DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE AGRARIE E DEL TERRITORIO

VALUTAZIONE DELLA FUNZIONALITÀ DI DISTRIBUZIONE DI UN ATOMIZZATORE INNOVATIVO

Performance evaluation of an innovative sprayer

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
ALESSIO TIFFI MAGI

Relatore:
PROF.SSA ESTER FOPPA PEDRETTI

Correlatore:
DOTT. ALESSIO ILARI

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE 4

ELENCO DELLE FIGURE 5

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI 7

CAPITOLO 1 DISTRIBUZIONE DEI FITOFARMACI IN VIGNETO 11

1.1 Problematiche relative alla distribuzione 11

1.2 Agricoltura di precisione e ottimizzazione dei trattamenti 12

1.3 Macchine e dispositivi attualmente esistenti 14

1.3.1 Sistemi a controllo fisico 14

1.3.2 Sistemi a ultrasuoni 16

1.3.3 Sistemi LiDAR 19

CAPITOLO 2 MATERIALI E METODI 23

2.1 Caso di studio 23

2.2 Rilievi in campo 26

2.2.1 Mappatura del vigneto 27

2.2.2 Verifica della distribuzione del prodotto fitosanitario durante il trattamento 28

2.3 Analisi dei rilievi di campo 32

2.3.1 Preparazione del sistema di acquisizione dati 32

2.3.2 Acquisizione ed analisi dati 33

2.3.3 Analisi statistica 34

CAPITOLO 3 RISULTATI 36

3.1 Risultati primo rilevamento 36

3.2 Risultati secondo rilevamento 39

CAPITOLO 4 DISCUSSIONI 43

CONCLUSIONI 46

BIBLIOGRAFIA 48

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 2-1: Codifica cartine: posizione e tipologie di trattamento 30
Tabella 2-2: Codifica cartine: numerazione 30
Tabella 3-1: Risultati 1° rilevamento: Percentuale copertura cartine 37
Tabella 3-2: Risultati 1° rilevamento: tabella riassuntiva 37
Tabella 3-3: Risultati Anova 1° rilevamento: confronto tra pieni del LiDAR (L) e pieni dello Standard (S) 38
Tabella 3-4: Risultati Anova 1° rilevamento: confronto tra Vuoti del LiDAR (VL) e Vuoti dello Standard (VS) 38
Tabella 3-5: Risultati Anova 1° rilevamento: confronto tra pieni del LiDAR (L) e Vuoti del LiDAR (VL) 38
Tabella 3-6: Risultati 2° rilevamento: percentuale copertura cartine 40
Tabella 3-7: Risultati 2° rilevamento: tabella riassuntiva 41
Tabella 3-8: Risultati Anova 2° rilevamento: confronto tra pieni del LiDAR (L) e pieni dello Standard (S) 41
Tabella 3-9: Risultati Anova 2° rilevamento: confronto tra Vuoti del LiDAR (VL) e Vuoti dello Standard (VS) 41
Tabella 3-10: Risultati Anova 2° rilevamento: confronto tra pieni del LiDAR (L) e Vuoti del LiDAR (VL) 41

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 2-1: Piano di acquisizione dati del LiDAR 24
Figura 2-2: Schema di funzionamento del dispositivo di misura inerziale 25
Figura 2-3: Macchina Operatrice oggetto di studio 26
Figura 2-4: Sistema di acquisizione ed elaborazione dati (sx); attuatori del rateo-variabile (dx) 26
Figura 2-5: Ripartizione del vigneto oggetto di studio 27
Figura 2-6: Mappatura del vigneto oggetto di studio 28
Figura 2-7: Disegno sperimentale 29
Figura 2-8: Cartina posizionata sulla vegetazione prima e dopo il trattamento 30
Figura 2-9: Esempio di codice riportato sul retro di una cartina 31
Figura 2-10: Successione di fotogrammi relativi al trattamento gestito con LiDAR 31
Figura 2-11: Postazione di acquisizione dati 33

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

L'agricoltura è considerata al centro della strategia di sviluppo sostenibile (Zezza & Henke, 2018): rispondere alle esigenze del presente senza compromettere le prospettive di crescita delle generazioni future è ormai imperativo viste le azioni intraprese a livello globale.

