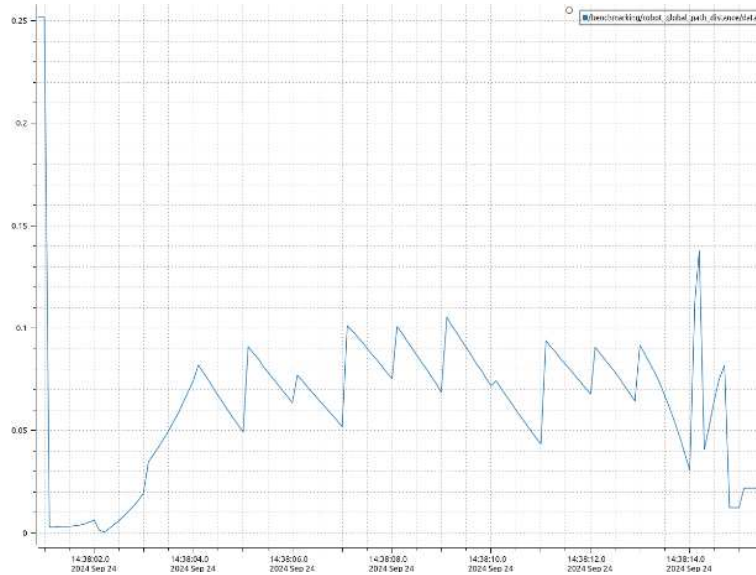


Figura 45: Distanza dal target di partenza Percorso 1

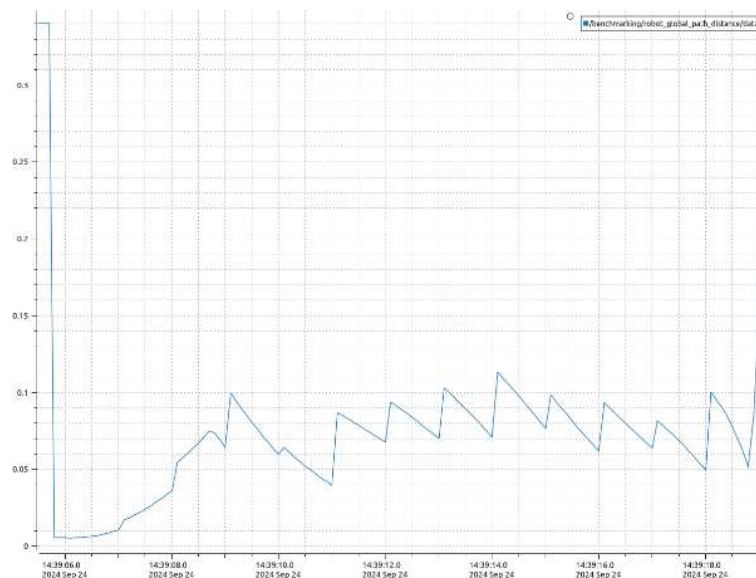


Figura 46: Distanza dal target di partenza Percorso 2

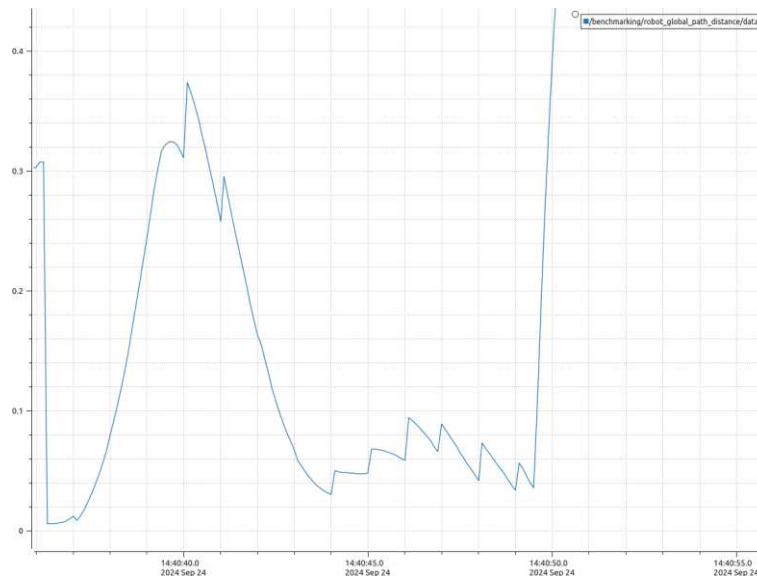


Figura 47: Distanza dal target di partenza Percorso 3

Raggio di curvatura

Il secondo test è stato volto a ricavare due fondamentali informazioni per il futuro del robot nel vigneto: la capacità di curvatura massima e quella ottimale in totale autonomia di guida. La logica dei test ha seguito il percorso che avrebbe dovuto fare agrosensebot nella realtà; quindi, una volta terminato il tragitto rettilineo lungo il quale ha effettuato il trattamento mirato, si sarebbe ritrovato a interrompere l'erogazione e svoltare per poi inserirsi in una nuova fila e continuare il trattamento. Perciò, è di fondamentale importanza conoscere il raggio minimo di curvatura e quello ottimale per il robot, essendo che le condizioni ambientali, in particolare del terreno, possono variare repentinamente, inoltre ogni azienda adotta nel proprio vigneto la forma di allevamento preferita; quindi, anche la distanza da una fila all'altra può variare tra le aziende. Proprio per questo, il robot deve avere un'ampia capacità di adattamento ad ogni situazione.

