



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE AGRARIE E DEL TERRITORIO

VALUTAZIONE DELLA DISTRIBUZIONE  
DI DUE ATOMIZZATORI INNOVATIVI  
Distribution evaluation of two innovative  
sprayers

TIPO TESI: Sperimentale

Studente:  
MICHELE CARUSO

Relatore:  
PROF.SSA ESTER FOPPAPEDRETTI

Correlatore:  
PROF. ALESSIO ILARI

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

# SOMMARIO

SOMMARIO .....	1
ELENCO DELLE TABELLE.....	3
ELENCO DELLE FIGURE .....	4
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI .....	6
CAPITOLO 1 DISTRIBUZIONE DEI FITOFARMACI.....	13
1.1 Problematiche relative alla distribuzione.....	16
1.2 Macchine per la distribuzione di agrofarmaci.....	19
1.2.1 Macchine irroratrici di fitofarmaci in campo viticolo.....	21
1.3 Ottimizzazione dei trattamenti per la riduzione nell'impiego dei fitofarmaci .....	22
1.4 Ottimizzazione dei fitofarmaci sulle colture arboree .....	24
CAPITOLO 2 AGRICOLTURA DI PRECISIONE .....	29
2.1 Variabilità .....	31
2.1.1 Variabilità spaziale .....	32
2.1.2 Variabilità temporale .....	32
2.1.3 Variabilità colturale .....	32
2.2 La gestione della variabilità .....	33
2.2.1 Global Navigation Satellite System .....	33
2.2.2 ISOBUS .....	34
2.2.3 GIS .....	35
2.2.4 Remote sensing and Proxima Sensing .....	35
2.3 Creazione mappe di prescrizione .....	38
2.4 Variable rate Application .....	38
2.5 Distribuzione fitofarmaci nel vigneto .....	39
2.5.1 Miscelazione innovativa .....	40
2.6 Distribuzione a rateo variabile .....	41
2.7 Sensori innovativi .....	42

2.7.1 Sensori ad infrarossi.....	42
2.7.2 Sensori ad ultrasuoni.....	43
2.7.3 LiDAR .....	43
2.7.4 Robotica.....	44
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI .....	46
3.1 Caso di studio.....	46
3.1.1 Atomizzatore Turbmatic.....	46
3.1.2 Atomizzatore Smart Synthesis Hybrid.....	50
3.2 Dati in campo.....	51
3.2.1 Fase preliminare: mappatura filari .....	52
3.2.2 Fase esecutiva: test in campo.....	52
3.3 Elaborazione dati .....	55
3.3.1 Acquisizione digitale delle immagini .....	55
3.3.2 Elaborazione immagini con Inkscape .....	56
3.3.3 Analisi dei dati.....	56
3.3.4 Analisi statistica.....	57
CAPITOLO 4 DISCUSSIONI.....	60
CONCLUSIONI .....	61
BIBLIOGRAFIA .....	63

## ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 Specifiche tecniche atomizzatore Turbmatic .....	47
Tabella 2 Specifiche tecniche atomizzatore Smart Synthesis Hybrid Caffini .....	50
Tabella 3 Codifica cartine: posizione e tipologie di trattamento .....	53
Tabella 4 Codifica cartine: numerazione .....	53
Tabella 5 Test Shapiro- Wilk .....	58
Tabella 6 Test Kruskal-Wallis .....	58

## ELENCO DELLE FIGURE

Figura 0-1 Obiettivi disviluppo sostenibile.....	7
Figura 0-2 Green Deal .....	9
Figura 0-3 Strategia Farm to Fork.....	9
Figura 0-4 Obiettivi della nuova PAC .....	11
Figura 1-1 Fenomeni derivanti dall'uso dei pesticidi .....	17
Figura 1-2 Perdite di prodotto fitosanitario.....	18
Figura 1-3 Impolveratore Ideal Biostar 300P .....	20
Figura 1-4 Fumigatrice New Velox .....	20
Figura 1-5 Macchine irroratrici di tipo portato, trainato e semovente .....	21
Figura 1-6 Nebulizzatore portato Martignani .....	22
Figura 1-7 Irroratrice a getto mirato Oktopus Nobili.....	24
Figura 1-8 Irroratrice scavallante Ventis FF Pro Nobili .....	25
Figura 1-9 Irroratrice a tunnel Drop Save Ideal.....	25
Figura 1-10 Irroratrice elettrostatica Ventis ES Nobili .....	26
Figura 1-11 Ugello ad inclusione di aria.....	27
Figura 2-1 Sistema Isobus.....	34
Figura 2-2 Piattaforme di telerilevamento .....	36
Figura 2-3 Mappa di prescrizione.....	38
Figura 2-4 Funzionamento real time RTM 101 .....	40
Figura 2-5 Schema funzionamento laser scanner .....	44
Figura 2-6 Rovitis 4.0 .....	45
Figura 2-7 Prototipo robot Progetto Scorpion.....	45
Figura 3-1 Atomizzatore Turbmatic .....	46
Figura 3-2 Sistema LiDAR.....	47
Figura 3-3 Piano di acquisizione del LiDAR.....	48
Figura 3-4 Inclinometro applicato in vigneto .....	49
Figura 3-5 Atomizzatore Caffini.....	50

Figura 3-6 Localizzazione vigneto oggetto di studio.....	51
Figura 3-7 Foglio di lavoro per la mappatura di un filare.....	52
Figura 3-8 Cartina idrosensibile pre e post trattamento .....	53
Figura 3-9 Telaio per cartine.....	54
Figura 3-10 Trattamento con atomizzatore.....	54
Figura 3-11 Macchina fotografica.....	55
Figura 3-12 Supporto per cartine .....	55
Figura 3-13 Light box .....	55
Figura 3-14 Acquisizione dati.....	56
Figura 3-15 Elaborazione dati con QGIS.....	57
Figura 3-16 Individual 95% Cis For Mean Based on Pooled StDev .....	59
Figura 3-17 Grouping Information Using Tukey Method .....	59

## INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

L'agricoltura è stata ed è ancora oggi alla base della vita dell'uomo. Si è passati da un'agricoltura di sussistenza che incentrava i suoi obiettivi sul soddisfacimento dei bisogni primari, dati dall'allevamento del bestiame e dalla coltivazione, ad un radicale cambiamento legato all'industrializzazione e alla modernizzazione, per passare ad un'agricoltura intensiva ad alta produttività che ha però ridotto la biodiversità per effetto della semplificazione dei sistemi agricoli, attraverso pratiche dannose per il suolo e l'impiego di fertilizzanti e pesticidi chimici (Johanna Bar, 2023).

Secondo la sesta edizione del Global Environment Outlook, l'80% della perdita di biodiversità è causata dall'agricoltura (Ambiente delle Nazioni Unite, 2019).

Oggi, però, questo settore è chiamato ad affrontare una nuova sfida, tornando a pratiche che mirino all'abbattimento degli sprechi, rispettando maggiormente la terra, assecondando il cambiamento a livello tecnologico, sfruttando le novità introdotte dal mondo digitale.

Oggi la maggiore consapevolezza da parte di consumatori, aziende e governi sta spingendo il settore verso la conversione ad agricoltura sostenibile. Infatti, sia l'agricoltura, sia la filiera agroalimentare ad essa strettamente connessa, rivestono un ruolo di primaria importanza nella creazione del valore aggiunto, ma rivestono soprattutto un ruolo centrale nella protezione del territorio, nella tutela della salute dell'intera comunità e nelle transizioni ecologica ed energetica (Lucidi, 2021).

Questo nuovo modello di agricoltura oltre all'obiettivo principale, cioè di proteggere le risorse naturali, ridurre il consumo idrico, ed energetico, diminuire le emissioni inquinanti, gestire in modo responsabile il suolo, tutelare la biodiversità, pone l'attenzione circa gli aspetti sociali ed economici. L'obiettivo sarebbe quello di creare una filiera agroalimentare e agroindustriale sostenibile con l'obiettivo di garantire la salute delle persone, migliorare la qualità della vita dei produttori, promuovere lo sviluppo economico solidale, salvaguardare i diritti umani, favorire l'equità sociale (Food And Agriculture Organization of the United Nations, n.d.).

Su questo argomento, oggi di grande attualità ed importanza, si sono espresse organizzazioni europee e mondiali.

La FAO stima un aumento della domanda alimentare del 70% entro i prossimi 30 anni e l'unica possibilità per soddisfarla, senza aggravare il cambiamento climatico e l'avvelenamento del pianeta, è produrre in modo sostenibile.

Per facilitare la transizione, la FAO ha proposto un approccio comune a tutti i settori agricoli, compresa la pesca, basato su conoscenze scientifiche e su considerazioni sociali, economiche ed ambientali.

Ha stilato la lista dei principi di transizione:

- migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse;
- conservare, proteggere e valorizzare le risorse naturali;
- proteggere le risorse rurali, permettere un lavoro sicuro e accettabile, in un ambiente sano e adeguatamente retribuito;
- istituire meccanismi di governance responsabili ed efficaci

a cui deve ispirarsi l'agricoltura sostenibile. La FAO ha pubblicato nel 2018 un paper con alcune linee guida (Lucidi, 2021) in cui si pone l'obiettivo di indicare le 20 azioni necessarie, nel campo dell'agricoltura, per centrare i 17 obiettivi di sviluppo, i cosiddetti Sustainable Development Goals (SDGs), adottando un approccio integrato al tema (Figura 0-1) (Food And Agriculture Organization of the United Nations, 2018)



**Figura 0-1 Obiettivi di sviluppo sostenibile**  
**Fonte: [www.istat.it](http://www.istat.it)**

Gli SDGs sono 17 obiettivi interconnessi, definiti dall'Organizzazione delle Nazioni Unite come strategie per ottenere un futuro migliore e più sostenibile per tutti, conosciuti anche come Agenda 2030 dal nome del documento che porta il titolo *Trasformare il nostro mondo*.

*L'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile* (United Nations, 2015).

Viene richiesto ai paesi partecipanti di affrontare una serie di questioni relative allo sviluppo economico e sociale che includono la povertà, la fame, il diritto alla salute ed all'istruzione, l'accesso all'acqua ed all'energia, il lavoro, la crescita economica inclusiva e sostenibile, il cambiamento climatico e la tutela dell'ambiente, l'urbanizzazione, i modelli di produzione e di consumo, l'uguaglianza sociale e di genere, la giustizia e la pace (Food And Agriculture Organization of the United Nations, 2023)

Molto importante è anche il rapporto “*Europe and Central Asia – Regional Overview of Food Security and Nutrition 2022*”, pubblicato il 15 marzo 2023 da FAO, International Fund for Agricultural Development (IFAD), Unicef, United Nations Development Programme (UNDP), United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), World Food Programme (WFP); Regional Office for Europe dell'Organizzazione mondiale della sanità (Oms) e World meteorological organization (Wmo) che evidenzia, che malgrado la Pandemia Covid-19 e la guerra in Ucraina in corso abbiano messo alla prova la sicurezza alimentare ed il diritto all'alimentazione sana, in queste regioni le condizioni sono incoraggianti.

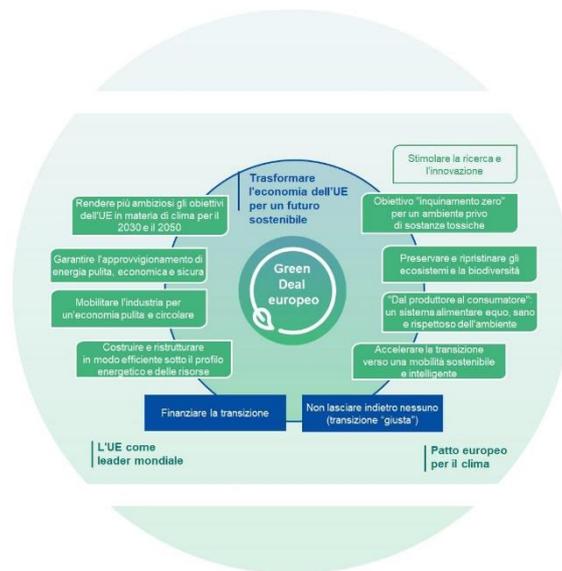
Le Agenzie ONU evidenziano che (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Alimentazione e l'Agricoltura, 2023):

“Occorre rimodulare le politiche alimentari ed agricole, in modo da renderle più adatte ad affrontare la triplice sfida a cui sono esposti attualmente i sistemi agroalimentari, cioè l'accesso ad un'alimentazione sana, garantire mezzi di sostentamento migliori agli agricoltori e promuovere la sostenibilità ambientale”.

Per conseguire questi risultati, non è sufficiente fornire sgravi fiscali agli agricoltori, ma occorrerà ottimizzare i servizi generali con interventi mirati nei settori della ricerca e dello sviluppo agricolo e dell'istruzione, con misure di espansione, con azioni di controllo di parassiti e malattie, con l'adozione di sistemi pubblici di controllo della sicurezza alimentare e con la promozione di un'agricoltura climaticamente intelligente e di tecnologie e pratiche più efficienti in termini di emissioni (Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Alimentazione e l'Agricoltura, 2023).

La Commissione Europea, per rispondere alla necessità di incentivare e promuovere uno sviluppo sostenibile, ha costituito una serie di piani che vanno a costituire il Green Deal Europeo.

Il Green Deal (Figura 0-2) è un insieme di iniziative basate sull'obiettivo di ridurre le emissioni del 50% entro il 2030 e la neutralità climatica entro il 2050 (Montanarella & Panagos, 2021).

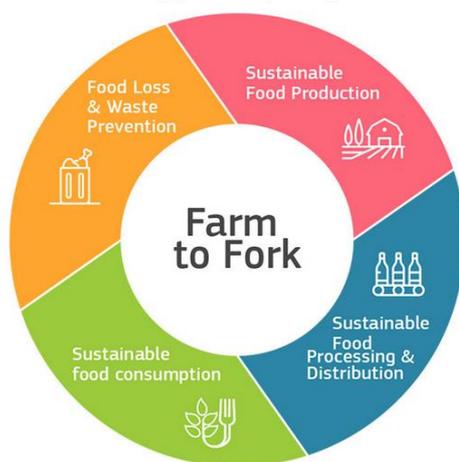


**Figura 0-2 Green Deal**

**Fonte:** (Commissione Europea, 2019)

Si tratta di una strategia di crescita mirata a trasformare l'Europa in una società dotata di un'economia moderna, efficiente sotto il profilo delle risorse e competitiva, che nel 2050 non genererà emissioni di gas ad effetto serra ed in cui la crescita economica sarà dissociata dall'uso delle risorse (Commissione Europea, 2019)

In particolare, il settore agroalimentare, è quello su cui si basa la strategia Farm to Fork (Figura 0-3): dal produttore al consumatore, al centro del Green Deal.



**Figura 0-3 Strategia Farm to Fork**

**Fonte:** (Massot Marti, 2020)

La strategia mira ad accelerare la transizione europea verso un sistema alimentare sostenibile, rendendo i sistemi alimentari equi, sani e rispettosi dell'ambiente.

Per raggiungere questi obiettivi, tutti gli attori della filiera alimentare devono contribuire per assicurarne la sostenibilità.

Quindi gli agricoltori hanno il compito di trasformare i loro metodi di produzione e gestione aziendale, sfruttando al meglio le risorse naturali, basandosi sulle tecnologie e sul digitale, per raggiungere migliori risultati climatici ed ambientali, aumentare la resilienza ai cambiamenti climatici e ridurre ed ottimizzare l'uso dei fattori di produzione come gli agrofarmaci.

L'UE sta attuando un programma dove:

- il danno ambientale è considerato una priorità;
- la mitigazione dei cambiamenti climatici è promossa;
- la vulnerabilità ambientale, della società e di tutti i settori dell'economia ai cambiamenti climatici viene ridotta (o al massimo ne viene promossa l'adattabilità);
- si persegue l'obiettivo inquinamento zero;
- si incentiva l'economia del benessere in cui la crescita è rigenerativa;
- si mira a proteggere, preservare e ripristinare la biodiversità, per arrestarne ed invertirne la perdita;
- si rafforzano gli incentivi ambientali positivi;
- si applicano le tecnologie dei dati per supportare la politica ambientale.

(Parlamento europeo, 2022)

Per permettere una reale implementazione, tutte queste iniziative devono essere sostenute dalla Politica Agricola Comune (PAC).

Il primo gennaio 2023 è entrata in vigore la nuova programmazione 2023-2027, che si pone l'obiettivo di sostenere il reddito, la produttività, la qualità, la transizione ecologica e soprattutto l'innovazione.

Nell'articolo 5 del Regolamento (UE) 2021/2115 del 2 dicembre 2021 sono previsti gli obiettivi generali (OG):

OG1: promuovere un settore intelligente, competitivo, resiliente e diversificato che garantisca la sicurezza alimentare a lungo termine;

OG2: rafforzare la tutela dell'ambiente e l'azione per il clima e contribuire agli obiettivi climatici ed ambientali dell'Unione Europea;

OG3: consolidare il tessuto socioeconomico delle zone rurali.

(Unione europea, 2021)

Il quadro giuridico stabilisce 3 obiettivi generali, suddivisi ognuno in 3 sotto obiettivi.