A tal fine, in Europa, il programma di maggior importanza è l'Horizon Europe: Programma Quadro dell'Unione Europea per la ricerca e l'innovazione per il periodo 2021-2027 (successore dell'Horizon 2020). Con una dotazione finanziaria complessiva di 95,5 miliardi di euro, è il più vasto programma di ricerca ed innovazione transnazionale nel mondo. L'obiettivo generale è quello di ottenere un impatto scientifico, tecnologico, economico e sociale dagli investimenti dell'UE in ricerca e innovazione, in modo da: rafforzare le basi scientifiche e tecnologiche dell'Unione e promuovere la sua competitività in tutti gli stati membri; attuare le proprietà strategiche dell'Unione e concorrere alla realizzazione delle politiche europee, contribuendo a fronteggiare le sfide globali del nostro tempo, enunciate dagli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs) dell'Agenda 2030 dalle Nazioni Unite e dall'Accordo di Parigi sul clima; rafforzare lo spazio europeo della ricerca.

All'agricoltura viene riconosciuto un ruolo chiave nel raggiungimento degli obiettivi SDGs: dall'alimentazione alla salute, alla conservazione delle risorse e alla lotta al cambiamento climatico, alla lotta contro la povertà. In quest'ottica, l'attenzione si è spostata sensibilmente dall'intensificazione nell'uso degli input al miglioramento della produttività totale delle risorse, spesso definita come intensificazione sostenibile (Garnett, et al., 2013) (Godfay & Garnett, 2014), raggiungibile attraverso l'innovazione tecnologica e la diffusione della conoscenza, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse, incrementando la produttività e riducendo gli impatti ambientali negativi in termini di emissioni, perdita di biodiversità, erosione e contribuendo positivamente alla conservazione delle risorse naturali (Struik & Kuyper, 2017). Il nuovo modello di sviluppo mira a garantire gli stessi standard produttivi ma attraverso una visione più complessa, di sistema di produzione, che includa un uso efficiente delle risorse naturali, la valorizzazione del paesaggio, la tutela ambientale, lo sviluppo rurale e l'equità sociale (McIntyre, et al., 2009) (Godfay, et al., 2010) (Sachs, et al., 2010).

La sfida lanciata dagli SDG è indirizzata anche verso lo sviluppo di politiche internazionali e nazionali che siano in grado di supportare forme più sostenibili di uso del suolo e forme più efficienti di produzioni agricole. Anche la Politica Agricola Comunitaria che sta attraversando in questi anni un processo di rinnovamento e di cambio tra il vecchio ordinamento 2014-2020 ed il nuovo, fa di quanto detto i propri obiettivi strategici.

Fra le azioni volte ad una produzione ed una gestione sostenibile dell'agricoltura si guarda all'adozione di nuove tecniche di produzione, all'uso delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione e alla valorizzazione ed integrazione dei risultati della ricerca.

Considerando i sistemi di produzione agricola esistono varie strategie che possono essere implementate per assicurare un uso razionale delle risorse ed una riduzione delle emissioni inquinanti. Tali pratiche spaziano dalle lavorazioni minime dei suoli, alla lotta integrata, all'agricoltura di precisione (che nella sua essenza consiste nell'applicazione di principi e tecnologie per la gestione della variabilità spazio-temporale associata a tutti gli aspetti della produzione agricola).

In questo contesto si inserisce il lavoro di tesi, attraverso la progettazione di una macchina operatrice "innovativa" per trattamenti fogliari in vigneto.

Il comparto vitivinicolo, oltre ad essere uno dei settori agricoli a più alto reddito, riveste un ruolo di notevole importanza economica nell'ambito dell'agricoltura italiana ed europea ma allo stesso tempo determina anche un impatto molto elevato in termini ambientali. La viticoltura, sebbene rappresenti solamente il 3% della superficie agricola (SAU) europea, utilizza il 65% di tutti i fungicidi impiegati in agricoltura, ovvero 68 mila tonnellate/anno (Assoenologi, 2020). Gli alti margini propri di questo settore, hanno permesso alle aziende vitivinicole, anche di piccole dimensioni, di anticipare l'introduzione dei concetti di agricoltura di precisione, indirizzati con decisione verso la qualità e la sostenibilità, a livelli molto alti. Tematiche, quest'ultime, particolarmente apprezzate dai consumatori che permettono al prodotto finito (vino) di spuntare prezzi più alti sul mercato (Lisci, et al., 2016). Tale approccio fa emergere, però, anche alcune criticità riguardo l'effettiva applicazione di tali tecnologie che spesso sono state adottate per sole questioni di marketing piuttosto che per una razionalizzazione effettiva degli input impiegati.