Dai test si è potuto constatare che il minor raggio di curvatura effettuabile dal robot è di 1.5 m, specificando però in condizioni pressoché ideali, inoltre richiedere continuamente al robot il minimo raggio di curvatura, lo porterebbe compiere importanti sforzi di sistema, in particolare per le batterie che rischierebbero di rovinarsi velocemente. Per questo è stato deciso di impostare nel software un raggio di curvatura standard, che corrisponde a 2 m, così da mantenere un sufficiente livello di agilità tra i filari ovviando con piccole manovre di correzione preimpostate dal computer e non sforzare in maniera eccessiva le batterie per una funzionalità più duratura. Certo è che le affermazioni fatte potranno essere rivalutate nel

corso del tempo, attraverso nuovi test, per molteplici motivazioni, dalla modifica delle caratteristiche strutturali del robot all'implementazione di nuove tecnologie. Nella configurazione a carreggiata stretta, i motori dei cingoli non hanno una coppia sufficiente per ruotare in posizione su superfici con un elevato coefficiente di attrito, come l'erba e l'asfalto, mentre le superfici con un coefficiente di attrito relativamente basso, come il cemento e la ghiaia sciolta, non presentano questo problema. Per superare questa limitazione, vincoliamo le traiettorie ad avere un raggio di sterzata minimo che garantisca un comando di velocità angolare massima durante la navigazione. Questo si ottiene utilizzando il pianificatore SMAC, che può generare traiettorie basate sulle primitive di Reeds-Shepp. Il pianificatore locale utilizzato è il Regulated Pure Pursuit, da noi modificato per imporre il vincolo del raggio di sterzata minimo.

Simulazione 3D di un trattamento fitosanitario

Il terzo test ha riguardato una simulazione 3D di un trattamento fitosanitario del robot sul software OctoMap, essa si è basata su far percorrere il robot per la carreggiata, esso dotato di LIDAR individua il volume di vegetazione presente, invia i dati al software che li elabora e invia l'informazione di regolazione degli ugelli al quadro elettrico. A seconda di ciò che viene rilevato, gli ugelli vengono aperti o chiusi lungo il tracciato. L'atomizzatore, dotato di 14 ugelli, monta per ogni singolo ugello un sensore che ne permette il suo azionamento; quindi, nella situazione in cui nella fascia inferiore del filare non ci sia più vegetazione, come si può notare anche dalle immagini della simulazione, il computer immediatamente ordina agli ugelli interessati di chiudersi, quindi di non disperdere nell'ambiente fitofarmaci e al contempo risparmiarne ingenti quantità.

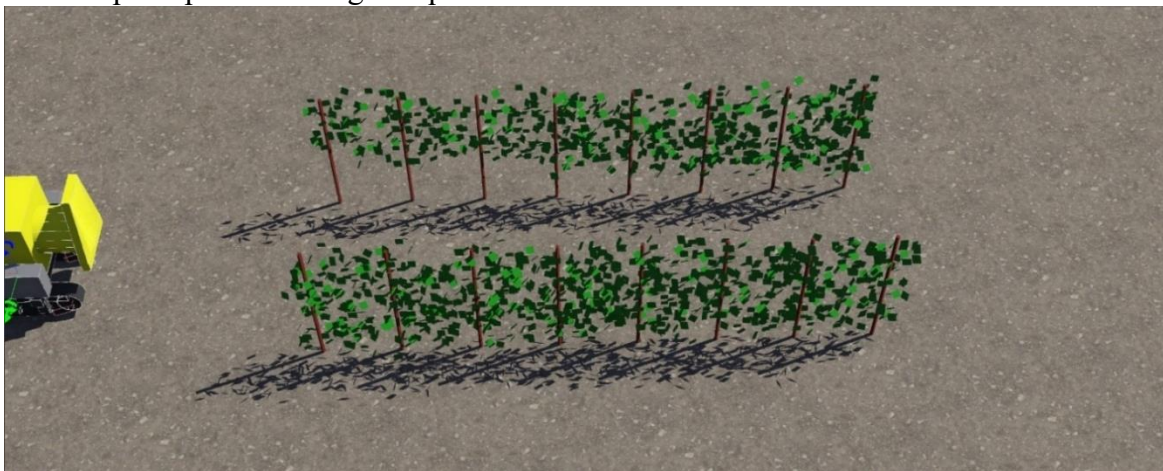


Figura 48: Simulazione 3D di filari di vite

Come mostrato in figura 48, i due filari simulati sono composti da otto piante ciascuno, perfettamente disposti in linea retta ed equamente distanziati. Per rendere la simulazione ancora più esauriente in termini di risultati, si è optati per caratterizzare i due filari diversamente, uno ha vegetazione fitta e continua in tutte le piante, distribuita lungo tutta l'altezza di esse, mentre l'altro presenta un decrescere della vegetazione nella fascia inferiore delle piante.