È inoltre previsto un decimo obiettivo trasversale (Figura 0-4), dedicato alla costruzione di sistemi di conoscenza ed innovazione (AKIS, Agricultural Knowledge and Innovation Systems) tra mondo della ricerca, attori pubblici e privati (Commissione Europea, 2020a).

Considerando i sistemi di produzione agricola esistono varie strategie che possono essere utilizzate per un uso razionale ed equilibrato delle risorse ed una riduzione delle emissioni



**Figura 0-4 Obiettivi della nuova PAC**

**Fonte:** (Principali Obiettivi Strategici della PAC 2023-2027)

inquinanti: si possono utilizzare le lavorazioni minime dei suoli, si può convertire il sistema produttivo a lotta integrata, e si può prendere in considerazione l'agricoltura di precisione, che si basa sull'applicazione di principi e tecnologie per la gestione della variabilità-temporale e spaziale associata a tutti gli aspetti della produzione agricola.

Proprio nell'ambito dell'agricoltura di precisione, si inserisce il lavoro di tesi che si basa sulla valutazione dell'efficacia (rispetto ad una distribuzione standard) di due macchine operatrici per trattamenti fitosanitari nei vigneti, che vanno a distribuire solamente la quantità di prodotti fitosanitari necessari, con l'obiettivo della riduzione dei quantitativi e dei volumi.

Il settore vitivinicolo riveste un ruolo di primaria importanza economica in Europa ed in Italia; infatti, l'Unione Europea è la maggiore produttrice mondiale di vino. Nel 2020

rappresentava il 45% delle zone viticole mondiali ed è il più ampio settore agroalimentare europeo in termini di esportazioni.

Ma, allo stesso tempo, determina anche un impatto molto elevato a livello ambientale.

La viticoltura, anche se rappresenta solo il 3% della superficie agricola europea, utilizza il 65% di tutti i fungicidi impiegati in agricoltura, oltre 68 mila tonnellate/anni.

Proprio in risposta a questi dati, la Commissione Europea sta emanando regole sempre più restrittive con l'obiettivo di dimezzare l'uso dei pesticidi entro il 2030.

In quest'ottica, la viticoltura, con l'obiettivo di orientarsi verso una produzione di qualità e sostenibilità, è stato tra i primi settori ad introdurre il concetto di agricoltura di precisione, che può essere applicata a molte operazioni colturali, ma in questo lavoro di tesi ci si è soffermati sull'irrorazione, ovvero sulla distribuzione dei fitofarmaci.

# Capitolo 1

## DISTRIBUZIONE DEI FITOFARMACI

I prodotti fitosanitari sono miscele di principi attivi, eccipienti e coformulanti che vengono utilizzati principalmente per mantenere in buona salute le colture ed impedire di essere danneggiate da malattie e infestazioni. Contengono almeno una sostanza attiva che può essere di origine chimica o biologica (Autorità europea per la sicurezza alimentare, 2023).

La loro distribuzione, anche se considerata una pratica agricola fondamentale per la protezione delle piante, è una delle operazioni colturali con il maggior rischio nella creazione di inquinamento ambientale, per la qualità delle acque di superficie e sotterranee, la qualità del suolo, la biodiversità, gli ecosistemi, danni alla salute dell'uomo e degli animali, e la possibilità di contaminazione degli alimenti.

Vista la preoccupazione legata agli effetti negativi derivanti dall'uso degli agrofarmaci, l'Unione Europea ha sviluppato un'articolata legislazione che mira a proteggere la salute dell'uomo e l'ambiente e comprende norme che disciplinano la commercializzazione e l'uso di determinate categorie di prodotti chimici, con una serie di restrizioni riguardanti l'immissione sul mercato e l'uso di particolari sostanze e i residui negli alimenti.

Relativamente a tutte queste problematiche, l'Unione Europea ha sviluppato una corposa legislazione che disciplina la loro commercializzazione, il loro utilizzo e i residui negli alimenti (Georgios Amanatidis & Nicoleta Lipcaneanu, 2023).

I prodotti fitosanitari non possono essere commercializzati ed usati, se prima non sono stati autorizzati. Questo processo viene fatto con un sistema a due livelli in cui l'EFSA (Autorità Europea per la sicurezza alimentare) valuta le sostanze attive contenute nei prodotti e gli Stati membri valutano ed autorizzano il prodotto a livello nazionale.

Per quanto riguarda le procedure di autorizzazione ed immissione in commercio dei prodotti fitosanitari (PF), i criteri sono stabiliti nel Regolamento quadro CE n. 1107/2009 (Parlamento Europeo, 2009) e sono più rigidi rispetto a quelli applicati con la precedente Direttiva 414 del 1991 e tengono conto della salute dell'uomo, valutando la tossicità acuta e cronica e dei rischi per l'ambiente attraverso la valutazione della persistenza nell'ambiente, il

bioaccumulo, la possibilità di diffondersi nell'ambiente, il rischio di inquinamento delle acque e l'ecotossicologia, cioè i possibili effetti su organismi acquatici, api e altri organismi non target.

Il Regolamento (CE) n. 396/2005 tratta tutte le questioni relative ai limiti massimi di residui di pesticidi, ammessi all'interno o sulla superficie di alimenti o mangimi, fatte salve le buone pratiche agricole e l'esposizione minima possibile dei consumatori per tutelare quelli vulnerabili (Parlamento Europeo, 2005).

Tale regolamento disciplina anche i controlli ufficiali sui residui di pesticidi che si possono trovare negli alimenti dopo la loro distribuzione sulle colture e del rischio da pesticidi per uccelli e mammiferi, pubblicata originariamente nel 2009 (Autorità europea per la sicurezza alimentare, 2023).

Il documento propone uno schema di valutazione del rischio a più livelli che tocca l'esposizione alimentare, l'esposizione tramite avvelenamento secondario e l'esposizione tramite l'assunzione di acqua contaminata.

Inoltre, dal 2023, l'EFSA è responsabile della revisione paritetica a livello UE delle sostanze attive utilizzate nei prodotti fitosanitari. Questo compito viene assolto dalla sua Unità Pesticidi, secondo le procedure stabilite dalla legislazione e dai più recenti standard e metodi scientifici.

Per il corretto utilizzo dei prodotti fitosanitari il fondamento legislativo europeo è la Direttiva 2009/128/ce che prevede che tutti gli stati appartenenti all'Unione Europea attivino una serie di misure con l'obiettivo di ridurre i rischi e gli impatti sulla salute dell'uomo e dell'ambiente e di promuovere l'uso della difesa integrata e di mezzi e tecniche alternative ai prodotti chimici di sintesi.

Nel febbraio 2023 l'EFSA ha pubblicato la guida aggiornata alla valutazione del rischio dei pesticidi per uccelli e mammiferi. Il documento propone uno schema del rischio a più livelli e tocca l'esposizione alimentare, l'esposizione tramite avvelenamento secondario e l'esposizione tramite l'assunzione di acqua contaminata (Aagaard et al., 2023).

Inoltre, la Commissione Europea, il 22 giugno 2022 ha presentato una proposta di un nuovo Regolamento del Parlamento Europeo e del Consiglio relativo all'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari e recante modifica del regolamento (UE) 2021/2115 (Commissione Europea, 2022) in linea con gli obiettivi a livello UE di ridurre del 50% l'uso e il rischio di pesticidi chimici entro il 2030, in linea con la strategia UE "Dal Produttore al Consumatore", parte fondamentale del Green Deal Europeo che ha come obiettivo di rendere i sistemi alimentari europei equi, sani e sostenibili e con la strategia sulla biodiversità (Commissione

Europea, 2020b).

Il citato regolamento ha avuto una battuta di arresto in seguito alla decisione (UE) 2022/2572 del Consiglio del 19 dicembre 2022 che invita la Commissione a presentare uno studio che integri la valutazione di impatto della proposta di regolamento del Parlamento europeo e del Consiglio relativo all'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari e recante modifica al regolamento (UE) 2021/2115 del Parlamento europeo e del Consiglio ed a proporre azioni di follow-up, se necessari, alla luce dei risultati di studio.

A giustificazione della richiesta nel punto 5, il Consiglio si mostra preoccupato per il fatto che la valutazione di impatto che accompagna la proposta non tiene conto dei possibili effetti a lungo termine della proposta di regolamento sulla sicurezza alimentare nell'Unione, dovuta al fatto che la valutazione è stata portata a termine prima della guerra in Ucraina e delle crisi dei prezzi dell'energia, dei fertilizzanti e dei prodotti alimentari. Quindi indica la necessità di un'ulteriore analisi quantitativa su una serie di indicatori, per valutare come la riduzione nell'utilizzo dei fertilizzanti si rifletta sulla produzione agricola, sul calo delle rese, e il potenziale ricorso alle importazioni di prodotti alimentari e mangimi (Decisione (UE) 2022/2572 Del Consiglio, 2022).

Il 19 dicembre 2022 è stato emesso il regolamento delegato (UE) 2023/707, pubblicato il 31 marzo 2023 nella Gazzetta Ufficiale che modifica il regolamento (CE) N. 1272/2008 per quanto riguarda le classi di pericolo per la classificazione, l'etichettatura e l'imballaggio delle sostanze pericolose (*Regolamento Delegato (UE) 2023/707 Della Commissione*, 2022). Il nuovo regolamento va a modificare gli allegati I, II, III e IV ed introduce nuove classi di pericolo e nuovi criteri di classificazione per sostanze e miscele.

Sull'importanza e sulla preoccupazione sull'uso dei pesticidi in agricoltura, intervengono anche le azioni della Nuova PAC 2023-2027, che attraverso una serie di misure e norme, sostengono gli agricoltori nell'uso sostenibile dei pesticidi (Commissione Europea).

La nuova PAC è entrata in vigore il 1° gennaio 2023 e accompagnerà gli agricoltori fino al 2027. Una nuova politica agricola comune, frutto di un lunghissimo negoziato tra Bruxelles, Stati membri e regioni e risente delle influenze del Green Deal europeo, come delle strategie Farm to Fork e Biodiversità.

Per ottenere il pagamento di base, l'agricoltore oltre ad essere in possesso dei titoli, deve rispettare la condizionalità rafforzata e la condizionalità sociale.

La prima prevede un insieme di adempimenti: nove BCAA, buone condizioni agronomiche ed ambientali e undici CGO, criteri di gestione obbligatori, molti dei quali già presenti anche nella vecchia PAC.

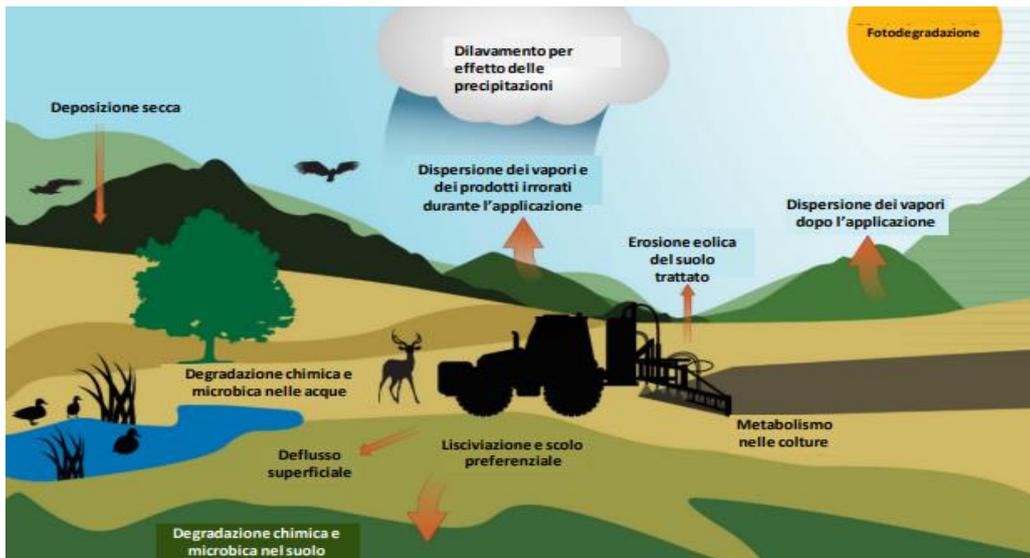
La seconda vincola, invece, il pagamento di base al rispetto della normativa sul lavoro e sulla sicurezza nei luoghi di lavoro.

Nel dettaglio:

- le CGO collegano i pagamenti al regolamento UE sui prodotti fitosanitari (CE) N. 1107/2009 e in futuro alla direttiva sull'uso sostenibile dei pesticidi. In particolare, la CGO 7 contiene le disposizioni relative all'acquisto, uso e conservazione dei fitofarmaci, mentre la CGO 8 introduce l'obbligo del patentino fitosanitario, il controllo funzionale e la regolamentazione delle attrezzature e la corretta gestione dei prodotti in relazione allo stoccaggio, manipolazione, impiego, recupero della miscela residua, pulizia delle attrezzature, eliminazione dei residui e smaltimento degli imballaggi (Confagricoltura Rovigo, 2023)
- le BCAA, formulate per proteggere le acque ed il suolo, comportano un uso responsabile dei pesticidi, nonché requisiti per la tutela della biodiversità. Si tratta di indicazioni che vanno a: prevenire l'erosione del suolo definendo la copertura minima e le pratiche minime, mantenere la componente organica e la struttura del suolo, mantenere i prati permanenti, proteggere la biodiversità e garantire la conservazione degli elementi caratteristici del paesaggio, proteggere e gestire l'acqua attraverso l'introduzione di fasce tampone lungo i corsi di acqua, l'autorizzazione all'uso dell'acqua per irrigazione e la protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento (Coldiretti, 2021).

### **1.1 Problematiche relative alla distribuzione**

La distribuzione dei fitofarmaci, quindi è un argomento attuale e di rilevante importanza a livello di sostenibilità ambientale, economica e sociale. Durante la distribuzione degli agrofarmaci, questi possono andare incontro a fenomeni vari (Figura 1-1) e di varia natura, dovuti alla loro interazione con i componenti del suolo e con gli organismi viventi, come piante, animali e microrganismi del suolo. Le caratteristiche della sostanza attiva, quali, struttura della molecola, solubilità in acqua, tendenza a legarsi al terreno, ma anche quelle dell'ambiente: tessitura del suolo, conformazione del terreno, presenza di corsi di acqua, eventi climatici, possono influenzare l'intensità dei fenomeni negativi legati alla distribuzione di agrofarmaci.



**Figura 1-1 Fenomeni derivanti dall'uso dei pesticidi**

**Fonte:** (Cortei dei Conti Europea, 2020)

Quando si esegue un trattamento fitosanitario, solo una parte molto limitata della miscela contenente la sostanza attiva raggiunge il bersaglio, mentre il resto viene disperso nell'ambiente attraverso vari fenomeni (Businelli Mario, 2009):

- volatilizzazione: la miscela durante il trattamento, dopo aver raggiunto la coltura o il terreno, può evaporare in aria ed essere trasportata dal vento;
- ruscellamento: la miscela, una volta raggiunto il target, può essere trasportata verso la superficie del terreno, a seguito di un evento piovoso o con l'irrigazione, o la sostanza attiva presente nella miscela può aderire fortemente alle particelle del terreno ed essere trasportata con esse quando, durante piogge molto intense si verifica il fenomeno dell'erosione del terreno. In questi modi può raggiungere un corpo di acqua superficiale;
- lisciviazione: a seguito di una pioggia la sostanza attiva che ha raggiunto il terreno, può penetrare attraverso il suolo, disciolta nell'acqua di percolazione e raggiungere le acque di falda;
- deriva: durante l'irrorazione della miscela si forma una massa nebulizzata, composta da piccolissime goccioline che vengono trasportate lontano dal punto di applicazione, ricadendo una parte sul terreno e sulla vegetazione circostanze ed una parte su un eventuale corso di acqua che si trova nelle vicinanze. Ciò è dovuto ad una serie di fattori quali: le condizioni meteorologiche legate a temperatura, velocità del vento, umidità, generazione dello spray, tipologie di attrezzature, corretto uso dell'irroratrice (Andrée Carter, 2014).

Nei normali trattamenti fitosanitari delle colture arboree le perdite di prodotto superano largamente la metà di quanto viene distribuito.

Le gocce di miscela chimica vanno quindi ad inquinare l'aria, l'acqua e il suolo ed a colpire non solo l'uomo, ma anche le piante spontanee e gli insetti utili. Inoltre, direttamente o attraverso il nutrimento, arrivano agli organismi che vivono nel terreno o in prossimità delle coltivazioni, come i piccoli mammiferi, gli uccelli, i pesci, ecc. per i quali questi prodotti si rivelano spesso altamente tossici o addirittura mortali (Rimediotti & Vieri, 2009).

La deriva è considerata insieme al ruscellamento uno dei fenomeni più importanti a livello di danni ambientali e sociali ed è quindi necessario che vengano adottate misure di mitigazione che possono essere indirette, quali siepi, fasce di rispetto, alberi, ma soprattutto dirette per limitare la generazione della deriva, quali ugelli anti deriva, applicati sulle macchine irroratrici o coadiuvanti anti deriva.

Gli effetti tossici acuti e cronici che si possono verificare in seguito ad un trattamento nei confronti di organismi non target sono legati alla persistenza generale della sostanza attiva e dei suoi prodotti di degradazione, nonché ai livelli di esposizione e di concentrazione nel tempo nei diversi comparti ambientali: aria, suolo e acqua e sulla catena alimentare (Giacomo Picone, 2016)

Il pericolo è dovuto al fatto che le sostanze attive possono in alcuni casi penetrare e concentrarsi negli organismi attraverso il processo di bioaccumulo o di biomagnificazione.