L'approccio "di precisione" in vigneto può essere esteso a tutte le operazioni colturali. In questo lavoro di tesi ci si soffermerà su ciò che riguarda l'irrorazione con distribuzione a rateo variabile (o sito specifica), distribuzione che interessa per lo più prodotti fitosanitari per trattamenti contro patogeni.

La distribuzione a rateo variabile può essere svolta indirettamente, attraverso l'utilizzo di mappe di prescrizione e sistemi di navigazione e automazione; o in misura diretta, per mezzo di sensori a bordo in grado di rilevare la presenza/assenza del target e capaci di operare in real-time.

Relativamente a quest'ultima categoria, le tipologie di sensori che hanno avuto e stanno avendo maggiore successo e diffusione sono essenzialmente due: i sensori ad ultrasuoni ed i sensori LiDAR (Light Detection And Ranging o laserscanner).

I primi sono quelli da più tempo presenti sul mercato e che, a fronte di un costo contenuto, riescono a dare risultati qualitativamente interessanti (Giles, et al., 1988) (Giles, et al., 1989) (Moltò, et al., 2000) (Moltò, et al., 2001) (Zaman & Salyani, 2004) (Solanelles, et al., 2006) (Gil, et al., 2007) (Balsari, et al., 2008) (Llorens, et al., 2010) (Jeon, et al., 2011) (Gil, et al., 2013), risultati che però variano in precisione e sensibilità al variare delle condizioni climatiche presenti al momento del trattamento e alla distanza dal target e quindi richiedono una costante taratura per operare correttamente; tale operazione è fattibile a livello sperimentale ma diventa di difficile attuazione quando deve essere estesa alle aziende agricole (Jeon, et al., 2011) (Llorenz, et al., 2011). Per questo negli ultimi anni la ricerca si è spostata verso l'utilizzo in ambito agricolo dei sensori LiDAR, che sembrano aggirare tali problematiche.

L'applicazione dei sistemi laser, che ha trovato un valido inserimento ormai da molti anni nei sistemi di gestione della guida delle operazioni meccanizzate ed in ambito forestale, risulta promettente anche quando applicata ad operazioni di distribuzione di agrofarmaci o concimi fogliari. In prima battuta applicati per la definizione delle strutture vegetative e, successivamente, per il controllo diretto di dettaglio della distribuzione di agrofarmaci.

Sull'argomento sono stati prodotti numerosi lavori e dal 2000 si è assistito all'incremento repentino di sperimentazioni. In ambito scientifico internazionale, i gruppi di ricerca maggiormente attivi sono tre: uno in Spagna (Catalogna) molto attivo su LiDAR applicato a frutteti, oliveti e vigneti (Rossel-Polo, et al., 2009) (Palacin, et al., 2007) (Llorens, et al., 2010) (Llorenz, et al., 2011) (Escolà, et al., 2013) ecc.; uno negli Stati Uniti attivo principalmente su ultrasuoni e LiDAR applicati ad agrumi (Wei & Salyani, 2004) (Wei & Salyani, 2005) (Lee & Ehsani, 2008) (Tumbo, et al., 2002) (Chen, et al., 2012) (Chen, et al., 2013) (Liu, et al., 2014) ecc.; uno in Inghilterra focalizzato sull'applicazione LiDAR ai frutteti (Walklate, et al., 1997) (Walklate, et al., 2002) (Walklate & Cross, 2013); ed infine un gruppo italiano del Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali dell'Università Politecnica delle Marche, che sta tuttora conducendo studi riguardo l'utilizzo di un sistema LiDAR in vigneto.