Il grafico sottostante rappresenta l'azionamento degli ugelli dell'atomizzatore, nella simulazione precedentemente mostrata, in base alla vegetazione rilevata dal sensore LIDAR. L'asse delle ascisse è rappresentato dal tempo di percorrenza lungo il filare mentre l'asse delle ordinate è rappresentato dall'apertura degli ugelli, quelli sul lato sinistro sono rappresentati dalle curve verde e blu, mentre quelli a destra sono descritti dalle curve azzurra e rossa. È necessario fare un'altra fondamentale distinzione, siccome le curve verde e azzurra rappresentano gli ugelli posizionati nella zona più bassa dell'atomizzatore, e quindi intervengono nella fascia più bassa della vite, mentre le curve blu e rossa rappresentano gli ugelli nella zona più alta dell'atomizzatore, e di conseguenza intervengono nella fascia più alta della vite.

Sono stati presi come esempio appositamente gli ugelli disposti nelle posizioni opposte proprio per evidenziare numericamente e graficamente le risposte degli ugelli alla canopy rilevata lungo il percorso.

Vengono evidenziati nel grafico due momenti chiave: il primo è a inizio filare destro, nel quale viene rilevata una fitta vegetazione e di conseguenza viene trasmesso tempestivamente il segnale all'ugello di aumentare l'erogazione di fitofarmaco, il secondo punto chiave e probabilmente l'esempio che esalta più di tutti, il concetto di agricoltura di precisione, siccome dal momento in cui non viene più rilevata vegetazione nella fascia bassa del filare destro, l'ugello in basso a destra smette completamente di erogare il fitofarmaco.

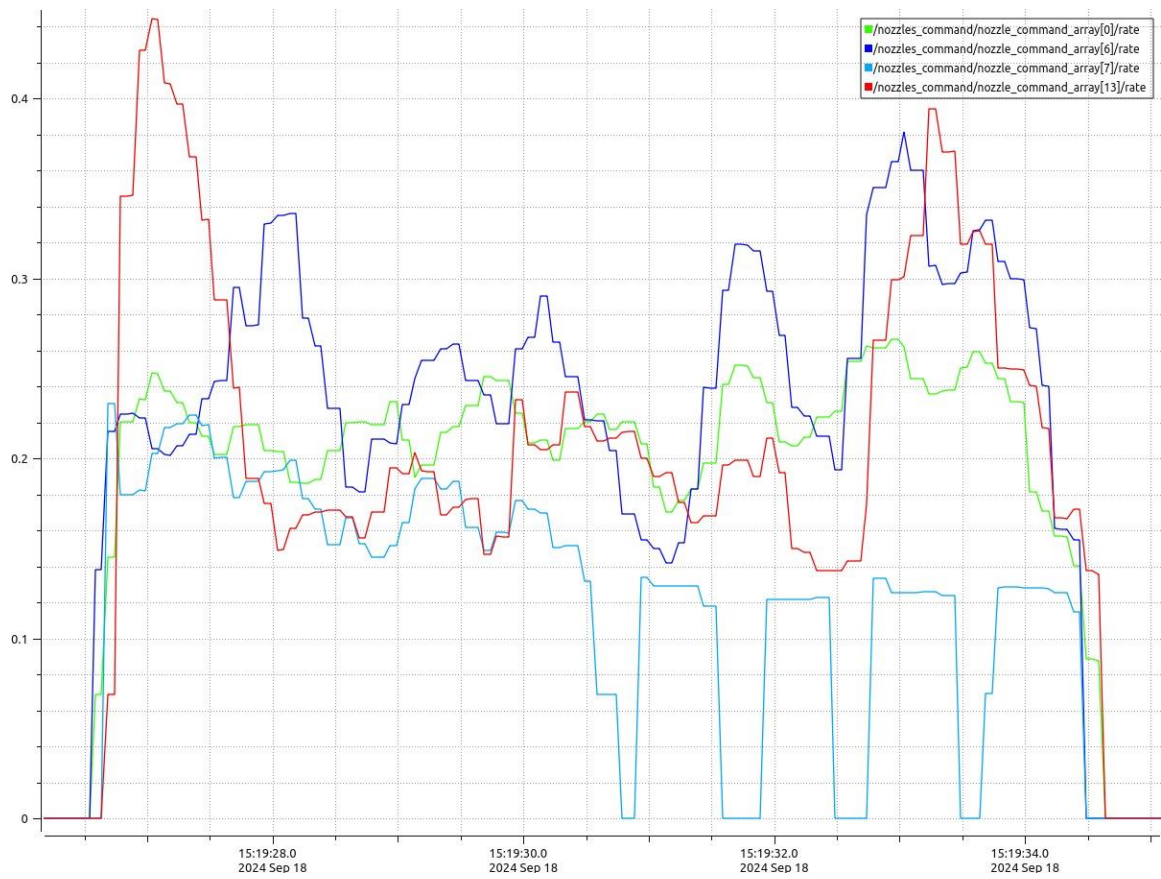


Figura 49: Grafico che rappresenta l'azionamento degli ugelli nel tempo e nello spazio