La normativa ISO 22866:2005 “*Attrezzature per la protezione delle colture – Metodi per la misurazione in campo della deriva dell'irrorazione*”, definisce la deriva come un movimento del fitofarmaco nell'atmosfera verso un sito non bersaglio (International Organization for Standardization, 2005).

È possibile stabilire che, solo in relazione alla distribuzione dei fitofarmaci sulle colture



**Figura 1-2 Perdite di prodotto fitosanitario**

arboree, le perdite di prodotto si possono quantificare in: 2-4% per evaporazione, 30-60% a terra, 10-35% per deriva o oltre il bersaglio e solo il 15-50% sul bersaglio (Figura 1-2).

Considerando l'effetto ambientale nocivo si stanno sperimentando e sviluppando sistemi innovativi (Mishra et al., 2023) per analizzare pesticidi e antibiotici alternativi alla gascromatografia, cromatografia liquida e ad alta pressione, la gascromatografia-spettrometria di massa, che siano di più facile e veloce utilizzo.

Per affrontare e cercare di mitigare gli effetti negativi, nel corso del 2017, il Ministero della Salute ha approvato un documento di orientamento basato sulle "Misure di mitigazione del rischio per la riduzione della contaminazione dei corpi idrici superficiali da deriva e ruscellamento" (Ministero della Salute, 2017).

Gli elementi in grado di contenere la deriva possono essere la vegetazione, le condizioni ambientali favorevoli e l'impiego di dispositivi tecnici in grado di ridurre il fenomeno, noti internazionalmente come Spray Drift Reducing Techniques (SDRT).

## 1.2 Macchine per la distribuzione di agrofarmaci

Le irroratrici possono essere classificate in base alla modalità di formazione delle gocce che può avvenire per pressione idraulica o per azione di un getto di aria ad alta velocità o in base al tipo di trasporto sulla vegetazione che può essere affidato alla sola energia cinetica impressa alle gocce o ad una corrente di aria.

Possiamo inoltre distinguere mezzi per trattamenti in forma:

- solida: impolveratrici, spandi granuli, microgranulatori
- gassosa: fumigatrici
- liquida: irroratrici per le colture erbacee e atomizzatori per le colture arboree

È importante sottolineare che l'irrorazione per mezzo di aerei dei prodotti fitosanitari è vietata in base al Decreto Legislativo del 14/08/2012 n. 150, articolo 13 e può essere autorizzata, in deroga, solo nei casi in cui non ci siano sistemi alternativi, oppure in presenza di un'evidente riduzione dell'impatto sulla salute dell'uomo e sull'ambiente.

- Impolveratrici (Figura 1-3): sono delle attrezzature in genere portate e il prodotto in formulazione polverulenta viene distribuita per mezzo di un getto di aria. Sono costituite da una tramoggia, un ventilatore centrifugo e da un sistema di dosaggio e distribuzione.
- Fumigatrici (Figura 1-4): si usano per interventi che prevedono la distribuzione nel terreno di prodotti fitosanitari, che per le loro caratteristiche evaporano rapidamente, dando luogo alla formazione di gas.



**Figura 1-3 Impolveratore Ideal Biostar 300P**

**Fonte: [www.idealitalia.it](http://www.idealitalia.it)**

Attualmente i fitofarmaci in formulazione solida o gassosi sono poco utilizzati. Ciò è dovuto al fatto che quelli solidi e in polvere hanno come difetto di poter entrare in contatto o essere inalato dall'operatore.



**Figura 1-4 Fumigatrice New Velox**

**Fonte: [www.oliveragro.it](http://www.oliveragro.it)**

Infatti, nelle schede informative dell'uso in sicurezza dei prodotti

fitosanitari pubblicate dall'Inail (Masciarelli & INAIL., 2018) sono indicate le protezioni da utilizzare per proteggere le vie respiratorie per impedire o attenuare l'inalazione di sostanze tossiche, l'utilizzo di filtri antipolvere.

- Irroratrici: macchine operatrici utilizzate per la distribuzione di una miscela liquida costituita da acqua e agrofarmaco.

Questa tipologia di distributrice è la più utilizzata, soprattutto nei vigneti e verrà trattata in questo lavoro di tesi.

### 1.2.1 Macchine irroratrici di fitofarmaci in campo viticolo

Le macchine irroratrici utilizzate nei vigneti per effettuare i trattamenti fitosanitari possono essere atomizzatori o nebulizzatori. La loro funzione consiste nel distribuire la miscela costituita da uno o più principi attivi in soluzione acquosa e convogliarli verso la coltura.

Possono essere di tipo portato, trainato o semovente (Figura 1-5).



**Figura 1-5 Macchine irroratrici di tipo portato, trainato e semovente**

Oppure si possono classificare in base al principio di funzionamento. Si possono trovare tipologie di irroratrici la cui frammentazione del liquido in gocce avviene per effetto della pressione ed il trasporto delle goccioline avviene a mezzo corrente di aria e sono propriamente dette atomizzatori, mentre nelle irroratrici pneumatiche o nebulizzatori la frammentazione ed il trasporto della miscela liquida è affidata al flusso di aria.

Gli atomizzatori nebulizzano gocce dal diametro di circa 200-600  $\mu\text{m}$ , mentre i nebulizzatori di circa 50-200  $\mu\text{m}$ .

In base alla metodologia del trasporto delle gocce abbiamo i sistemi nei quali il trasporto è affidato all'energia cinetica posseduta dalle gocce, definito getto proiettato, mentre se viene sfruttato il flusso di aria generato da ventilatori assiali, radiali o tangenziali, si parla di irroratrici a getto portato.

Questi macchinari hanno però incontrato delle criticità legate all'impossibilità di dirigere con precisione il getto verso la coltura, con spreco di prodotto e soprattutto con un elevato inquinamento ambientale.



**Figura 1-6 Nebulizzatore portato  
Martignani**

**Fonte: [www.martignani.com](http://www.martignani.com)**

trattamenti più mirati.

Anche questi hanno mostrato delle problematiche legate all'accentuata micronizzazione che ne comporta una dispersione più estesa con problemi di deriva e inquinamento ambientale anche a grandi distanze.

- Nebulizzatori: questa tipologia di macchinari per la distribuzione di fitofarmaci (Figura 1-6) emette la soluzione a bassa pressione, intorno a 1,5 bar, dagli ugelli o diffusori e viene risucchiata e micronizzata dalla depressione generata da un ventilatore radiale, che riesce ad imprimere una velocità maggiore di quello assiale, che poi trasporta le microgoccioline verso il bersaglio. Quindi una micronizzazione ed omogenizzazione migliore.

Un altro vantaggio dei nebulizzatori è la capacità di orientare gli ugelli, adattando così la direzione del getto alla geometria della coltura ed effettuando dei

### **1.3 Ottimizzazione dei trattamenti per la riduzione nell'impiego dei fitofarmaci**

Le macchine irroratrici generano inevitabilmente il fenomeno della deriva, causa di inquinamento ambientale, quindi, per limitarlo si deve intervenire sulla formazione delle gocce e sul loro trasporto verso il bersaglio.

L'Europa e gli Stati membri da molti anni si sono mostrati molto sensibili ai problemi creati dall'utilizzo dei prodotti chimici in agricoltura ed hanno provveduto ad emettere una serie di norme che vanno a cercare di limitarne l'utilizzo.

A livello nazionale, Abruzzo, Emilia-Romagna, Lombardia e Veneto nel loro ultimo Complemento di Sviluppo Rurale (CSR) hanno attivato l'intervento SRA19: Riduzione impiego fitofarmaci, sulla base dei contenuti del Piano Strategico Nazionale per l'attuazione della PAC 2023-2027 (PSP).

Prevede un sostegno per ettaro di SAU a favore dei beneficiari che si impegnano ad applicare tecniche di gestione agronomica volte alla riduzione della deriva dei prodotti fitosanitari, a ridurre l'impiego di sostanze attive classificate come candidate alla sostituzione ai sensi del Reg (CE) n. 1107/2009 ed altre sostanze individuate ai sensi dell'art. 15 della Direttiva 2009/128/CE, nonché ad introdurre metodi di difesa più evoluti, che vanno oltre il mero aspetto limitativo nell'utilizzo dei prodotti fitosanitari.

“Pertanto, l'intervento concorre alla gestione sostenibile delle superfici agricole, con le finalità generali di contenere alcuni fattori di pressione ambientale del settore primario e contenere e limitare gradualmente i loro impatti sulle risorse ambientali. Le finalità ambientali dell'intervento ne evidenziano la complementarità con uno degli obiettivi della strategia Farm to Fork (riduzione del 50% dell'uso dei prodotti fitosanitari più pericolosi) e con il PAN approvato in applicazione della Direttiva sull'uso sostenibile dei prodotti fitosanitari ed in sinergia anche con la Direttiva Quadro Acque. Inoltre, contribuiscono agli obiettivi della “Strategia sulla biodiversità” (COM/2020/380 final), relativamente alla riduzione dell'uso dei pesticidi e all'adozione di strategie avanzate di difesa delle colture basate sui metodi biotecnologici e biologici, oltre alle sinergie previste dalle Direttive Habitat e Uccelli e del Quadro di Azioni Prioritaria per Natura 2000 2021-27 (PAF) di cui alla deliberazione della Giunta regionale n. 2021 del 29/11/2021”.

L'intervento si articola in tre azioni:

Azione 1) Riduzione del 50% della deriva dei prodotti fitosanitari durante la loro distribuzione attraverso l'adozione di tecniche di riduzione della deriva dei prodotti fitosanitari di almeno il 50% rispetto alla tecnica di irrorazione ordinaria utilizzando sistemi di trattamento e/o macchine/attrezzature specifici fra quelli di seguito elencati: ugelli anti deriva ad iniezione d'aria, ugelli a specchio per barre irroratrici per colture erbacee, manica d'aria su barre a polverizzazione meccanica (esclusi interventi in pre-emergenza e post-emergenza precoce), sistemi di distribuzione localizzata (per irroratrici per colture erbacee) e con schermature (per colture arboree), sistemi con paratie per la chiusura del flusso d'aria, macchine irroratrici a tunnel.

Azione 2) Riduzione dell'impiego dei fitofarmaci contenenti sostanze attive individuate come più pericolose

Azione 3) Adozione di strategie avanzate di difesa delle colture basate sui metodi biotecnologici e biologici (*SRA19 ACA 19 Riduzione Impiego Fitofarmaci*, n.d.)

Con il recepimento della Direttiva 2009/127/CE, i costruttori di macchinari per l'agricoltura hanno introdotto nuove dotazioni di serie divenute obbligatorie per la marcatura CE.

Tutte le macchine devono permettere l'interruzione totale dell'irrorazione con un singolo comando, devono permettere un riempimento agevole ed uno svuotamento completo del serbatoio principale, devono consentire di stabilire il volume da distribuire, devono prevedere un serbatoio solo per l'acqua per il lavaggio dell'irroratrice e devono essere progettate per minimizzare la dispersione del prodotto per deriva e la percolazione a terra.

Nello stesso tempo, il recepimento della Direttiva 2009/128/CE avvenuto con il Piano di Azione Nazionale ha introdotto l'obbligo di sottoporre a verifica funzionale periodica le macchine utilizzate a scopo professionale per la distribuzione di agrofarmaci.

Con tale approccio, se prima il principale parametro di valutazione era l'efficacia del trattamento nei confronti delle avversità, ora diventano di primaria importanza ed imprescindibili i metodi, le modalità e le tecnologie atte a ridurre l'inquinamento da fitofarmaci.

Diventa indispensabile, quindi, che l'agricoltore abbia a disposizione ed utilizzi attrezzature e dispositivi in grado di ottimizzare il deposito del prodotto sulla vegetazione ed allo stesso tempo vada a ridurre le dispersioni degli agrofarmaci nell'ambiente.

#### 1.4 Ottimizzazione dei fitofarmaci sulle colture arboree

I due principali obiettivi nell'utilizzo dei prodotti fitosanitari nelle arboree, sono una distribuzione mirata, cioè distribuire il prodotto solo dove è presente la vegetazione bersaglio e di adeguare le modalità di distribuzione e quindi la qualità della stessa alle caratteristiche dimensionali e morfologiche della vegetazione: altezza, spessore, strati fogliari, sviluppo vegetativo, con l'obiettivo di ridurre l'utilizzo dei fitofarmaci e degli effetti negativi, tra cui primeggia la deriva (Raffaele Casa, 2016).

Per trovare una soluzione a tutte le problematiche legate alla distribuzione dei fitofarmaci, sono state messe a punto nuove tipologie di irroratrici o sistemi ausiliari da adattare alle macchine già esistenti, da applicare contemporaneamente a soluzioni quali fasce tampone previste dalla normativa, in corrispondenza dei margini del campo con la funzione di salvaguardare le aree adiacenti dagli effetti legati alla deriva del prodotto fitoiatrico, o siepi o altre barriere fisiche.

Le irroratrici ricoprono, infatti, un ruolo di primo piano nell'ambito della mitigazione della deriva.

Per quanto riguarda le irroratrici è possibile trovare:

- atomizzatori a getto mirato (Figura 1-7): prevedono un ventilatore centrifugo che invia l'aria attraverso dei tubi flessibili che possono essere orientati e permettere all'operatore di regolare la macchina in base al sesto di impianto della coltura e quindi minimizzare gli sprechi;



**Figura 1-7 Irroratrice a getto mirato**

***Oktopus Nobili***

**Fonte: [www.nobili.com](http://www.nobili.com)**

- irroratrici scavallanti (Figura 1-8): macchine in grado di trattare contemporaneamente, con un solo passaggio, due o più filari a larghezza variabili;



**Figura 1-8 Irroratrice scavallante**

***Ventis FF Pro Nobili***

**Fonte: [www.nobili.com](http://www.nobili.com)**

- irroratrici a tunnel (Figura 1-9): macchinari caratterizzati da due strutture contrapposte che racchiudono integralmente la parete vegetativa e che sono in grado di intercettare e recuperare la frazione di gocce che non riesce ad aderire alla vegetazione o ai grappoli. La miscela recuperata viene raccolta in un contenitore posizionato nella parte sottostante il macchinario e, dopo un'apposita filtrazione a più stadi, viene reindirizzato attraverso una pompa indipendente al serbatoio principale. Permettono un recupero medio del 40% della



**Figura 1-9 Irroratrice a tunnel Drop Save Ideal**

**Fonte: [www.idealitalia.it](http://www.idealitalia.it)**

- irroratrici a carica elettrostatica: tecnologia che permette di ottenere un importante incremento della copertura e dell'omogeneità dei trattamenti e una riduzione della deriva, del gocciolamento e degli sprechi di prodotto. Il sistema elettrostatico viene posizionato in prossimità dei punti di erogazione, all'uscita degli ugelli e genera un campo elettrico che dà carica positiva all'aria emessa dall'atomizzatore o dal nebulizzatore che carica a sua volta la miscela. Questa operazione permette la massima aderenza del prodotto alla vegetazione, dovuta dal fatto che le piante hanno una carica negativa naturale, data dalla linfa, sali minerali e umidità, che attira

magneticamente la miscela caricata positivamente. In questo modo il fitofarmaco si deposita solamente sulla vegetazione, riducendo la deriva anche in presenza di vento e di nebulizzazione fuori bersaglio.

Ulteriore vantaggio è costituito dal fatto che le gocce avendo tutte la stessa carica si respingono e non aumentano di dimensioni.

Un esempio di questo sistema produttivo ed efficiente anche verso l'ambiente è rappresentato dalla gamma "VENTIS" dell'azienda Nobili di Bologna (Figura 1-10).

Questo sistema elettrostatico, denominato "ES", ottimizza la distribuzione delle miscele fitosanitarie, riducendo le perdite, grazie all'elevata capacità di penetrazione nelle chiome, garantita dalla presenza di nebulizzatori pneumatici integranti un sistema di carica elettrostatica appositamente sviluppata dalla Nobili (Lorenzo Quadri, 2023).



**Figura 1-10 Irroratrice elettrostatica  
Ventis ES Nobili**

**Fonte: [www.nobili.com](http://www.nobili.com)**

Mentre per quanto riguarda i dispositivi abbiamo:

- Ugelli anti deriva: elemento che riveste un ruolo di primaria importanza sia nei sistemi di nebulizzazione pneumatica o meccanica e può essere considerato anche il più semplice ed economico che si può adattare alle varie tipologie di atomizzatori. L'ugello anti-deriva agisce limitando la formazione delle gocce troppo fini. In genere derivano da quelli a ventaglio, ma dotati di accorgimenti tecnici finalizzati a creare un calo di pressione nel corpo dell'ugello, con l'obiettivo di aumentarne le dimensioni medie delle gocce prodotte a parità di portata. Presentano una lunghezza maggiore, dovuta alla presenza di una camera di turbolenza integrata.

In ordine cronologico si è vista la comparsa degli ugelli con pre-orifizio e successivamente quelli ad inclusione di aria.