In larga parte gli studi condotti hanno come fine quello di individuare le caratteristiche vegetative delle piante, attraverso la definizione della struttura tridimensionale che rientra solo in un secondo momento come informazione utile a quantificare i volumi di miscele di agrofarmaci da distribuire. In pochi casi l'approccio sperimentale riguarda il controllo diretto di distribuzione (Chen, et al., 2012) (Chen, et al., 2013) (Liu, et al., 2014) (Escolà, et al., 2013). Tra questi ultimi, l'obiettivo principale è la produzione di un prototipo per la distribuzione di antiparassitari a controllo diretto utilizzando diversi dispositivi coordinati da controller computerizzati.

Questo lavoro di tesi si inserisce all'interno del progetto SMART SPRAYER, finanziato dalla Regione Marche attraverso la Misura 16.1 – azione 2 del PSR Marche 2014/2020. Progetto che mette insieme diverse figure professionali: Azienda Agricola Tenute Mattei, Azienda Agricola Ca'Liptra, Azienda Agricola Costadoro, Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Ambientali dell'Università Politecnica delle Marche (partner accademico), ISELQUI Technology S.R.L. (partner tecnologico) e Confagricoltura. L'obiettivo è progettare, costruire e mettere a punto un sistema basato su un laser-scanner, applicabile su un cantiere che effettua trattamenti fogliari in vigneto, in grado di analizzare i dati relativi alla copertura fogliare in "real-time" e di correlare la posizione del mezzo rilevata tramite GPS, con il duplice obiettivo di poter controllare la quantità di prodotto irrorato e di analizzare lo stato del fogliame.

Questo sistema consente di valutare in tempo reale le zone a minore o maggiore copertura fogliare e di conseguenza, variare la dose o addirittura escludere porzioni di filare dall'irrorazione. L'obiettivo è quello di ottimizzare la resa, ridurre la quantità di prodotto distribuito e di acquisire dati utili per monitorare lo stato di salute del vigneto.

Tale progetto si discosta da quanto fatto dai gruppi di ricerca sopracitati, in quanto ha come fine ultimo quello di produrre un sistema economico, funzionale, facile da utilizzare e pronto per essere commercializzato. Finora, infatti, tutta la letteratura scientifica presente fa riferimento a macchine prototipali che utilizzano sensori molto performanti che sono sì funzionali ma che fanno salire enormemente il costo del sistema progettato, rendendone difficile la commercializzazione.

L'obiettivo di questa tesi, nello specifico, è quello di valutare la differenza di distribuzione della miscela di acqua e prodotto fitosanitario irrorata tra il sistema di distribuzione a rateo variabile basato sul LiDAR e il sistema di distribuzione standard.

Capitolo 1
DISTRIBUZIONE DEI FITOFARMACI IN VIGNETO

1.1 **Problematiche relative alla distribuzione**

La distribuzione dei prodotti fitosanitari è una delle operazioni colturali con il maggior rischio di creare inquinamento ambientale, oltre ad essere tra quelle economicamente più onerose. Il fitofarmaco può essere trasportato, in luoghi diversi dal punto di applicazione andando incontro a diversi destini: deriva, volatilizzazione nell'atmosfera con successiva deposizione, lisciviazione nel sottosuolo e nelle acque sotterranee, ruscellamento nei sistemi idrici di superficie (Flury, 1996). Tali processi e fenomeni oltre a rappresentare una perdita economica sono causa di contaminazione ambientale, e vanno evitate (Carter, 2000) (Balsari & Marucco, 2007).

Tra le perdite registrabili nella distribuzione, volatilizzazione, lisciviazione e ruscellamento avvengono conseguentemente al trattamento e sono correlate alle caratteristiche fisico-chimiche del prodotto utilizzato, alla superficie sulla quale si deposita il fitofarmaco (pianta, suolo, corpo idrico, organismo non bersaglio ecc.) e alle condizioni climatiche (temperatura, umidità, intensità del vento, precipitazioni ecc.). Sebbene queste perdite possano arrivare, in condizioni particolari, ad una dissipazione cumulativa di circa il 90% del prodotto distribuito (Bedos, et al., 2002), in normali condizioni di campo, con l'utilizzo di prodotti attualmente registrati che hanno caratteristiche e formulazioni appositamente studiate per arginare tali fenomeni e seguendo quelle che sono le buone pratiche agricole per la distribuzione degli agrofarmaci si attestano cumulativamente in un range tra lo 0,1% e il 10% del prodotto distribuito (Capri, et al., 1999).