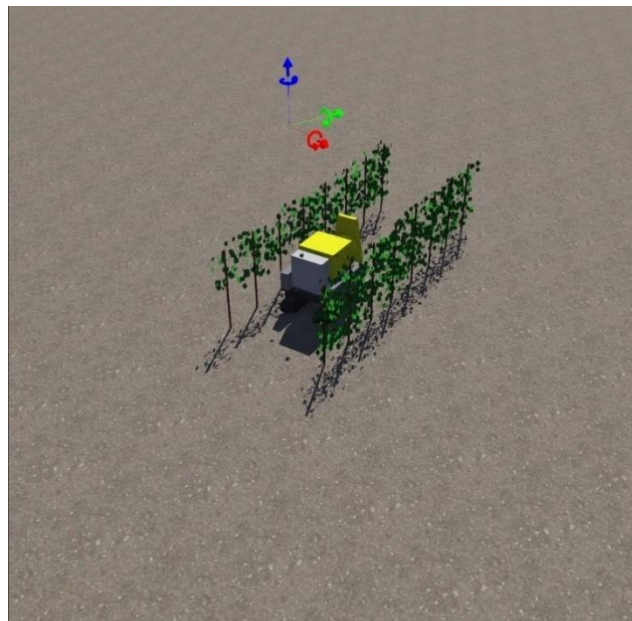


Figura 50: Simulazione di AgroSenseBot
tra i filari

Nella figura 50 viene raffigurata da un'altra angolazione la simulazione precedentemente illustrata.

La simulazione, come mostrato in figura 51, offre inoltre di mostrare il percorso dal punto di vista del robot, ciò che viene rilevato e come viene elaborato. Il colore viola presente prevalentemente ai lati dell'immagine e nelle due strisce in centro alla figura, rappresenta l'ostacolo rilevato da AgroSenseBot contro cui non può collidere svoltando, il colore azzurro identifica il punto in cui il robot può collidere con l'ostacolo svoltando sul posto, il colore blu segnala punti in cui potrebbe essere in collisione in funzione dell'angolo, infine i pallini gialli indicano la posizione del centro del robot nei vari istanti.

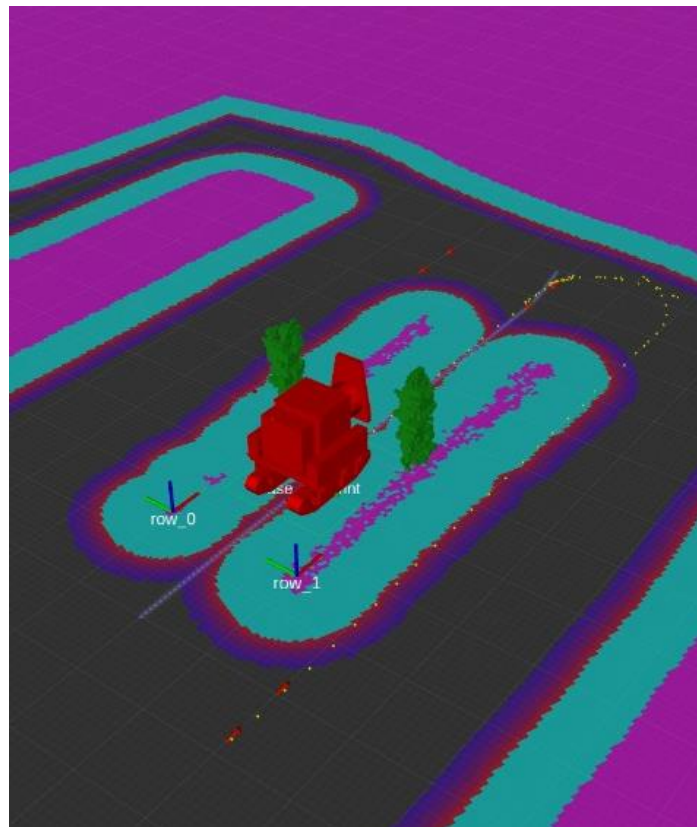


Figura 51: Visualizzazione degli ostacoli attorno ad AgroSenseBot

Sperimentazione del sensore Lidar in campo

Infine, è stato effettuato un test in campo, esso ha riguardato la percorrenza del robot lungo una siepe di circa 1,80 m di altezza, che poteva simulare un fitto filare di un vigneto; il test