I primi derivano da ugelli a ventaglio nei quali è stato inserito un pre-orifizio con funzione di dosaggio della miscela e riduzione della velocità prima della formazione del getto, che avviene invece in corrispondenza del tradizionale orifizio posto nella

parte terminale. Questo comporta che il dosaggio e la polverizzazione della miscela avvengono in tempi e posizioni diverse.

Invece gli ugelli ad inclusione di aria (Figura 1-11) sono di più recente realizzazione. Sono dotati di un corpo allungato con due fori laterali che collegano il condotto dell'ugello con l'esterno. L'aria, per effetto Venturi, viene aspirata dall'esterno e miscelata con il liquido all'interno del corpo dell'ugello, permettendo in questo modo la formazione di gocce contenenti bolle di aria e soprattutto di dimensioni maggiori rispetto alla frammentazione tradizionale (Uso Sostenibile Prodotti Fitosanitari, 2014).

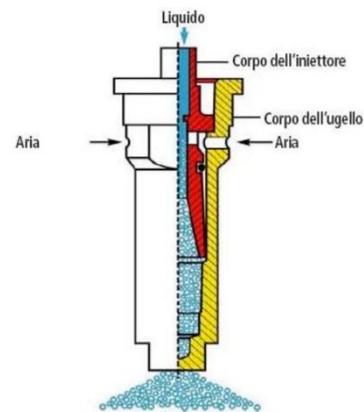
Le gocce quando raggiungono la vegetazione si frammentano, dando origine ad una superficie di contatto maggiore rispetto a gocce prive di aria, creando una copertura maggiore ed un'ottima adesione alla superficie inclinata delle foglie.

Importante, in questa seconda tipologia, è la pressione di esercizio che deve essere maggiore di quella utilizzata per una frammentazione tradizionale, altrimenti le gocce potrebbero risultare troppo grandi e creare problemi di copertura.

La distribuzione e quindi la copertura che si può ottenere con questa tipologia di ugelli non è pari a quella degli ugelli tradizionali; quindi, è importante valutare e controllare che si stia irrorando con un volume di miscela sufficiente alla protezione della coltura. In questo caso non è sufficiente basarsi sulla superficie del frutteto, vigneto, ma è necessario valutare il volume di vegetazione da trattare basandosi sul metodo TRV (Tree Row Volume) o in funzione dell'altezza della parte con il metodo LWA, /Leaf Wall Area) (Uso Sostenibile Prodotti Fitosanitari, 2014)

- Coadiuvanti anti deriva: la modifica dello spray con la riduzione della parte di goccioline più piccole, quelle soggette a deriva, può essere effettuata con l'utilizzo di coadiuvanti anti deriva, in grado di modificare le proprietà fisiche della miscela.

Viene variata la viscosità e quindi la dimensione delle gocce erogate e la portata degli ugelli o la volatilità delle gocce.



**Figura 1-11 Ugello ad inclusione di aria**

**Fonte:** (Cristiano Baldoin, 2008)

È necessario fare attenzione alle indicazioni riportate nell'etichetta del prodotto fitosanitario, in quanto alcune formulazioni sono già ottimizzate e non è prevista e permessa l'aggiunta del coadiuvante.

## Capitolo 2

### AGRICOLTURA DI PRECISIONE

Nell'ottica della riduzione degli input produttivi, quindi della mitigazione degli effetti negativi derivanti dall'irrorazione dei fitofarmaci, rientra anche l'adozione di tecniche di Agricoltura di precisione, tecnologie innovative di ultima generazione, come l'informatica digitale, la guida basata sul sistema di posizionamento globale (GPS), il sistema di navigazione globale (GNSS), sistemi di controllo, agricoltura verticale, agricoltura idroponica, uso di sensori, veicoli autonomi, robotica (Paul et al., 2022).

Secondo Davide Misturini in *Precision Farming* i benefici possono essere sintetizzati in:

- eliminazione delle sovrapposizioni con sistemi di guida semi-automatica;
- maggiore velocità di esecuzione delle operazioni;
- minore affaticamento dell'operatore;
- minori errori di applicazione prodotti e sementi;
- ottimizzazione della capacità produttiva di un terreno;
- ottimizzazione dell'uso della concimazione;
- aumento delle rese;
- riduzione degli input produttivi;
- maggiore sostenibilità ambientale.

(Davide Misturini, 2020)

Negli ultimi anni le imprese e gli stakeholder del settore agricolo italiano, europeo e mondiale hanno dovuto affrontare continue sfide per rispondere ai cambiamenti sociopolitici, all'aumento del degrado ambientale, alle carenze idriche, all'aumento della richiesta energetica, alla presenza di nuovi parassiti e malattie, accompagnati da un aumento delle superfici delle strutture agricole.

Tutte queste situazioni spingono gli agricoltori ad integrare l'innovazione nei sistemi produttivi dell'agricoltura, per renderla più produttiva e nello stesso tempo più sostenibile (Luana Centorame, 2022).

Vi è uno stretto legame tra i fattori su cui si basa l'agricoltura di precisione e l'impegno che viene assunto sotto vari punti di vista per aumentare la sostenibilità economico-ambientale (Raffaele Casa, 2016).

In questa ottica, negli ultimi anni si stanno sviluppando e diffondendo nuove tecniche di coltivazione che stanno trasformando l'agricoltura tradizionale in agricoltura di precisione.

A dimostrazione dell'importanza che ha assunto a livello europeo e nazionale, l'agricoltura di precisione è prevista nel nuovo Piano Strategico Nazionale PAC 2023-2027 con la misura SRA24 -ACA 24 Pratiche di agricoltura di precisione. Intervento (Rete Rurale Nazionale, 2022) incluso negli impegni in materia di ambiente e di clima con la finalità di ridurre quantitativamente gli input chimici ed idrici utilizzati per la produzione agricola attraverso l'adozione di pratiche di agricoltura di precisione, sistema di produzione sostenibile che consente agli imprenditori un maggiore rispetto degli agrosistemi e dei cicli naturali.

L'intervento prevede un pagamento annuale per ettaro di SAU per l'adozione di tecniche di agricoltura di precisione, che si basano sulla digitalizzazione dei dati mediante l'adesione ad una piattaforma di servizi digitali e supporto alle decisioni (DSS) in agricoltura per l'esecuzione con apposite macchine di:

- fertilizzazioni di precisione
- trattamenti fitosanitari di precisione
- irrigazione di precisione

L'agricoltura di precisione fa ricorso alle migliori tecnologie a disposizione per realizzare la gestione sito-specifica (Raffaele Casa, 2016).

Nell'ottica della necessità di avvalersi della ricerca ed innovazione per affrontare i cambiamenti climatici e contribuire agli obiettivi di sviluppo sostenibile e rafforzare la competitività e la crescita, rientra anche l'iniziativa dell'Unione Europea Orizzonte Europa, programma quadro di ricerca e innovazione (R&J) per il periodo 2021-2027, il cui obiettivo è rafforzare la base scientifica e tecnologica dell'UE, sviluppando soluzioni per affrontare priorità strategiche come le transizioni verde e digitale.

Il programma contribuisce inoltre al conseguimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile e rafforza la competitività e la crescita.

Orizzonte Europa fornisce i mezzi necessari per la crescita e la prosperità futura dell'Europa, permettendo di rimanere leader mondiale nella ricerca ed innovazione e permette che la scienza e la tecnologia diano delle risposte alle grandi sfide globali come la

salute, l'invecchiamento, la sicurezza, l'inquinamento ed i cambiamenti climatici (Parlamento europeo e Consiglio, 2018).

Sono stati anche finanziati diversi progetti europei, tra cui Life Perfect che ha come obiettivo quello di “ridurre la quantità di agrofarmaci utilizzati e la loro dispersione nell’ambiente attraverso l’impiego di strumenti e tecnologie di facile utilizzo per l’operatore” (*Progetto Life Perfect*, n.d.).

Risale al 1999 la definizione più usata per definire l'agricoltura di precisione: “un sistema che fornisce gli strumenti per fare la cosa giusta, nel momento giusto, al momento giusto” (Pierce' & Nowak, 1999).

Secondo una definizione più estensiva 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 e 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” (Casa e Sartori, 2015)

Quindi, secondo Pierce e Novak, può essere definita come: “l'applicazione di tecnologie e principi per gestire la variabilità spaziale e temporale associata a tutti gli aspetti della produzione agricola, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni delle colture e la qualità ambientale” (Pierce' & Nowak, 1999).

Si basa, quindi, sull'utilizzo di una minore quantità di risorse per ottenere lo stesso risultato o addirittura aumentare la qualità e la quantità del prodotto ottenuto. Tutto in termini di razionalizzazione di acqua, fertilizzanti, ma soprattutto prodotti fitosanitari.

Attraverso lo studio della variabilità spaziale e temporale dei fattori produttivi presenti naturalmente in campo e tenendo conto delle eventuali interazioni tra gli stessi, è possibile stabilire le esigenze della pianta durante il ciclo colturale e gli interventi necessari per garantire uno sviluppo omogeneo della pianta, sopperendo alle eventuali specifiche carenze (Francesco Barracu, 2012).

## 2.1 Variabilità

Le pratiche agricole richiedono attività preparatorie e distribuzione di input durante il ciclo colturale.

In genere, tutte le operazioni colturali vengono svolte in maniera omogenea su tutto l'appezzamento.

L'agricoltura di precisione, invece, opera basandosi sul fatto che, piuttosto che applicare la medesima quantità di input agronomici su un intero campo coltivato, viene prima studiata e misurata la variabilità (di uno o più parametri) e successivamente adottata la strategia migliore.

La variabilità può essere suddivisa in variabilità spaziale, temporale e colturale (*La Gestione «precisa» Dallo Studio Della Variabilità*, 2015).

#### 2.1.1 Variabilità spaziale

All'interno di un campo coltivato si può trovare sempre una variabilità più o meno accentuata. La presenza di una pendenza, di un frangivento o di un drenaggio, generano variabilità, come le caratteristiche fisico-chimiche del suolo, quali la composizione chimica, la tessitura.

Quindi lo studio della variabilità spaziale è di primaria importanza e deve essere fatto prima della pianificazione per la gestione delle coltivazioni.

#### 2.1.2 Variabilità temporale

La variabilità temporale rappresenta la capacità della coltura ad assumere livelli produttivi diversi nel corso delle diverse annate o cicli colturali, in corrispondenza dello stesso punto all'interno dell'appezzamento, pur manifestando per tale zona una produttività maggiore o minore rispetto a quelle adiacenti (*La Gestione «precisa» Dallo Studio Della Variabilità*, 2015).

Le variazioni possono essere su scala annuale, stagionale o addirittura giornaliera. La sua determinazione consiste nel calcolo, per ciascun punto, della differenza tra la resa della singola annata e la produzione media negli anni. Ripetendo tale passaggio per ogni anno, è possibile ottenere un'indicazione sulla tendenza, con la quale, la resa di ciascun punto varia nel corso degli anni (Simone Papi, 2018).

#### 2.1.3 Variabilità colturale

La variabilità colturale rappresenta la capacità produttiva che si può riscontrare all'interno di uno stesso appezzamento da parte di colture diverse. Dipende dal rapporto che la coltura instaura con le proprietà del terreno (*La Gestione «precisa» Dallo Studio Della Variabilità*, 2015).

## 2.2 La gestione della variabilità

I dati relativi alla variabilità vengono rilevati, analizzati e studiati per mezzo di varie metodologie e tecnologie:

- Global Navigation Satellite System (GNSS);
- Geographical Information System (GIS);
- Sensoristica per rilievi da remote sensing o da proximal sensing.

La raccolta, la gestione e l'integrazione di dati acquisiti con sistemi satellitari, meteorologici, droni e con sensori in campo, con quelli relativi alle operazioni colturali, riduce il rischio di inquinamento e degrado ambientale connesso all'uso dei prodotti fitosanitari e dei fertilizzanti e promuove l'uso razionale dell'acqua di irrigazione (Fabian Capitanio, 2022).

### 2.2.1 *Global Navigation Satellite System*

La tecnologia che permette di determinare la posizione di un punto sulla superficie terrestre in un sistema di riferimento geografico è il GNSS (Iacopo Bianconi, 2018)

Il GNSS è un sistema alla base dell'agricoltura di precisione, costituito da satelliti geostazionari in comunicazione tra di loro.

Le principali costellazioni utilizzabili sono: GPS degli Stati Uniti, Galileo dell'Unione Europea, GLONASS della Federazione Russa e COMPASS della Cina (Davide Misturini, 2020).

Al fine di poter decifrare e rendere utilizzabili le informazioni che i diversi satelliti inviano sulla terra, è necessario un sistema di antenne e stazioni di ricezione e trasmissione.

Le informazioni ottenute consentono di avere i principali dati per poter guidare e raggiungere un determinato punto, infatti forniscono la posizione, la velocità di spostamento e la direzione della bussola.

La determinazione della posizione fornita dal solo GNSS è limitata al numero di satelliti disponibili in un dato momento ed è soggetto ad errore.

In base all'operazione che si deve effettuare, è possibile scegliere tra due tipologie di correzione:

- DGPS (Differential GPS), utilizzabile per operazioni come la concimazione e si possono raggiungere precisioni fino a dieci centimetri;
- RTK (Real Time Kinematic), utile per operazioni come semina e trapianto e può raggiungere precisioni di +/- due centimetri. Si basa su un segnale radio inviato da un secondo ricevitore posizionato a bordo campo o su dati forniti da una rete di antenne collegate attraverso la connessione internet (Davide Misturini, 2020).

I ricevitori satellitari, sono indispensabili nell' AdP per georiferire i dati rilevati, ma il principale utilizzo è quello delle macchine agricole.

Le soluzioni di guida si basano su tre elementi:

- ricevitore satellitare per conoscere la posizione e la direzione di guida;
- display in cabina per impostare i punti di riferimento per la linea guida o per marcare la zona già lavorata per evitare sovrapposizione;
- attuatore per mantenere il mezzo lungo la linea di guida definita.

(Davide Misturini, 2020)

I sistemi di guida satellitari si dividono in:

- sistemi di guida parallela, dove la gestione della guida è affidata all'operatore, ma riceve supporto per individuare le traiettorie ed i punti di ingresso in campo;
- sistemi di guida semi-automatica, dove l'intervento dell'operatore è richiesto solo per le manovre di bordo campo e in caso di imprevisti;
- sistemi di guida automatici, senza l'intervento dell'operatore

(Lorenzo Benvenuti Luigi Sartori, 2008).

### 2.2.2 ISOBUS

Nel corso degli anni, i costruttori di macchine hanno sviluppato attrezzature con tecnologie sempre più innovative, dotate di varie centraline e pulsantiere. Nel 2008, per ovviare alle problematiche relative alla gestione di tutti questi dispositivi e poterli invece gestire da un solo terminale, un gruppo di produttori ha fondato l'AEF (Agricultural Industry Electronic Foundation) ed introducendo la norma ISO-11783 *Tractors and machinery for*

*agriculture and forestry—Serial control and communications data network*, denominata ISOBUS ed adeguando gli standard al settore agricolo.

ISOBUS (Figura 2-1) è un protocollo universale per la comunicazione elettronica tra attrezzi, trattori e computer (Agricultural industry electronics foundation, 2015).



**Figura 2-1 Sistema Isobus**

**Fonte:** (Alessio Bolognesi, n.d.)

Permette di:

- governare gli attrezzi ISOBUS certificati grazie ai dati raccolti in tempo reale;
- integrato a sistemi di precisione satellitare consente di visualizzare la superficie trattata direttamente sul monitor
- di risparmiare carburante, input produttivi e di rispettare l'ambiente.

### 2.2.3 GIS

Il GIS può essere definito come una serie di strumenti che permettono di immagazzinare in modo logico ed elaborare tutti dati geo riferiti raccolti catalogandoli in funzione dello spazio e del tempo (Lorenzo Benvenuti Luigi Sartori, 2008).

GIS e GPS sono quindi due sistemi collegati tra loro, il GIS infatti analizza ed estrae informazioni ottenuti dai dati rilevati dal GPS.

Un GIS può quindi combinare dati geografici a dati di altro genere per generare mappe tecniche sintetiche, permettendo all'utente di raccogliere, gestire ed interpretare in maniera pianificata e sistematica le informazioni relative a specifici siti.

In agricoltura, il GIS permette di ottenere mappe dettagliate ed immagini delle coltivazioni ed analizzare un raccolto o pianificare un'operazione culturale.

Nell'agricoltura di precisione, l'uso di questa tipologia di strumenti permette di gestire una grande quantità di dati, con l'obiettivo di elaborarli, associandoli a funzioni di analisi, e visualizzarli graficamente in modo geo-referenziato (Simone Gatto, 2013).

### 2.2.4 Remote sensing and Proxima Sensing

A seconda delle caratteristiche e del metodo di rilevamento dei parametri i sensori si possono classificare in:

- proximal sensing, dove il rilevamento dei dati avviene a stretto contatto e vengono acquisiti ad una distanza minore di due metri (Rossel & Behrens, 2010), attraverso dei sensori ottici, scansioni laser e acquisizioni a ultrasuoni collocati nelle immediate vicinanze della coltura. Possono essere stazioni meteo, fotocamere, video camere fisse, sensori di umidità del suolo, sensori di temperatura, sensori di bagnatura fogliare. Inoltre, è possibile installare a bordo dei trattori dei sensori, che possono essere ad infrarossi in grado di rilevare la vigoria della vegetazione, la conducibilità elettrica e il contenuto di sostanza organica. Molti di questi sensori possono essere

anche applicati a trattori, con l'obiettivo di acquisire i dati in modo veloce, economico e preciso, ad alta risoluzione (Viscarra Rossel et al., 2011).