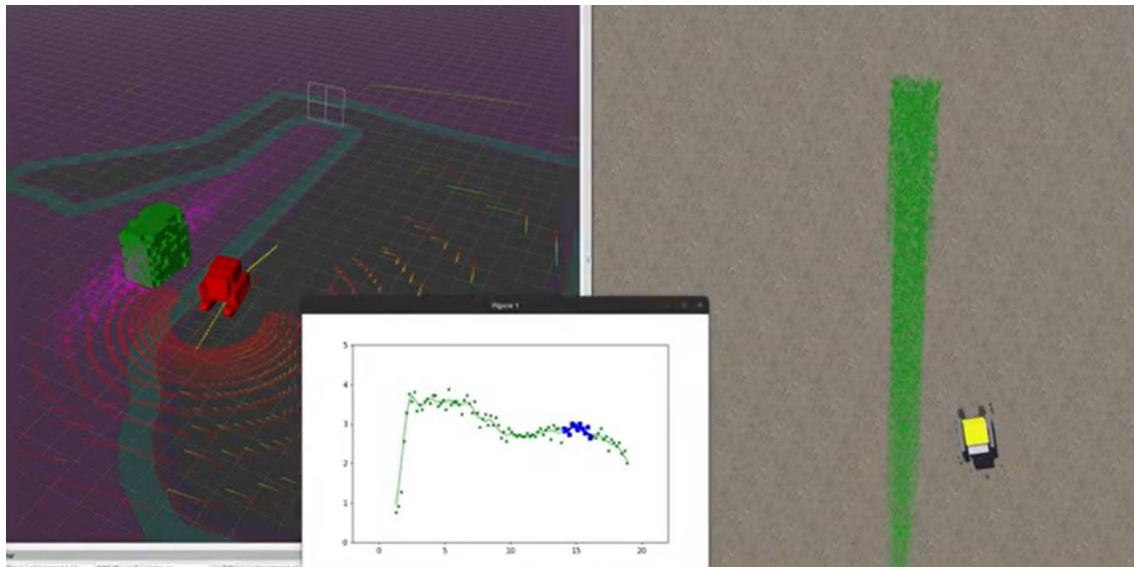


Figura 52: Percorrenza di AgroSenseBot lungo la siepe e grafico con rilevamento della canopy ha visto come protagonista il sensore Lidar, al fine di verificare le sue capacità nel rilevamento di volume della vegetazione della siepe, e il suo corretto direzionamento lungo il percorso con conseguente rilevamento di ostacoli. Innanzitutto, prima di far percorrere in autonomia il robot lungo il tracciato, è stato teleguidato in modalità manuale affinché potesse registrare il percorso e creare una mappa di percorrenza, visionata successivamente al computer. Successivamente, è stato impostato il sistema di guida autonoma, che permetteva ad AgroSenseBot di affidarsi sia al lidar che a un percorso già tracciato e approvato. Lo scopo era verificare se il robot, al momento dell'individuazione di un ostacolo, di uno sbandamento o di un errore di localizzazione, si fermasse tempestivamente. Il test, volto a rendere il robot più sicuro, oltre all'interruzione della locomozione della macchina, invierà una notifica all'operatore segnalando il problema riscontrato.

Conclusioni

La ricerca condotta ha permesso lo sviluppo di AgroSenseBot, una piattaforma robotica innovativa e adattabile a molteplici contesti operativi agricoli. Grazie alla sua capacità di regolare larghezza e altezza, il robot può operare efficacemente in campi aperti, vigneti, frutteti e serre, migliorando i trattamenti fitosanitari e riducendo l'uso di fitofarmaci, con conseguenti benefici economici e ambientali. L'integrazione di avanzati sensori, come LIDAR e RTK, permette al robot di rilevare ostacoli, mappare in tempo reale l'ambiente e dosare con precisione i fitofarmaci in base alla quantità di vegetazione rilevata, ottimizzando l'impiego delle risorse.

AgroSenseBot si è dimostrato capace di operare in modo autonomo, gestendo percorsi preimpostati e reagendo a situazioni impreviste grazie a un complesso sistema di controllo, che include il radiocomando per un intervento manuale in caso di emergenza. I test eseguiti hanno confermato l'efficienza del robot nel mantenere la carreggiata e nell'erogare i fitofarmaci in modo preciso, adattandosi alle diverse condizioni del terreno e alle caratteristiche strutturali del vigneto. Le capacità di curvatura e manovra del robot sono state calibrate per garantire la massima efficienza senza compromettere l'integrità delle batterie o il sistema di locomozione.

L'implementazione di un sistema di intelligenza artificiale e di modelli 3D consente al robot di gestire complessi algoritmi di navigazione autonoma e ottimizzare i compiti agricoli in modo dinamico. La possibilità di passare a una propulsione ibrida e l'impiego di batterie al litio in futuro aumenteranno ulteriormente l'autonomia e le prestazioni della piattaforma.