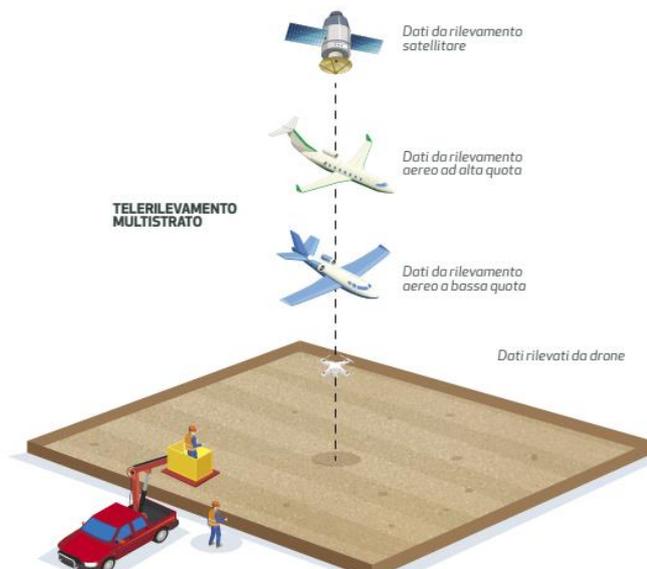
- remote sensing o telerilevamento. Queste tipologie di sensori permettono di rilevare le caratteristiche della coltura, del suolo o della loro combinazione, detta canopy, mantenendosi a distanza da essi (Raffaele Casa, 2016).

I sensori forniscono i dati per supportare il processo decisionale. Possono riguardare le caratteristiche del suolo, la gestione dell'acqua, la gestione della resa e della qualità (Mizik, 2023).

Con i dati e le immagini tele-rilevate a differenti lunghezze di onda, attraverso dei calcoli matematici, è possibile risalire anche a determinati indici di vegetazione utili nell'analisi dell'andamento della coltura in atto come l'RVI (Ratio Vegetation Index) o l'NDVI (Normalized Difference Vegetative Index).

Il telerilevamento si basa sulla misurazione della radiazione elettromagnetica incidente sul sensore e proveniente dall'oggetto rilevato (Raffaele Casa, 2016).

Il monitoraggio può essere effettuato o tramite satellite o con droni (Figura 2-2).



**Figura 2-2 Piattaforme di telerilevamento**

Nel caso dei satelliti, quelli attualmente usati sono Sentinel-2 e Landsat 8. La differenza principale consiste nel fatto che Sentinel -2 offre immagini con una risoluzione di 10 m ogni 3-5 giorni, mentre Landsat 8 fornisce immagini con una risoluzione di 30 m ogni 16 giorni (Luana Centorame, 2022).

I droni, invece, sono velivoli in grado di volare senza pilota umano e controllati dai canali radio.

Utilizzano la banda del visibile ed attraverso il calcolo dell'indice di vegetazione, combinato con le caratteristiche spettrali delle piante, permettono di ottenere informazioni sulla vegetazione (Xu et al., 2023).

Quindi nell'agricoltura di precisione l'associazione di sensori ad un drone permette:

- il rilievo e la mappatura delle colture;
- la gestione delle erbe infestanti e controllo dei parassiti;
- l'ispezione del suolo;
- l'irrigazione e gestione dell'acqua;
- la gestione dell'irrorazione.

Nell'agricoltura di precisione i sensori incorporati nei droni sono: telecamere multispettrali/iperspettrali, telecamere termiche, telecamere RGB e i sistemi LIDAR (Light Detection and Ranging).

Le telecamere multispettrali hanno come obiettivo la quantificazione dello stato della vegetazione in base al contenuto di clorofilla, di acqua fogliare, copertura del suolo e Leaf Area Index (LAI) e Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

Le telecamere RGB e i sistemi LiDAR invece vengono in genere usati per digitalizzare la superficie del terreno (Pasquale Daponte, 2019).

Possiamo quindi avere sensori del suolo e della pianta.

Sensori del suolo:

- sensori ottici per il contenuto di sostanza organica;
- raggi IR o microonde per il contenuto idrico;
- penetrometri e sensori ad induzione elettromagnetica per le proprietà fisiche.

Sensori della pianta:

- sensori ad induzione elettromagnetica e all'IR per il livello nutritivo;
- riflettanza, radiometria, analizzatori di immagini, IR per lo stato della salute della pianta;
- sensori di riflessione della luce visibile o all'IR, analisi di immagini per le infestanti.

I sensori ottici usano la spettroscopia di riflettanza per individuare la quantità di energia assorbita e quella riflessa dalle particelle del suolo, misurando il valore di sostanza organica nel suolo ed è importante per valutare la fertilità.

I sensori ad induzione elettromagnetica sono tra i più utilizzati per il rilievo della variabilità del suolo in agricoltura. Negli ultimi anni sono stati molto utilizzati per mappare le caratteristiche del suolo. Sono in grado di misurare la conducibilità o resistività elettrica di un suolo, sfruttano la capacità che ha il terreno, in funzione delle sue caratteristiche fisiche-

chimiche, di rispondere ad un campo elettromagnetico a bassa frequenza (Davide Misturini, 2020).

### 2.3 Creazione mappe di prescrizione

L'elaborazione dei dati raccolti dalle diverse tipologie di sensori permette di creare delle mappe tematiche dei singoli componenti del terreno o di creare delle mappe che rappresentano le diverse zone del terreno.

Utilizzando i dati raccolti con le precedenti strumentazioni, è possibile creare le mappe di prescrizione (Figura 2-3), che possono essere suddivise in:



**Figura 2-3** *Mappe di prescrizione*

- mappe di conducibilità o resistenza elettrica, che sono alla base delle decisioni di dove eseguire i campioni del terreno e creare delle zone omogenee. Rappresentano le variazioni legate alla diversa composizione del terreno o alla diversa presenza di elementi nutritivi;

- mappe sostanza organica, che derivano dall'utilizzo dei sensori Vis-Nir ed indicano la variazione di sostanza organica nell'appezzamento e danno indicazioni sulle operazioni di

correzione da effettuare;

- mappe delle zone omogenee del terreno, ottenute dall'elaborazione di tutti i dati raccolti ed offrono un quadro delle potenzialità e delle caratteristiche di ogni zona.

### 2.4 Variable rate Application

L'interazione della parte meccanica con quella elettronica permette di avere a disposizione macchine operatrici in grado di modificare la modalità operativa in ogni punto dell'appezzamento o della coltura.

L'applicazione a tasso variabile ha vari obiettivi:

- mettere a punto tecniche a basso impatto ambientale, che può rappresentare un'alternativa all'agricoltura biologica comportando un efficientamento delle operazioni di campo e minore distribuzione di input;
- tutela della biodiversità del suolo. Questo comporta una razionalizzazione nell'utilizzo degli input, minore disturbo del profilo del suolo e miglioramento di micro e meso fauna;
- il risparmio energetico, attraverso la riduzione del numero di passate delle sovrapposizioni;
- la qualità e sicurezza dei prodotti alimentari.

Le tecnologie che consentono la VRA, cioè la gestione sito-specifica di determinati input possono essere di due tipologie:

- VRA basata sull'utilizzo di mappe, dove la macchina operatrice modifica la quantità del prodotto da distribuire seguendo le informazioni contenute nelle mappe di prescrizione. È necessario che ci sia una localizzazione della macchina nell'appezzamento e che si conosca la quantità di prodotto da distribuire;
- VRA basata sull'utilizzo dei sensori installati sulla macchina operatrice, che rilevano in tempo reale i dati che vengono utilizzati come indicatori per la regolazione della distribuzione dei prodotti.

L'applicazione dei fattori a rateo variabile può essere usata in molte operazioni, quali lavorazione del terreno, concimazioni, irrigazioni, fertilizzazione o distruzione dei fitofarmaci.

## **2.5 Distribuzione fitofarmaci nel vigneto**

Estendere il concetto di agricoltura di precisione alla distribuzione dei fitofarmaci in vigneto significa affrontare una serie di problematiche legate alla sostenibilità ambientale, economica e sociale (Alessandra Biondi Bartolini, 2013)

Le tecniche di difesa in genere prevedono di distribuire in modo sicuro e tempestivo una dose uniforme di prodotto sulla vegetazione, ma se parliamo di vigneto, questo non è caratterizzato da uniformità.

Sino ad ora sia le macchine operatrici, sia i dosaggi degli agrofarmaci sono stati studiati in modo tale da permettere al trattamento di raggiungere anche le zone meno accessibili, con il conseguente accumulo e sovradosaggio sulla parte più esposta e soprattutto con enormi perdite nell'ambiente.

La miscela che va fuori bersaglio, nel suolo o nell'aria e quelle disperse per deriva può raggiungere in alcuni casi anche l'80% del prodotto erogato.

Con l'entrata in vigore della direttiva 2009/127/CE relativa alle macchine per l'erogazione dei prodotti fitosanitari sono stati introdotti alcuni aspetti innovativi, come l'obbligo per i produttori di macchine di valutare la dispersione della miscela nell'ambiente e di progettare macchine irroratrici tenendo conto dei rischi di dispersione e di deriva non solo nelle operazioni di distribuzione, ma anche in quelle accessorie come il lavaggio, la manutenzione, il riempimento (Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 2009).

Quindi, in viticoltura, la corretta gestione dei trattamenti fitosanitari rappresenta una delle pratiche più importanti e delicate per ottenere un prodotto di qualità.

È possibile analizzare varie tipologie di attrezzature e metodologie che caratterizzano la distribuzione dei fitofarmaci nell'agricoltura di precisione.

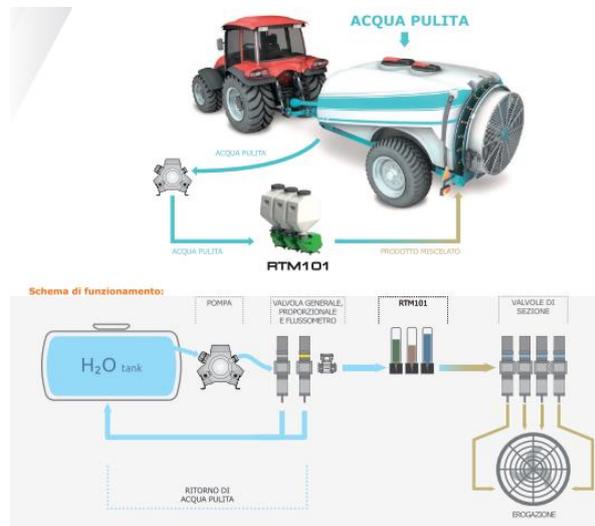
### 2.5.1 Miscelazione innovativa

Mastrolab, parte del gruppo ARAG, principale punto di riferimento nel settore degli accessori e spraying per l'agricoltura di precisione, ha brevettato il sistema RTM-101 (Figura 2-4), accessorio per la distribuzione di prodotti fitosanitari e fertilizzanti, che può essere installato su qualsiasi tipologia di irroratrice (Mastrolab, n.d.).

Il sistema permette la miscelazione del formulato con l'acqua direttamente sulla linea di distribuzione a valle della pompa, gestendo separatamente l'acqua pulita contenuta nella cisterna ed il fitofarmaco in contenitori separati.

Il prodotto fitosanitario viene prelevato nella concentrazione stabilita, miscelato in acqua ed inserito nella linea di distribuzione. L'erogazione può essere interrotta e ripresa in ciascun momento, grazie all'interfaccia con il software.

L'apparato può gestire contemporaneamente solidi e liquidi in concentrazione diversa.



**Figura 2-4 Funzionamento real time RTM 101**

**Fonte:** (Tommaso Cinquemani, 2019)

Presenta numerosi vantaggi:

- sicurezza per l'operatore, in quanto il formulato viene inserito direttamente dalla confezione e non deve essere manipolato;
- riduzione della possibilità di errori legati al dosaggio;
- nessun residuo in cisterna;
- può essere utilizzato per solidi e liquidi;
- eliminazione di problemi di incompatibilità dei formulati, evitando flocculazioni, depositi;
- possibilità di interrompere in qualsiasi momento l'irrorazione;
- programma di pulizia automatico;
- tracciabilità dell'applicazione;
- esclusione di numerosi componenti, compreso il sistema di agitazione.

## 2.6 Distribuzione a rateo variabile

La distribuzione a rateo variabile (Variable Rate Technology):

- modula il tasso di applicazione in base alla struttura e densità della chioma e agli spazi tra le piante e tra i filari;
- riduce la perdita di pesticidi calcolando la quantità di miscela da distribuire in base alle informazioni catturate dai sensori;
- può permettere anche una gestione real time con la variazione della distribuzione in base ai fattori esterni, quali la temperatura, il vento, la crescita della pianta, la densità ed altri fattori;
- permette un risparmio in termini di costi di distribuzione, dovuta all'utilizzo di minor prodotto, minore manodopera, minori risorse fisiche;
- è ad elevata compatibilità e si adatta a diverse tipologie di colture. A seconda delle esigenze è possibile raccogliere e analizzare i moduli del dispositivo di rilevamento più adatti.

(Abbas et al., 2020)

Si possono trovare in commercio macchine irroratrici variable rate application (VRA) o kit che permettono un'irrorazione a tasso variabile.

Nell'ultima edizione dell'Innovation Challenge 2023 di Enovitis in campo è stato premiato come New Technology il kit della ditta Cima di Pavia, che combina la viticoltura di precisione con la tecnologia a rateo variabile, con l'obiettivo di differenziare ed adattare i

volumi dei trattamenti antiparassitari a seconda delle zone del vigneto, individuando la variabilità e intervenendo in maniera differenziata attraverso le elaborazioni di mappe di prescrizione a rateo variabile che permettono di usare i prodotti solo dove servono (Cima Easy Farm, 2023).

## 2.7 Sensori innovativi

Negli ultimi anni sono disponibili nuovi sensori intelligenti, in grado di regolare la distribuzione non solo in funzione della velocità di avanzamento del mezzo, ma anche in base alla presenza di una determinata infestante o del volume della vegetazione della coltura da trattare (Davide Misturini, 2020).

Nascono con l'obiettivo di monitorare, visualizzare, generare dati digitali, per controllare l'applicazione delle risorse, migliorare la qualità e la produttività nel campo agricolo (Paul et al., 2022).

Si possono trovare sensori ad infrarossi, sensori ad ultrasuoni, sensori basati sul sistema laser LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging,), un sistema di visione artificiale e un sistema di fusione di sensori LiDAR (Ilari et al., 2023a).

### 2.7.1 Sensori ad infrarossi

Il sensore ad infrarossi trasmette e riceve un impulso luminoso ad alta intensità per rilevare la presenza del bersaglio.

È un sensore elettronico che rileva la radiazione infrarossa (IS) irradiata dagli oggetti nel suo campo visivo. Infatti, sono sensori che emettono energia propria, ma sfruttano solo la radiazione elettromagnetica emessa da altre sorgenti luminose.

Tutti gli oggetti con temperatura superiore allo zero assoluto emettono energia sotto forma di radiazioni luminose, di cui la maggior parte sono invisibili all'occhio umano, perché a frequenza inferiore a quella della luce dello spettro visibile, ma possono essere rilevate tramite specifici dispositivi elettrici.

Un esempio di sensori a infrarossi è OptRx, che sfrutta la proprietà delle foglie di assorbire e riflettere luce a determinate lunghezze di onda per misurare il vigore vegetativo (NDVI+NDRE). L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ha la funzione di calcolare le percentuali di copertura della chioma, mentre l'indice NDRE (Normalized Difference red edge) ha quello di valutare la concentrazione di clorofilla nelle foglie (Naguib & Daliman, 2022).

I dati ottenuti dai sensori, abbinati alla posizione fornita da un GPS consentono di creare mappe di vigore direttamente sul monitor in cabina. Sono stati utilizzati, per esempio, in uno studio per il rilevamento di flavescenza dorata e Mal dell'esca nelle piante (Daglio et al., 2022).

### 2.7.2 *Sensori ad ultrasuoni*

I sensori ad ultrasuoni permettono di rilevare la distanza tra una superficie bersaglio e il punto di misura.

Misurano le informazioni sul ritardo temporale, tra la trasmissione e la riflessione di un impulso sonoro, il quale è proporzionale alla distanza tra il sensore e l'oggetto (in quanto la velocità del suono è pressoché costante).

Un sensore ad ultrasuoni è costituito dal trasmettitore che invia l'impulso acustico ad alta frequenza, che si propaga nell'aria alla velocità del suono, all'oggetto target. Quando l'impulso incontra l'oggetto viene riflesso e ritorna al ricevitore.

La differenza temporale tra i due impulsi viene detta tempo di volo e la distanza dal bersaglio è calcolata moltiplicando il tempo di volo per la velocità del suono (Abbas et al., 2020).

Il sensore calcola quindi la distanza dell'oggetto riflettente in base al margine di tempo compreso tra la trasmissione dell'impulso acustico e la ricezione del segnale d'eco.