In conclusione, AgroSenseBot rappresenta un notevole passo avanti nell'agricoltura di precisione, offrendo un significativo miglioramento dell'efficienza operativa e una riduzione dell'impatto ambientale. Con ulteriori sviluppi tecnologici e test sul campo, il robot potrà consolidarsi come strumento essenziale per la gestione agricola moderna.

In futuro, dopo aver validato il sistema in vigneti reali, il lavoro verrà esteso all'ottimizzazione dei trattamenti con prodotti fitosanitari in serra e al diserbo meccanico selettivo in campo aperto. Infatti, il progetto prevede l'installazione di telecamere ottiche e multispettrali al fine di visionare ogni singola pianta, così da verificare il suo stato di salute. Qualora la pianta riscontrasse un problema, che sia di tipo abiotico come, ad esempio, la carenza idrica o biotico come l'attacco di un patogeno, il sistema di telecamere sarà in grado di individuarlo precisamente e segnalarlo all'operatore. per i seguenti motivi: aumento di

sicurezza sul luogo di lavoro, in presenza di un operatore, un estraneo o un animale selvatico, grazie ai sensori non si verificheranno incidenti; minor rischio di danneggiamento della macchina e della coltura, grande quantità di tempo e prodotto risparmiata dalle aziende grazie agli interventi mirati.

Bibliografia

1. OECD, Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation, 4th ed. Paris: OECD Publishing, 2018.
2. E. M. Rogers, Diffusion of Innovations, 1st ed. New York: Free Press of Glencoe, 1962.
3. FAO, "Precision Agriculture and Food Security," consultato il 20 Giugno 2024. [Online]. Available: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/0b6fdfa4-5a48-4289-99f5-2e1d898e5c60/content>
4. R. Gebbers and V. I. Adamchuk, "Precision agriculture and food security," Science, vol. 327, no. 5967, pp. 828–831, Feb. 2010. doi: 10.1126/science.1183899
5. H. Auernhammer and M. Demmel, "State of the art and future requirements," in Precision Agriculture Technology for Crop Farming, Q. Zhang, Ed. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis, 2016, pp. 299–346.
6. F. J. Pierce and J. M. Novak, "Precision farming: An overview," Advances in Agronomy, vol. 67, 2008. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0065211308605131>
7. National Research Council, Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management. Washington, DC: National Academy Press, 1997.
8. Ministero delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali. [Online]. Available: <https://www.politicheagricole.it>
9. "Smart agriculture and digital twins: Applications and challenges in a vision of sustainability," consultato il 28 Giugno 2024.

10. D. W. Crowder and J. P. Reganold, "Financial competitiveness of organic agriculture on a global scale," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 112, no. 24, pp. 7611–7616, 2015. doi: 10.1073/pnas.1423674112
11. *Informatore Agrario*, "La geolocalizzazione per la guida autonoma," consultato il 2 luglio 2024.
12. "Evoluzione tecnica delle irroratrici," *Mondo Macchina*, consultato il 4 luglio 2024. [Online]. Available: <https://www.mondomacchina.it/it/evoluzione-tecnica-delle-irroratrici-c630>
13. EUR-Lex, "Regolamento (UE) 2023/1230," Jun. 2023. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1230>
14. Università di Torino. [Online]. Available: <https://iris.unito.it/handle/2318/17312?mode=full>
15. R. Casa, Ed., *Trattamenti fitosanitari nelle colture arboree; Agricoltura di Precisione*, Bologna, Italy: Edagricole, 2016.
16. *Repubblica*, "Ultrasuoni in vigna," consultato il 9 luglio 2024. [Online]. Available: file:///C:/Users/39334/Downloads/Ultrasuoni%20in%20vigna_Repubblica.pdf
17. M. Pollastrini et al., "Influence of different light intensity regimes on leaf features of *Vitis vinifera* L. in UV-B radiation filtered conditions," *Environ. Exp. Bot.*, vol. 73, pp. 108-115, 2011. doi: 10.1016/j.envexpbot.2010.10.014
18. F. Garcia-Ruiz, "Assessment of map based variable rate strategies for copper reduction in hedge vineyards," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 207, p. 107753, 2023.
19. Chen, W.N., Mok, W.K. and Tan, Y.X. (2020), "Technology innovations for food security in Singapore: a case study of future food systems for an increasingly natural

resource-scarce world”, Trends in Food Science and Technology, Vol. 102 August, pp. 155-168.

(PDF) *Smart farming: towards a sustainable agri-food system*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/353848273_Smart_farming_towards_a_sustainable_agri-food_system.

20. Saiz-Rubio, V. and Rovira-Mas, F. (2020), “From smart farming towards agriculture 5.0: a review on crop data management”, *Agronomy*, Vol. 10 No. 207, pp. 1-21 (PDF) *Smart farming: towards a sustainable agri-food system*. Available from: https://www.researchgate.net/publication/353848273_Smart_farming_towards_a_sustainable_agri-food_system.