Nella viticoltura di precisione in relazione alla distribuzione dei fitofarmaci, i sensori ad ultrasuoni vengono utilizzati per misurare il volume e la densità della chioma. Le informazioni vengono trasmesse agli ugelli che regolano la potenza e la dose della miscela in base alla presenza o alla quantità di vegetazione

### 2.7.3 *LiDAR*

Il sensore LiDAR (Light Detection And Ranging) rappresenta una tecnica di rilievo, che basa le misurazioni sull'utilizzo della velocità della luce (Rivera et al., 2023).

Possono essere classificati in base a quattro meccanismi di azione: optomeccanica, elettromeccanica, MEMS e scansione a stato solido (Ilari et al., 2023a).

Inoltre, può essere classificato utilizzando tre tipologie di acquisizione di immagini: spaziale, spettrale e temporale. Per quanto riguarda l'acquisizione spaziale, è la funzionalità principale di uno strumento LiDAR e le informazioni (di distanza dell'oggetto) vengono ottenute attraverso la misurazione del tempo di volo. Una seconda tipologia è in grado di misurare le informazioni spettrali, in base all'intensità di ritorno del laser. Mentre le

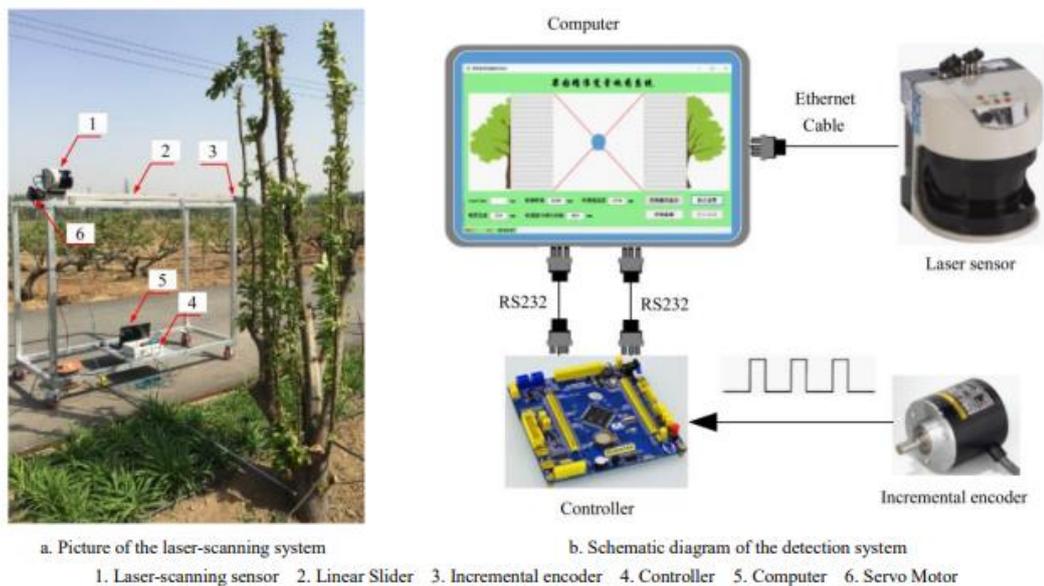
informazioni temporali sono indispensabili nella misurazione e valutazione della crescita delle piante (Raj et al., 2020).

Poiché la luce viaggia ad una velocità costante, i sistemi LiDAR possono calcolare la distanza tra il punto di riflessione ed il sensore che ha emesso l'impulso.

Questa tipologia di sensori attivano periodicamente impulsi luminosi e creano una mappa da una serie di riflessioni e di norma generano impulsi laser con frequenze nell'ordine di decine e centinaia di kHz rilevate.

Le coordinate dei punti intercettanti oggetti sono memorizzate in file chiamati “nuvole di punti” e questi punti sono rappresentati in uno spazio 3D, che con l'applicazione di opportuni algoritmi, consentono la digitalizzazione e la ricostruzione della struttura di un albero con elevata precisione (Abbas et al., 2020).

Utilizzando il sistema LiDAR (Figura 2-5) è possibile calcolare la struttura della vegetazione, grazie ad un computer che registra i dati del laser scanner ed è in grado di individuare diverse profondità della chioma in tempo reale e controllare lo sprayer a diversi livelli (Cai et al., 2017).



**Figura 2-5 Schema funzionamento laser scanner**

**Fonte:** (Cai et al., 2017)

#### 2.7.4 Robotica

Le innovazioni in campo viticolo e non solo, si stanno dirigendo verso sistemi dotati di intelligenza artificiale, che riescono a svolgere le operazioni in campo senza l'ausilio dell'uomo e sono in grado di raccogliere dati, elaborarli e di svolgere le azioni

autonomamente.

Nel vigneto possono analizzare le caratteristiche della vegetazione, realizzare mappe ed utilizzare le informazioni raccolte per distribuire i prodotti fitosanitari in maniera mirata e senza sprechi. Sono già stati sviluppati vari progetti per la realizzazione di robot.

Uno di questi è il Rovitis 4.0 – *Gruppo operativo per la diffusione di robot autonomo connesso a DSS per la gestione sostenibile ed efficiente del vigneto* (Innovarurale, 2018).

L'idea è di creare un sistema in grado di rendere un'azienda autonoma e capace di autogestirsi grazie alla connessione tra sensori e macchine capaci di eseguire autonomamente un'operazione culturale (Figura 2-6).



**Figura 2-6 Rovitis 4.0**

**Fonte:** (Innovarurale, 2018)

Un consorzio di istituzioni, associazioni, aziende hanno messo invece in atto il Progetto Scorpion, finanziato nell'ambito di Horizon 2000. "Progetto con lo scopo di sviluppare robot autonomi per trattare vigneti in montagna senza spreco di prodotti chimici e con benefici ambientali ed economici" (CERVIM, 2020).

Quindi un irroratore di precisione integrato su un trattore senza pilota, da utilizzare sui vigneti in forte pendenza.

Il robot prende in considerazione il GNSS fuso con altri sensori, per ridurre e/o sostituire trattamenti su oidio e peronospora e migliorare i trattamenti su colture permanenti (Figura 2-7).



**Figura 2-7 Prototipo robot Progetto Scorpion**

## Capitolo 3

### MATERIALI E METODI

L'obiettivo di questo lavoro di tesi consiste nella valutazione dell'efficacia nella distribuzione di prodotti fitosanitari in vigneto, attraverso due nuove tipologie di atomizzatori, dotati di sensoristica diversa, confrontati con un macchinario standard di "vecchia generazione"

Alla base del lavoro, si è andati a valutare la capacità dei due macchinari di precisione di regolare la distribuzione degli agrofarmaci attraverso la lettura da parte dei sensori della presenza o assenza di vegetazione

Questa sperimentazione rappresenta la prosecuzione ed implementazione dei precedenti lavori di tesi (Tobia, 2019; Tiffi Magi, 2021; Centorame, 2022).

#### 3.1 Caso di studio

Il cantiere per la prova è costituito da un trattore Claas combinato a due distributori di precisione di agrofarmaci ed uno standard.

##### 3.1.1 Atomizzatore Turbmatic

L'atomizzatore già presente nel parco macchine dell'azienda è un Turbmatic Defender MK2 91 AFT/1000 (Figura 3-1), prodotto dalla ditta SAE, trainato, monoasse, senza ruote



*Figura 3-1 Atomizzatore Turbmatic*

sterzanti, con frammentazione meccanica e trasporto pneumatico. Il trattore utilizzato è della ditta CLAAS, modello Nectis 267 F con potenza motore di 73kW.

Le caratteristiche tecniche sono descritte nel sito dell'azienda (Tabella 1)

**Tabella 1 Specifiche tecniche atomizzatore Turbmatic**

Capacità cisterna	1000 litri
Materiale cisterna	Polietilene
Diametro ventola	910 mm
Aspirazione	Anteriore
Larghezza interfila	2,5 – 8,0 m
Altezza di distribuzione	4,5 -6,0 m
Potenza minima trattore	36 Kw – 46 Kw

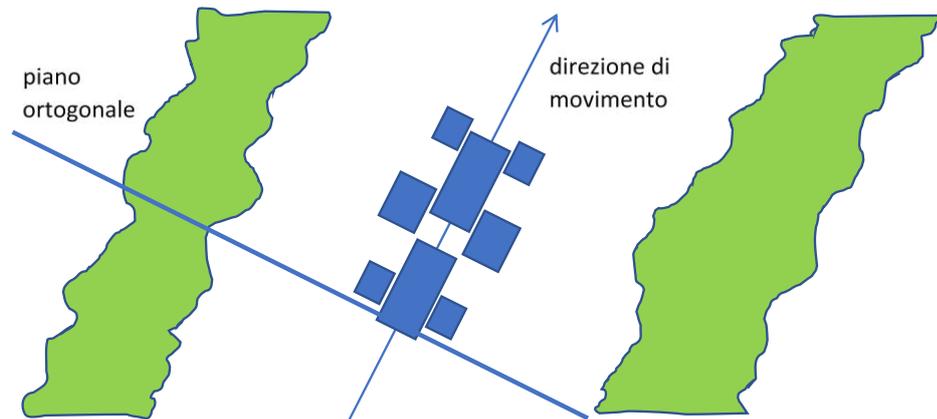
L'atomizzatore è dotato di 14 ugelli a cono a circuito centralizzato disposti su una barra verticale (7 per lato) con flusso di aria tangenziale. Per la prova, l'atomizzatore è stato equipaggiato con un sistema di acquisizione dati costituito da sensori montati su una struttura fissata alla parte anteriore del telaio dell'atomizzatore (Figura 3-2).



**Figura 3-2 Sistema LiDAR**

Il sistema di acquisizione dati (Centorame, 2022) è composto da:

- Sensore LiDAR (SLAMTEC: RPLiDAR A3), montato in posizione centrale rispetto all'atomizzatore e ortogonale rispetto al filare. Queste condizioni permettono di avere la distanza sufficiente a garantire il calcolo e la trasmissione dei dati da parte della centralina ed anche la possibilità di registrare dati lungo tutta l'altezza della parete vegetative. È stato scelto per il costo contenuto e per la frequenza di acquisizione dei dati (16 Khz, corrispondenti a 16.000 punti al secondo con utilizzo all'aperto) che, in relazione alla velocità standard di cantiere per trattamenti fitosanitari, consente di definire oggetti o fallanze sulla vegetazione con dimensioni lineari intorno ai 10-15 cm. Il LiDAR è di tipo 2D con un angolo di impronta di 360°, riesce quindi a determinare contemporaneamente la struttura di due metà di filari contrapposti (Figura 3-3).

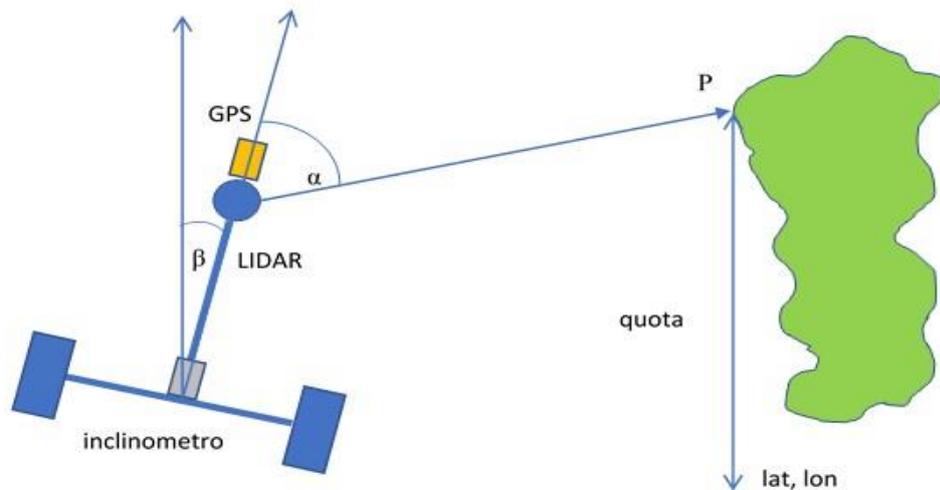


**Figura 3-3 Piano di acquisizione del LiDAR**

**Fonte:** (Luana Centorame, 2022)

Essendo necessario esprimere le caratteristiche dei filari in modo tridimensionale, la terza posizione è garantita dalle coordinate dall'antenna GPS. Quella utilizzata è Ag Leader GPS 1500, fissata nel punto più alto sullo stesso asse del sensore LiDAR per evitare le interferenze della parete fogliare sulla ricezione del segnale. Questa tipologia di ricevitore si collega ad almeno quattro satelliti presenti in orbita ed usa le informazioni da loro fornite per calcolare la posizione con un errore massimo di  $\pm 1$  m, a seguito di una correzione differenziale operata da una rete di satelliti e basi terrestri (in Europa EGNOS). Ciò permette la georeferenziazione del cantiere e fornisce la posizione tridimensionale dei punti determinati dal LiDAR. Le coordinate tridimensionali sono date dall'integrazione di due coordinate sul piano verticale date dal LiDAR ed una coordinata longitudinale alla contropalliera derivata dal GPS.

- Dispositivo di misura inerziale (IMU) a tre assi (WIT MPU6050 3-Axis), collocato in posizione centrale, sul telaio dell'atomizzatore. È un dispositivo elettronico che attraverso una combinazione di giroscopi e magnetometri è in grado di rilevare i movimenti rotazionali sui tre assi X-Y-Z e il moto di accelerazione dell'oggetto. Il dispositivo (Figura 3-4) ha lo scopo di determinare eventuali errori di posizionamento del LiDAR che si manifestano quando si opera su superfici irregolari, come gli interfilari e migliora la precisione delle misurazioni.



**Figura 3-4 Inclinometro applicato in vigneto**

**Fonte:** (Luana Centorame, 2022)

Tutti i sensori sono collegati con dei cavi dati ad una scheda elettronica (*Raspberry Pi B+*) programmata con un Software sviluppato dalla ISELQUI Technology, che è in grado di gestire in tempo reale i dati acquisiti dai sensori, coordinati temporalmente da un orologio interno.

Questo sistema è in grado di rilevare eventuali fallanze, disformità o vuoti nella vegetazione ed è, quindi, possibile effettuare un'irrorazione a rateo variabile, in cui viene regolata l'apertura e la chiusura di ogni singolo ugello in base alla presenza o assenza della parete vegetativa.

L'attuazione del rateo variabile è garantita dalla presenza di una scheda controllore, comandata dalla scheda principale *Raspberry*, deputata al controllo delle 14 elettrovalvole, ognuna delle quali regola l'apertura dell'ugello, permettendo così ad ogni elemento di lavorare indipendentemente l'uno dall'altro.

### 3.1.2 Atomizzatore Smart Synthesis Hybrid

Il nuovo macchinario per la distribuzione degli agrofarmaci, oggetto del caso di studio è un atomizzatore Smart Synthesis Hybrid, prodotto dalla ditta Caffini (Figura 3-5) (Tabella 2).



**Figura 3-5 Atomizzatore Caffini**

È anch'esso trainato, con torretta a distribuzione tangenziale verticale. Il trattore utilizzato è della ditta Landini, modello REX 120 GT, della potenza motore di 83kW.

**Tabella 2 Specifiche tecniche atomizzatore Smart Synthesis Hybrid Caffini**

Capacità cisterna	1000 litri
Diametro ventola	700:800 mm
Miscela distribuita	100:140 l/min

È dotato di una trasmissione elettrica autonoma, con un generatore a 400 v, collegato al trattore dallo stesso cardano che aziona la pompa. Questa soluzione garantisce la possibilità di variare il numero di giri del motore elettrico del ventilatore in modo continuo, ma senza variare i numeri di giri del motore del trattore.

Il ventilatore funziona elettricamente con regime di rotazione modulato in continuo lungo l'avanzamento in funzione della densità della vegetazione rilevata con sensori ad ultrasuoni installati sulla macchina.

La macchina operatrice di precisione è provvista di due sensori che provvedono alla misurazione della pianta e della massa vegetativa per adeguare in tempo reale la velocità dell'aria.

Sono stati inoltre montati sull'atomizzatore dei getti Pulse Width Modulation (PWM), con apertura a frequenza variabile, per il controllo del flusso del prodotto fitosanitario e che permettono di distribuire il prodotto solo dove è presente la vegetazione.

La modulazione PWM è un segnale in grado di regolare la tensione in uscita a partire da una sorgente in corrente continua, con lo scopo di far funzionare un dispositivo ad un valore minore della sua alimentazione standard ed il vantaggio di questa tecnologia consiste in una drastica riduzione di potenza dissipata, con una maggiore efficienza del sistema.

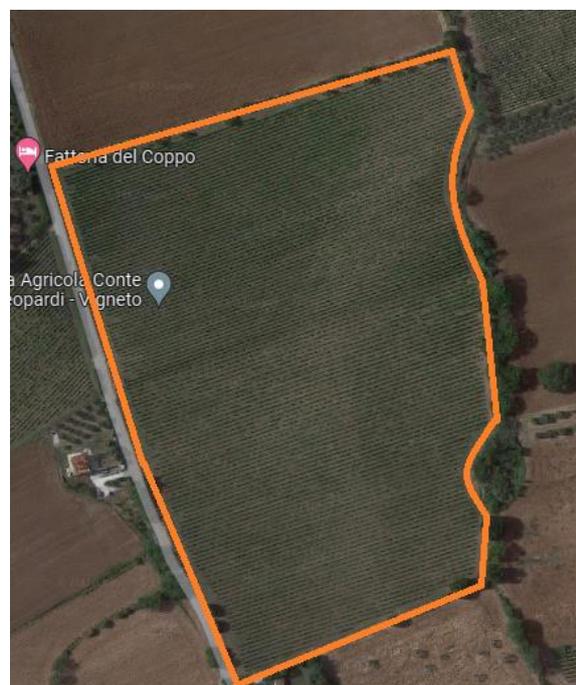
L'integrazione dei getti PWM viene gestita da centraline CAN e permette di variare sia il volume di aria prodotto dal ventilatore, sia il volume del liquido distribuito, in tempo reale, ma senza variare la dimensione delle gocce. Quindi, sfruttando la possibilità di usare mappe di prescrizione, è in grado di erogare trattamenti mirati, con la capacità di ridurre il consumo dei prodotti fitosanitari, il consumo di carburante, il livello di rumorosità della macchina e soprattutto una sensibile riduzione della deriva, con un minore impatto ambientale.

### 3.2 Dati in campo

L'acquisizione dei dati di campo è stata eseguita il 27 luglio 2023 in un appezzamento vitato di 8,5 ha, situato nel comune di Sirolo, località Coppo (43.50201, 13.59417) di proprietà dell'Azienda Agricola Conte Leopardi, gestita da Terre Cortesi Moncaro.

Il vigneto (Figura 3-6) è allevato su un versante collinare con esposizione Nord-Est / Sud-Ovest.

La prova ha interessato sei filari, dei quali due trattati con la metodologia standard, due con il sistema lidar e due con il macchinario Caffini.



**Figura 3-6 Localizzazione vigneto oggetto di studio**

### 3.2.1 Fase preliminare: mappatura filari

Preliminarmente alla fase di acquisizione dei dati di distribuzione (precisamente il 23 maggio 2023) è stata effettuata una mappatura dei filari in campo.

Per il disegno sperimentale, sono stati scelti due filari per il trattamento standard, due per il LiDAR e due per il Caffini.

Il primo passo dell'esperimento è la mappatura dei filari selezionati per ogni tipologia di trattamento, riportando su un foglio di lavoro la situazione reale, cioè, annotare la presenza o assenza della vite e la posizione dei pali (Figura 3-7).

Numero filare: 19 Caffini												
V	V	1 X	V	V	X	2 X	V	X	3 X	V	V	
V	Vuoti											
X	Pieni											
I	Palo											

**Figura 3-7 Foglio di lavoro per la mappatura di un filare**

Si è proceduto, poi, all'analisi dei dati raccolti per individuare e contrassegnare le piante con la posizione più centrale nell'interpalo. L'analisi e il confronto dei dati ottenuti hanno permesso di scegliere il filare destinato allo studio dei trattamenti sui pieni (presenza di vegetazione) e quello per i vuoti (assenza di vegetazione). La scelta del filare destinato allo studio sui pieni, si è basata sulla presenza di un maggior numero di piante in posizione centrale nell'interpalo e lungo la fila.

Infine, è stato posto un nastro stradale sulle piante selezionate e un cartellino sul filo di banchina con la dicitura P-C 1, P-C 2, ecc..., quindi sono state codificate da una sequenza alfa numerica precedentemente definita, in base al tipo di trattamento (C= Caffini) e numero progressivo della pianta.

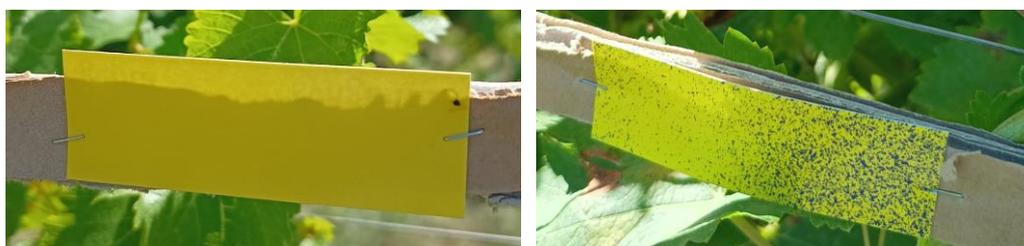
Questo campionamento è stato eseguito per il macchinario Caffini, mentre per gli altri due era già stato effettuato negli anni precedenti.

### 3.2.2 Fase esecutiva: test in campo

L'obiettivo è verificare l'efficienza e il funzionamento dei due dispositivi, entrambi con la capacità di interrompere l'erogazione nei punti vuoti lungo il filare ed al termine del filare stesso, confrontati con un'irrorazione effettuata con il metodo standard.

I trattamenti sono stati eseguiti ad una velocità di circa 6 km/h, 1500 giri/minuto e con la prima marcia veloce.

Per valutare la qualità dei trattamenti sono state utilizzate delle cartine idrosensibili delle dimensioni di 76 x 26 mm della di Syngenta che presentano la capacità di colorarsi con l’impatto di ogni singola goccia di soluzione irrorata (Figura 3-8), permettendo di verificare direttamente il livello e la qualità della bagnatura nelle zone di vegetazione dove sono state



**Figura 3-8 Cartina idrosensibile pre e post trattamento**

posizionate.

Ciascuna cartina è stata nominata secondo un codice alfanumerico riportato sul retro (Tabella 3 e 4).

**Tabella 3 Codifica cartine: posizione e tipologie di trattamento**

Posizione della cartina	Trattamento Standard	Trattamento LiDAR	Trattamento Caffini
Vegetazione / pieno	S	L	C
Fallanza / vuoto	SV	LV	CV

**Tabella 4 Codifica cartine: numerazione**

Trattamento	N° progressivo rilievo	Posizione sul filo
S; SV; L; LV; C; CV	Da 5 a 35	1: filo basso 2: filo intermedio 3: filo alto

Per agevolare ed uniformare il posizionamento delle cartine sono stati utilizzati dei telai in legno provvisti di tre strisce orizzontali di cartone posizionate all’altezza dei fili.

Su ogni striscia è stata apposta, mediante punti metallici per cucitrici, una cartina.

Ogni telaio è stato agganciato al filo superiore posizionato in corrispondenza delle piante precedentemente selezionate (Figura 3-9).



*Figura 3-9 Telaio per cartine*

L'operatore ha provveduto all'irrorazione del filare e dopo un tempo di 5-10 minuti necessario per l'opportuna asciugatura, le cartine sono state rimosse e sistemate all'interno di una busta in plastica, lasciata aperta per favorire l'areggiamento per evitare possibili ristagni di umidità che avrebbero ulteriormente impressionato la cartina, alterando i risultati.

I telai sono stati spostati nel filare adiacente e agganciati in corrispondenza delle fallanze e sono state nuovamente apposte delle cartine ed eseguito un nuovo passaggio con l'atomizzatore.

Queste operazioni sono state eseguite per il trattamento Standard, LiDAR e Caffini (Figura 3-10).



*Figura 3-10 Trattamento con atomizzatore*

### 3.3 Elaborazione dati

Le cartine idrosensibili, dopo essere state rimosse dal campo, sono state portate in laboratorio e poste in stufa a ventilazione forzata ed a convezione naturale ad una temperatura di 30° C, per stabilizzarle.

#### 3.3.1 *Acquisizione digitale delle immagini*

In laboratorio l'acquisizione delle immagini per la digitalizzazione è avvenuta mediante



**Figura 3-11** *Macchina fotografica*

l'utilizzo di una fotocamera Canon EOS 2000D (Figura 3-11), macchina reflex digitale monobiettivo dotata di sensore CMOS per i minimi dettagli con circa 24,1 megapixel effettivi, processore DIGIC 4+, area di messa a fuoco automatica con 9 punti AF ad alta precisione e velocità. La fotocamera è sistemata su una "light box" (Figura 3-12) provvista di un supporto mobile (Figura 3-13) dove sono state posizionate

le cartine di volta in volta, in modo da mantenere sempre la stessa posizione e due lampade che permettono un'illuminazione uniforme, senza ombre.



**Figura 3-13** *Light box*



**Figura 3-12** *Supporto per cartine*

### 3.3.2 Elaborazione immagini con Inkscape

Le immagini acquisite dalla fotocamera (Figura 3-14) sono state salvate nel formato CR2 e poi in post-produzione, convertite nel formato .jpg, estensione di Jpeg (Joint Photographic



**Figura 3-14** *Acquisizione dati*

Experts Group, dall'associazione internazionale che ha standardizzato il formato). Infatti, benché questo formato sia il più utilizzato per la memorizzazione di informazioni sulle immagini, ha il difetto di essere un file di grafica Raster o bitmap. Le immagini sono composte da una griglia di pixel, chiamati anche celle, disposte su un piano ed hanno un uso più limitato rispetto a quelle vettoriali.

Per rendere i file utilizzabili dal software scelto per il post-processamento, QGIS, ogni immagine memorizzata in formato .jpg è stata processata con il software Inkscape, dove è stata ritagliata con una maschera di dimensione nota e vettorializzata. A questo punto è stata eliminata la foto originaria e ci si è concentrati su quella vettorializzata che è stata salvata in formato .dxf (Drawing Exchange Format). Il procedimento è stato messo a punto nei lavori di tesi precedenti (Tiffi Maggi, 2021 e Centorame 2022).

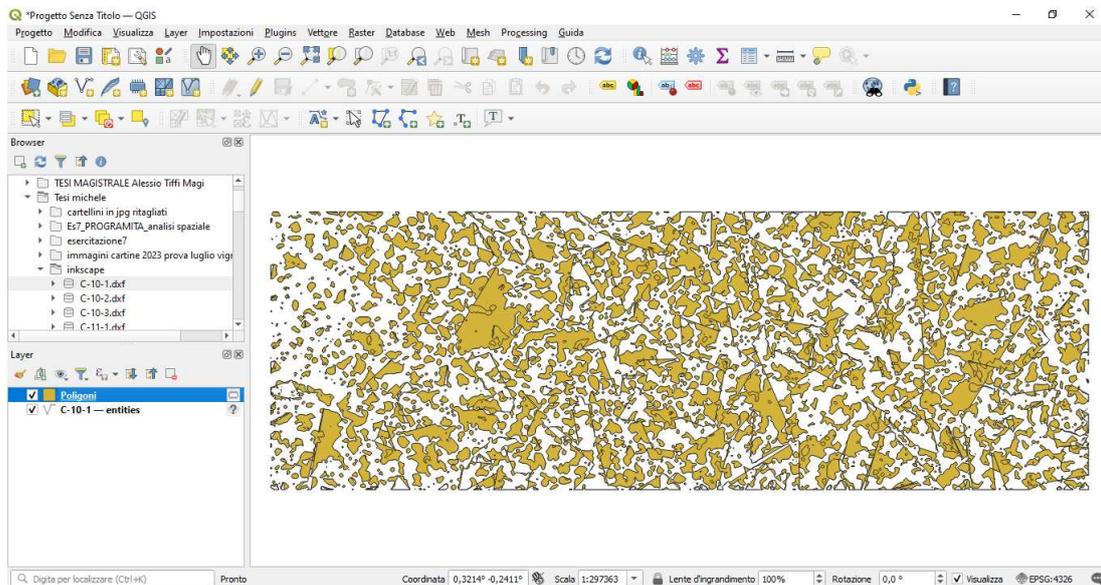
I file .dxf sono nati per condividere i disegni tra le applicazioni di CAD ed oggi rappresentano il formato standard per lo scambio di disegni tra programmi.

### 3.3.3 Analisi dei dati

I file una volta convertiti sono stati caricati su QGIS, software GIS (Geographic Information System), che permette di analizzare, gestire, modificare dati e comporre mappe, scelto perché è open source, ma supportato da una community di sviluppatori che contribuiscono al miglioramento dei tools disponibili e fungono da supporto per la risoluzione di problemi che possono sorgere durante l'utilizzo.

I file .dxf caricati nel software vengono trasformati in shapefile (.shp), cioè in un formato vettoriale di registrazione di identità geometriche e delle loro informazioni associate, per sistemi informativi geografici e per permettere il supporto degli strumenti di calcolo vettoriale.

Quindi l'utilizzo di un algoritmo QGIS, presente sulla barra degli strumenti, (strumenti di geometria: da linee a poligoni), ha permesso la trasformazione di ciascun file vettoriale costituito da linee chiuse, in file di tipo poligonale (Figura 3-15), con la possibilità di ottenere i dati di interesse. Il risultato finale comporta una serie di shapefile con tutti i poligoni pieni dello shapefile di contorni originale.



**Figura 3-15 Elaborazione dati con QGIS**

Alla fine di questa elaborazione sono stati ottenuti il numero di poligoni all'interno di ogni immagine, l'area di ciascun poligono e l'area totale della cartina.

I dati così ottenuti sono stati copiati su un foglio di lavoro di Microsoft Excel ed utilizzati per il procedimento successivo.

### 3.3.4 Analisi statistica

Utilizzando i dati ottenuti dall'elaborazione di QGIS e caricati su Excel si è proceduto all'utilizzo del programma Minitab (Data Analysis, Statistical & Process Improvement Tools), un programma statistico completo, data -driven e di valore.

I dati copiati dai fogli di lavoro Excel, suddivisi per trattamenti effettuati su vegetazione e su vuoti e per tipologia di macchinario: standard, LiDAR e Caffini, sono stati sottoposti al Normality Test Shapiro- Wilk (Tabella 5) e si è visto che non è normale.

**Tabella 5 Test Shapiro- Wilk**

Macchinari e tipologia di trattamento	N. rilevamenti	Mediana	Range interquartile	p di Shapiro-Wilk
C	90	29,07	16.9 - 35.9	<0.001
CV	90	20,90	14.0 - 30.8	0.002
L	90	23,82	12.7 - 29.8	0.010
LV	90	17,51	6.8 -24.2	0.014
S	90	31,58	24.5 - 34.9	<0.001
SV	90	30,80	24.4 - 34.0	<0.001
<b>Totale</b>	<b>540</b>	<b>25,61</b>	<b>15.5 – 33.4</b>	<b>&lt;0.001</b>

Infatti, la significatività “p” del test Shapiro- Wilk è sempre inferiore a 0,05, il che significa che viene rifiutata l’ipotesi di normalità della distribuzione della variabile copertura. Quindi si è ritenuto opportuno l’utilizzo di test non parametrici per andare ad approfondire dei legami con altre variabili, e per rappresentare i suoi dati di sintesi è consigliabile la mediana, mentre come indice di dispersione il range interquartile. La mediana rappresenta il punto dove la distribuzione ordinata dei valori arriva per la prima volta al 50% di frequenza cumulata, mentre il range interquartile riporta i valori del primo e del terzo quartile della distribuzione, ovvero il 25% e il 75% di frequenza cumulata. Per ogni tipologia di macchinario e distribuzione, è anche riportato il numero di rilevamenti e si può vedere che il campione è equamente distribuito.

Per studiare l’ipotesi nulla in cui la distribuzione delle percentuali di copertura sia la stessa in tutte le sei tipologie di trattamento, è stato deciso di applicare il test non parametrico di Kruskal-Wallis (William Kruskal e W.Allen Wallis), il quale evidenzia di rifiutare questa ipotesi, in quanto sembrerebbe esserci una differenza significativa tra le tipologie di macchinario e distribuzione (  $p < 0,001$ ) (Tabella 6).

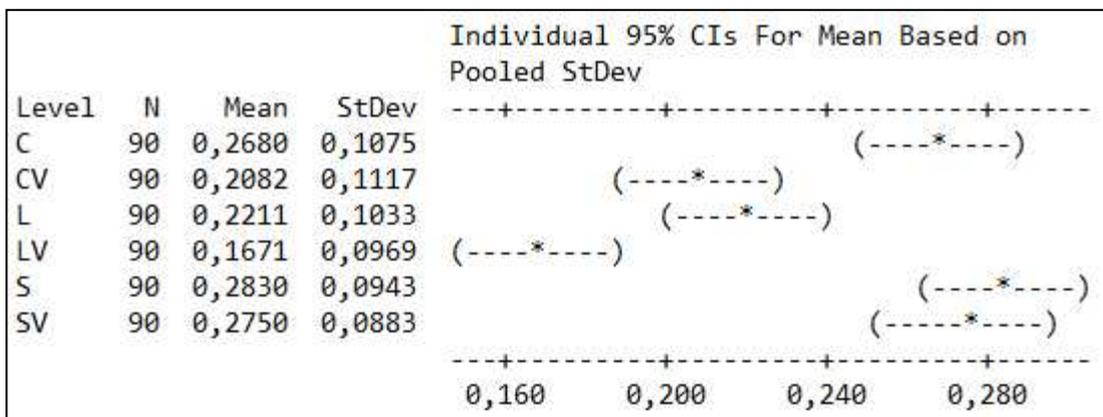
**Tabella 6 Test Kruskal-Wallis**

<b>Test non parametrici</b>			
<b>Ipotesi nulla</b>	<b>Test</b>	<b>p</b>	<b>Decisione</b>
La distribuzione della % di copertura è la stessa nelle categorie di macchinari	Test di Kruskal-Wallis per campioni indipendenti	0.001	Rifiuto l'ipotesi nulla

Si è poi proceduto ad effettuare i test post-hoc, utilizzati per valutare le differenze tra più gruppi evitando gli errori dovuti all'esperimento.