21. "Telerilevamento agricoltura di precisione," Dipartimento Università Cattolica del Sacro Cuore, consultato il 12 luglio 2024. [Online]. Available: <https://dipartimenti.unicatt.it/diproves-agronomia-7-telerilevamento-agricoltura-di-precisione-9950>

22. "Telerilevamento e agricoltura: Un binomio sorprendente," OikosWeb, consultato il 20 agosto 2024. [Online]. Available: <https://www.oikosweb.com/news/telerilevamento-e-agricoltura-un-binomio-sorprendente/>

23. P. W. Atkins, "Le caratteristiche della radiazione elettromagnetica," Zanichelli Scuola, consultato il 15 luglio 2024. [Online]. Available: <http://ebook.scuola.zanichelli.it/atkinschimica/unita-uno/gli-atomi-il-mondo-quantico/l-osservazione-degli-atomi/le-caratteristiche-della-radiazione-elettromagnetica>

24. F. Bussotti and M. Kalaji, "Fluorescenza," 2017. [Online]. Available: file:///C:/Users/39334/Downloads/F1779_Bussotti_Kalaji-Fluorescenza.pdf

25. "Applications of LiDAR in Agriculture and Future Research Directions," consultato il 17 luglio 2024.

- 26.** "Assessment for crop water stress with infrared thermal imagery in precision agriculture: A review and future prospects for deep learning applications," consultato il 18 luglio 2024.
- 27.** "Applications of Thermal Imaging in Agriculture and Food Industry—A Review," consultato il 20 luglio 2024.
- 28.** R. Casa, *Agricoltura di Precisione. Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali*. Bologna, Italy: Edagricole-New Business Media, 2016.
- 29.** Entekhabi, Dara & Njoku, Eni & O'Neill, Peggy & Kellogg, K.H. & Crow, Wade & Edelstein, W.N. & Entin, Jared & Goodman, Shawn & Jackson, Thomas & Johnson, Joel & Kimball, J. & Piepmeier, Jeffrey & Koster, Randal & Martin, Neil & McDonald, Kyle & Moghaddam, Mahta & Moran, Susan & Reichle, Rolf & Shi, Jiancheng & van Zyl, Jakob. (2010). The Soil Moisture Active and Passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*. 98. 704 - 716. 10.1109/JPROC.2010.2043918.
- 31.** "Precisione in Agricoltura," *Agriscienza*, consultato il 21 luglio 2024. [Online]. Available: <https://agriscienza.it/in-agricoltura-e-tutta-questione-di>
- 32.** Confagricoltura, "L'impiego dei satelliti sempre più strategico nell'agricoltura di precisione," consultato il 16 luglio 2024. [Online]. Available: <https://www.confagricoltura.it/ita/area-stampa/mondo-agricolo-news/pertosa-sitael-l-impiego-dei-satelliti-sempre-pi%C3%B9-strategico-nell-agricoltura-di-precisione>
- 33.** A. Bannari, A. R. Huete, D. Morin, and F. Zagolski, "Effets de la couleur et de la brillancedu sol sur les indices de végétation," in *Proc. 17th Can. Symp. Remote Sens.*, 1995, Saskatoon, SK, Canada.
- 34.** "Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: Impact on vegetation indices," consultato il 12 Agosto 2024.
- 35.** M. Marenghi, *Manuale di Viticoltura*, Bologna, Italy: Edagricole, 2007.

- 36.** "Terroir: Tutto quello che deve conoscere un sommelier," Losaicheilvino, accessed Sep. 2024. [Online]. Available: <https://losaicheilvino.it/blogs/la-guida-completa-sulla-vigna-la-vite-il-vino/terroir-tutto-quello-che-deve-conoscere-un-sommelier>
- 37.** E. Ruzzene, "Influenza di tecniche agronomiche sulle infestazioni di fitofagi della vite," Tesi di Laurea Magistrale, Univ. Padova, 2013.
- 38.** M. Marengi, Manuale di Viticoltura, Bologna, Italy: Edagricole, 2007, pp. 211, 225.
- 39.** Regione Lombardia, "Comunicato regionale 14 giugno 2023 - n. 82," consultato il 4 luglio 2024. [Online]. Available: <https://fitosanitario.regione.lombardia.it/wps/wcm/connect/f8625ad9-edde-472f-a115-06686d490942/Comunicato+regionale+14+giugno+2023+-+n.+82.pdf>
- 40.** Bayer Crop Science, "Oidio: Come difendere la vite durante la fioritura," 2023. [Online]. Available: <https://www.cropscience.bayer.it>
- 41.** Confagricoltura, "Per salvare i vigneti dalla peronospora l'unica strada è la prevenzione," Consultato il 14 luglio 2024. [Online]. Available: <https://www.confagricoltura.it>
- 42.** A. Furlotti, "Peronospora della vite," Tesi di Laurea, Univ. Politecnica delle Marche, 2024. [Online]. Available: <https://tesi.univpm.it>
- 43.** Adama Italia, "Peronospora della vite: La regola dei 3 dieci vale ancora?" Adama Blog, consultato il 4 Agosto 2024. [Online]. Available: <https://www.adama.com>
- 44.** Agraria.org, "Peronospora," Agraria, consultato il 28 luglio 2024. [Online]. Available: <https://www.agraria.org/viticoltura-enologia/peronospora.htm>
- Here is the citation for the requested sources in IEEE style:

- 45.** E. Piazza, D. Facchinetti, V. Tadini, and D. Pessina, "AgroSenseBot: A low-cost multifunctional robotic platform for complex agricultural tasks."
- 46.** D. Facchinetti, Dispense, 2024.
- 47.** D. Pessina, Dispense, 2024.
- 48.** ROS Documentation, "Rolling Documentation," consultato il 7 luglio 2024. [Online]. Available: <https://docs.ros.org/en/rolling/>
- 49.** Nav2 Documentation, "Nav2 Concepts," consultato il 17 agosto 2024. [Online]. Available: <https://docs.nav2.org/concepts/index.html>
- 50.** "Linee Guida Agricoltura di Precisione," consultato il 23 luglio 2024. [Online]. Available:
[file:///C:/Users/39334/Downloads/Linee_Guida_Agricoltura_di_precisione%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/39334/Downloads/Linee_Guida_Agricoltura_di_precisione%20(1).pdf)
- 51.** L'eurispes, "Dall'agricoltura di precisione all'agricoltura 4.0: La tecnologia in campo," consultato il 6 agosto 2024. [Online]. Available: <https://www.leurispes.it/dallagricoltura-di-precisione-allagricoltura-4-0-la-tecnologia-in-campo/>
- 52.** D. Pessina, Dispense, "Irroratrici," consultato il 2 agosto [Online]. Available: <http://dpessina.altervista.org/AgroForest/dispense/19-Irroratrici-MeccAgroForest.pdf>
- 53.** D. Pessina, Dispense, "Macchine Irroratrici," consultato il 9 luglio 2024. [Online]. Available: <http://dpessina.altervista.org/dispense/Agrotec/3-MACCHINEIRRORATRICI.pdf>
- 54.** D. Pessina, Dispense, "Irrovit," consultato il 10 agosto 2024. [Online]. Available: <http://www.dpessina.altervista.org/dispense/Vitenol/irrovit.pdf>

Certificazione CE, "Macchine per prodotti fitosanitari e regolamento macchine 2023," Jul. 2023. [Online]. Available: <https://www.certificazionece.it/2023/07/04/macchine-per-prodotti-fitosanitari-e-regolamento-macchine-2023/>

Kattivo, "Il progetto," accessed Sep. 2024. [Online]. Available: <https://www.kattivo.it/il-progetto/>

Ringraziamenti

In primo luogo, ringrazio calorosamente il mio relatore, il Professore Davide Facchinetti, per avermi fatto appassionare al settore della meccanizzazione, per avermi permesso di partecipare a questo fantastico progetto e per la sua costante disponibilità.

Colgo l'occasione per ringraziare l'Ingegnere Enrico Piazza, mio correlatore, per la gentilezza e l'aiuto datomi.

Ringrazio la mia famiglia per il supporto che mi ha dato in questi tre anni distante da casa, mamma Isabella, papà Marino, mio fratello "piccolo" Luca e in particolare mio fratello Gabriele che mi ha sempre aiutato quando avevo bisogno, dall'iscrizione al corso di Laurea, passando per la burocrazia dell'Erasmus e infine per la tesi, senza di lui probabilmente non sarei qui.

Ringrazio poi la mia seconda famiglia, gli amici, mi avete accompagnato in questi tre anni e mi avete permesso di vivere esperienze bellissime che non dimenticherò mai.

Prima di tutti ringrazio Matteo, coinquilino, amico e punto cardine dei miei tre anni a Edolo, fortuna più grande non potevo avere. Ringrazio Giacomo, compagno di studio, di lavoro e tante belle avventure vissute insieme, un vero amico.

Ringrazio tutti i Boys, in particolare Pera, Lyuk e B18, colonne portanti e certezze su cui potrò sempre contare, vi voglio tanto bene.

Ringrazio Laura e Giacomo, che nell'esperienza a Malta abbiamo potuto vivere esperienze bellissime insieme e che hanno portato a creare un forte legame al di fuori dell'Erasmus.

Ringrazio Romina e Franco, mi avete insegnato il vero senso del lavoro e del sacrificio, fin dal primo giorno non è stato un rapporto datore-dipendente ma una vera amicizia, sono sicuro che i vostri insegnamenti saranno un vero tesoro per il futuro.

Infine, ringrazio tutti gli altri amici che non sono riuscito a citare, ma a cui voglio ugualmente tanto bene.

Dopo questa lunga e noiosa lista di ringraziamenti, permettetemi di esprimere un desiderio. Spero di poter riscrivere tutti i vostri nomi nei ringraziamenti della tesi magistrale, perché la vita è come un viaggio, e quando si viaggia perde di valore ogni meta, se non la raggiungi con le persone a cui vuoi bene.