È stato eseguito il test di Tukey che si pone l'obiettivo di determinare se il campione è composto da gruppi omogenei che differiscono tra loro. Ogni media viene confrontata con la media di tutti gli altri gruppi, utilizzando la "Honest Significant Difference", che rappresenta la distanza tra i gruppi.

Sono state, quindi compilate, le tabelle finali che riassumono i dati, mostrando le medie per i gruppi sistemati in campioni omogenei (Figura 3-16 e 3-17).



**Figura 3-16 Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev**

tesi	N	Mean	Grouping
S	90	0,2830	A
SV	90	0,2750	A
C	90	0,2680	A
L	90	0,2211	B
CV	90	0,2082	B C
LV	90	0,1671	C

**Figura 3-17 Grouping Information Using Tukey Method**

## Capitolo 4

### DISCUSSIONI

Le informazioni per gruppi, scaturite dall'utilizzo del Test Tukey, mostrano che i trattamenti eseguiti utilizzando l'atomizzatore Standard sia su vegetazione (S), che sui vuoti (SV), sia quelli con il macchinario Caffini su vegetazione (C), possono essere compresi nello stesso gruppo, mostrando percentuali medie di copertura molto simili.

Il trattamento con il macchinario LiDAR su vegetazione (L) può essere considerato sia da solo, che insieme al trattamento Caffini su vuoti (CV).

Per le stesse considerazioni anche il Caffini su vuoti (CV) e il LiDAR su vuoti (LV) sono statisticamente affini. Quindi è possibile desumere che CV ed LV appartenendo alla stessa popolazione, il sistema di controllo mediato dal LiDAR e quello mediato da ultrasuoni sono entrambi in grado di limitare la distribuzione in presenza di fallanze.

In ultimo solo il LiDar su vuoti (LV) può essere raggruppato da solo, mostrando una percentuale media di copertura più bassa rispetto a tutte le altre tipologie di trattamento.

Ovviamente per definizione, ognuno dei sottogruppi non ha differenze significative al suo interno, ma ne ha con gli altri gruppi.

## CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi si è proposto come obiettivo l'analisi dei risultati ottenuti dall'elaborazioni dei dati raccolti durante un trattamento fitosanitario effettuato in vigneto e il confronto dell'efficacia di distribuzione meccanica con atomizzatore trainato di due diverse tipologie e rapportato a una distribuzione con metodologia Standard.

Soprattutto si è cercato di valutare se l'innovativo atomizzatore Smart Synthesis Hybrid Caffini, funzionante tramite un azionamento elettrico e quindi con la possibilità di rilevare in modo preciso la densità fogliare della vite durante il trattamento e regolare automaticamente il flusso di aria, sia in grado di ottimizzare meglio il deposito del prodotto fitosanitario e di ridurre la miscela distribuita su porzioni di filare con vegetazione assente, confrontandolo con la macchina già presente in azienda, Defender MK2 Turbmatic.

Dall'analisi statistica dei dati è emerso che l'atomizzatore della ditta Caffini è in grado di effettuare una distribuzione in presenza di vegetazione con percentuale media simile ad un atomizzatore standard.

Per quanto riguarda la distribuzione del fitofarmaco mediante i due macchinari dotati di sensoristica, nelle porzioni di filari in assenza di vegetazione, la media mostra che sono in grado di regolare la propria portata, riducendo la bagnatura, quindi con un risparmio di prodotto sia in termini di costo, che di deriva e quindi si integrano perfettamente nella nuova politica ambientale europea, in materia di sostenibilità e qualità.

I dati relativi al Sistema LiDAR, confermano, quindi, ciò che è stato esposto nell'articolo "*Distribution Quality of Agrochemicals for the Revamping of a Sprayer System Based on Lidar Technology and Grapevine Disease Management*", cioè che i test effettuati in vigneto utilizzando lo stesso prototipo, associato ad un atomizzatore, riducono la distribuzione di prodotti fitosanitari, grazie al controllo degli ugelli nei vuoti di vegetazione, e controllano anche le malattie fungine del vigneto (Ilari et al., 2023b).

Dai dati, però, si evince che il Caffini ha una distribuzione media superiore di circa il 4% nei confronti del LiDAR.

Quindi è possibile concludere, che in un'azienda che presenta già nel proprio parco macchine un atomizzatore che consente una distribuzione di prodotti in “real-time” attraverso l'analisi dei dati relativi alla copertura fogliare e distinguendo zone con assenza o presenza di copertura fogliare e quindi variare la dose irrorata, questa nuova tipologia di macchinario non aggiunge qualità a quanto già esistente.

Inoltre, visto l'ingente investimento finanziario necessario all'acquisto dell'atomizzatore Caffini, in molti casi è preferibile economicamente adattare un kit LiDAR ad un atomizzatore standard già presente nel parco macchine aziendale.

## BIBLIOGRAFIA

- Aagaard, A., Berny, P., Chaton, P. F., Antia, A. L., McVey, E., Arena, M., Fait, G., Ippolito, A., Linguadoca, A., Sharp, R., Theobald, A., & Brock, T. (2023). Risk assessment for Birds and Mammals. *EFSA Journal*, *21*(2). <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.7790>
- Abbas, I., Liu, J., Faheem, M., Noor, R. S., Shaikh, S. A., Solangi, K. A., & Raza, S. M. (2020). Different sensor based intelligent spraying systems in Agriculture. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *316*. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112265>
- Agricultural industry electronics foundation. (2015). *Powering Agricultural Electronics*.
- Alessandra Biondi Bartolini. (2013). *Virtuose e intelligenti. Le irroratrici del futuro*. <https://terraevita.edagricole.it/nova/nova-agrofarmaci-difesa/virtuose-e-intelligenti-le-irroratrici-del-futuro/>
- Ambiente delle Nazioni Unite. (2019). *GLOBAL ENVIRONMENT OUTLOOK GEO-6 HEALTHY PLANET, HEALTHY PEOPLE*. [file:///C:/Users/Utente/Downloads/GEO6\\_2019.pdf](file:///C:/Users/Utente/Downloads/GEO6_2019.pdf)
- Andrée Carter. (2014). How pesticides get into water - And proposed reduction measures. *Pesticide Outlook*, *11*(4), 149–156. <https://doi.org/10.1039/b006243j>
- Autorità europea per la sicurezza alimentare. (2023). *Pesticidi*. <https://www.efsa.europa.eu/it/topics/topic/pesticides>
- Businelli Mario. (2009). *Chimica del suolo*. Morlacchi editore.
- Cai, J. C., Wang, X., Song, J., Wang, S. L., Yang, S., & Zhao, C. J. (2017). Development of real-time laser-scanning system to detect tree canopy characteristics for variable-rate pesticide application. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, *10*(6), 155–163. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20171006.3140>
- Casa e Sartori. (2015). *Linee guida per lo sviluppo dell'agricoltura di precisione in Italia*.
- CERVIM. (2020). *Progetto Scorpion*. <https://www.cervim.org/progetti/elenco-progetti/progetto-scorpion-programma-horizon-2020>
- Cima easy farm. (2023).
- Coldiretti. (2021). *La nuova PAC*.

- Commissione Europea. (n.d.). *Pesticidi e protezione fitosanitaria*. Retrieved June 14, 2023, from [https://agriculture.ec.europa.eu/sustainability/environmental-sustainability/low-input-farming/pesticides\\_it](https://agriculture.ec.europa.eu/sustainability/environmental-sustainability/low-input-farming/pesticides_it)
- Commissione Europea. (2019). *Il Green Deal europeo*. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>
- Commissione Europea. (2020a). *I dieci obiettivi chiave*.
- Commissione Europea. (2020b). *Strategia dell'UE sulla biodiversità per il 2030*. <https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs>
- Commissione Europea. (2022). *Regolamento del Parlamento Europeo e del Consiglio*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022PC0305&from=EN>
- Confagricoltura Rovigo. (2023). *La condizionalità rafforzata per la PAC 2023, stabilito il quadro normativo*. <http://www.confagricolturaro.it/confagricoltura-informa/tecnico/pac-e-psr/la-condizionalita-rafforzata-per-la-pac-2023-stabilito-il-quadro-normativo/>
- Daglio, G., Cesaro, P., Todeschini, V., Lingua, G., Lazzari, M., Berta, G., & Massa, N. (2022). Potential field detection of Flavescence dorée and Esca diseases using a ground sensing optical system. *Biosystems Engineering*, 215, 203–214. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.01.009>
- Davide Misturini. (2020). *Precision Farming* (Edagricole, Ed.).
- Decisione (UE) 2022/2572 Del Consiglio*. (2022).
- Doruchowski, G., & Holownicki, R. (2000). *Environmentally friendly spray techniques for tree crops*.
- Fabian Capitano, S. C. A. delle M. M. D. R. T. D. G. G. L. M. S. L. S. L. P. M. I. M. L. P. (2022). *La nuova PAC 2023-2027*.
- Food And Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *TRANSFORMING FOOD AND AGRICULTURE TO ACHIEVE THE SDGs 20 interconnected actions to guide decision-makers*.
- Food And Agriculture Organization of the United Nations. (2023). Europe and Central Asia – Regional Overview of Food Security and Nutrition 2022. In *Europe and Central Asia – Regional Overview of Food Security and Nutrition 2022*. FAO; IFAD; WMO; WHO; UNICEF; UN; WFP; <https://doi.org/10.4060/cc4196en>

- Food And Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). *Alimentazione e agricoltura sostenibili*. Retrieved May 18, 2023, from <https://www.fao.org/sustainability/background/en/>
- Francesco Barracu. (2012). *Variabilità spaziale e temporale di parametri applicati alla Precision Farming in risicoltura*.
- Gazzetta ufficiale dell'Unione europea. (2009). *Direttiva 2009/127/CE*.
- Georgios Amanatidis, & Nicoleta Lipcaneanu. (2023). *Sostanze chimiche e pesticidi*. <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/78/sostanze-chimiche-e-pesticidi>
- Giacomo Picone. (2016). *Il corretto impiego dei prodotti fitosanitari*.
- Iacopo Bianconi. (2018). *IL COSTO DELLE MACCHINE AGRICOLE NELL'AGRICOLTURA DI PRECISIONE APPLICATA AI SEMINATIVI*.
- Ilari, A., Piancatelli, S., Centorame, L., Moumni, M., Romanazzi, G., & Foppa Pedretti, E. (2023a). Distribution Quality of Agrochemicals for the Revamping of a Sprayer System Based on Lidar Technology and Grapevine Disease Management. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/app13042222>
- Ilari, A., Piancatelli, S., Centorame, L., Moumni, M., Romanazzi, G., & Foppa Pedretti, E. (2023b). Distribution Quality of Agrochemicals for the Revamping of a Sprayer System Based on Lidar Technology and Grapevine Disease Management. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/app13042222>
- Innovarurale. (2018). *Rovitis 4.0-Gruppo operativo per la diffusione di robot autonomo connesso a DSS per la gestione sostenibile ed efficiente del vigneto*. <http://www.youtube.com/watch?v=MbOpgPHiwUA>
- International Organization for Standardization. (2005). *Equipment for crop protection — Methods for field measurement of spray drift*. <https://www.iso.org/standard/35161.html>
- Johanna Bar. (2023). *Atlante dei pesticidi*. <https://fr.boell.org/sites/default/files/2023-01/atlante-dei-pesticidi-web.pdf>
- La gestione «precisa» parte dallo studio della variabilità*. (2015).
- Lorenzo Benvenuti Luigi Sartori. (2008). *Precision agriculture: advances in vegetable production*.
- Lorenzo Quadri. (2023). Atomizzatori in vigneto, le tecnologie per ridurre gli sprechi. *AgroNotizie*. <https://agronotizie.imagelinenetwork.com/agrimeccanica/2023/05/04/atomizzatori-in-vigneto-le-tecnologie-per-ridurre-gli-sprechi/78769>

- Luana Centorame. (2022). *VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DI UN AGROCHEMICALS' DISTRIBUTION*.
- Lucidi, G. (2021). *E SVILUPPO SOSTENIBILE AGRICOLTURA PAGINA MONOGRAFICA*.
- Masciarelli, Eva., & INAIL. (2018). *Usa in sicurezza dei prodotti fitosanitari: schede tecnico-informative*. INAIL.
- Mastrolab. (n.d.). *SISTEMA BREVETTATO PER LA MISCELAZIONE IN LINEA DI PRODOTTI FITOSANITARI E FERTILIZZANTI SOLIDI E LIQUIDI*.  
www.mastrolab.it
- Ministero della Salute. (2017). *Misure di mitigazione del rischio per la riduzione della contaminazione dei corpi idrici superficiali da deriva e ruscellamento*.
- Mishra, S., Singh, S. P., Kumar, P., Khan, M. A., & Singh, S. (2023). Emerging electrochemical portable methodologies on carbon-based electrocatalyst for the determination of pharmaceutical and pest control pollutants: State of the art. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1).  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109023>
- Mizik, T. (2023). How can proximal sensors help decision-making in grape production? *Heliyon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16322>
- Montanarella, L., & Panagos, P. (2021). The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal. *Land Use Policy*, 100.  
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104950>
- Naguib, N. S., & Daliman, S. (2022). Analysis of NDVI and NDRE Indices Using Satellite Images for Crop Identification at Kelantan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1102(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1102/1/012054>
- Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Alimentazione e l'Agricoltura. (2023). *Un nuovo rapporto delle Nazioni Unite esamina lo stato della sicurezza alimentare e della nutrizione in Europa e Asia centrale e dà indicazioni per una dieta più accessibile e sostenibile*. <https://www.fao.org/newsroom/detail/new-un-report-focuses-on-food-security-and-nutrition-in-europe-and-central-asia-points-way-towards-more-affordable-and-sustainable-diets/it>
- Parlamento Europeo. (2005). *Regolamento (CE) n.396/2005 del Parlamento europeo e del Consiglio*.
- Parlamento Europeo. (2009). *Regolamento (CE) N. 1107/2009 del Parlamento Europeo e del Consiglio*.

- Parlamento europeo. (2022). *Politica ambientale dell'UE per il 2030: un cambiamento sostanziale*. [https://multimedia.europarl.europa.eu/en/timeline-european-climate-action\\_N01-AFPS-210617-CLAW\\_ev](https://multimedia.europarl.europa.eu/en/timeline-european-climate-action_N01-AFPS-210617-CLAW_ev)
- Parlamento europeo e Consiglio. (2018). *Orizzonte Europa*.
- Pasquale Daponte. (2019). A review on the use of drones for precision agriculture. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 275(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/275/1/012022>
- Paul, K., Chatterjee, S. S., Pai, P., Varshney, A., Juikar, S., Prasad, V., Bhadra, B., & Dasgupta, S. (2022). Viable smart sensors and their application in data driven agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107096>
- Pierce', F. J., & Nowak, P. (1999). *ASPECTS OF PRECISION AGRICULTURE*.
- Progetto life perfect*. (n.d.). Retrieved June 24, 2023, from <https://perfectlifeproject.eu/it/progetto-life-perfect/>
- Raffaele Casa. (2016). *Agricoltura di Precisione. Metodi e tecnologie per migliorare l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali* (Edagricole, Ed.).
- Raj, T., Hashim, F. H., Huddin, A. B., Ibrahim, M. F., & Hussain, A. (2020). A survey on LiDAR scanning mechanisms. In *Electronics (Switzerland)* (Vol. 9, Issue 5). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/electronics9050741>
- Regolamento delegato (UE) 2023/707 della Commissione*. (2022). <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/>
- Rete Rurale Nazionale. (2022). *SRA24-ACA24-pratiche agricoltura di precisione*.
- Rimediotti, T. M., & Vieri, M. (2009). *Effetto deriva e possibile riduzione delle perdite aeree nella distribuzione dei fitofarmaci*.
- Rivera, G., Porras, R., Florencia, R., & Sánchez-Solís, J. P. (2023, April 1). LiDAR applications in precision agriculture for cultivating crops: A review of recent advances. *Computers and Electronics in Agriculture*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107737>
- Rossel, R. A. V., & Behrens, T. (2010). Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma*, 158(1–2), 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.12.025>
- Simone Gatto. (2013). *Applicazione delle tecnologie di Agricoltura di Precisione nella coltivazione del Mais in una azienda cerealicola-zootecnica*.

- Simone Papi. (2018). Agricoltura di precisione. Sensori applicati alle operazioni meccanizzate. In 2019.
- SRA19 ACA 19 Riduzione impiego fitofarmaci.* (n.d.).
- Unione europea. (2021). *Regolamento (UE) 2021/2115 del Parlamento Europeo e del Consiglio.*
- United Nations. (2015). *Assemblea Generale.*
- Uso sostenibile prodotti fitosanitari.* (2014). [www.roundup.it](http://www.roundup.it)
- Viscarra Rossel, R. A., Adamchuk, V. I., Sudduth, K. A., McKenzie, N. J., & Lobsey, C. (2011). Proximal Soil Sensing: An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time. In *Advances in Agronomy* (Vol. 113, pp. 243–291). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386473-4.00005-1>
- Xu, A., Wang, F., & Li, L. (2023). Vegetation information extraction in karst area based on UAV remote sensing in visible light band. *Optik*, 272. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170355>