Discorso a parte va fatto per la deriva. Con deriva si intende la parte di prodotto fitosanitario che viene trasportato al di fuori della zona irrorata (a distanze anche considerevoli) dall'azione di correnti d'aria durante il trattamento e/o subito dopo (ISO22866, 2005). Tale fenomeno comporta un rischio per la salute delle persone presenti nelle vicinanze (esposizione cutanea e inalazione) e per l'ambiente: contaminazione di aria, acque di superficie, acque sotterranee, suolo, fauna, flora e altre colture (Damalas, 2015) (EPPO, 2003). La deriva risulta influenzata da numerosi fattori che possono essere raggruppati in quattro categorie: attrezzature e tecniche

di applicazione; prodotti fitosanitari e caratteristiche dell'irrorazione; cura e abilità dell'operatore; condizioni ambientali e metereologiche (Hofman & Solseng, E., 2001) (Arvidsson, et al., 2011). Ne risulta che l'intensità delle perdite ad essa relative è ampiamente variabile, secondo alcuni studi può essere compresa tra 30% e 50% (Van den Berg, et al., 1999) fino ad arrivare, in particolati casi, ad oltre il 70% del prodotto distribuito (Balsari & Marucco, 2007).

I trattamenti fungicidi e insetticidi in vigneto e nel resto delle arboree si posizionano verso i limiti superiori di tale intervallo (Balsari, et al., 2014). Infatti l'irregolarità del bersaglio, determinata dai molteplici tipi d'impianto, dalle fasi di sviluppo vegetativo e dalla variabilità dell'habitus delle chiome (spessore, altezza ecc.) rende difficile fissare le caratteristiche ottimali della distribuzione degli antiparassitari. Diventa importante quindi stabilire le relazioni che legano le caratteristiche dell'irrorazione (direzione dei getti, diametro delle gocce, portata e velocità del vettore aria) e quelle dell'area del trattamento (forma, dimensioni, spaziatura fra le piante), cercando di avvicinare le prime alle seconde per garantire una distribuzione ottimale alle differenti quote (Russu & Vieri, 2003), tenendo conto che l'intensità di deriva aumenta all'aumentare dell'altezza degli ugelli e della gittata alla quale viene irrorato il prodotto. Inoltre, per fare in modo che il prodotto penetri uniformemente all'interno della chioma c'è bisogno che la miscela sia opportunamente polverizzata, questo da una parte limita le perdite a terra e per ruscellamento che si potrebbero avere con l'emissione di gocce più grandi e conseguenti maggiori volumi di acqua ma d'altra parte ne aumenta il rischio di deriva. Gocce di dimensioni maggiori, d'altra parte, riducono al minimo ma non eliminano la deriva, soprattutto se il trattamento viene eseguito quando la velocità del vento è superiore a 8 km/h. (Zimdahl, 2018).

1.2 **Agricoltura di precisione e ottimizzazione dei trattamenti**

Una distribuzione di precisione del fitofarmaco, come ad esempio quella a dose variabile, consente di ottimizzare la quantità di prodotto che deve raggiungere il bersaglio in funzione delle differenti condizioni operative (presenza o meno della coltura, ed eventualmente diffusione del patogeno da combattere o controllare). Il rateo variabile può garantire una maggiore efficacia del trattamento e determinare una sensibile riduzione dei quantitativi di agrofarmaci impiegati.

Con la distribuzione mirata, il prodotto fitosanitario viene distribuito in modo tale da interessare prevalentemente il bersaglio dell'irrorazione, superando il concetto di distribuzione

completa su tutto l'appezzamento, applicando il prodotto solo dove questo risulta effettivamente utile.

Un'altra necessità operativa, sempre finalizzata alla riduzione degli sprechi, è quella di evitare di irrorare aree che sono già state interessate dall'irrorazione, o di irrorare aree in cui non è presente la coltura, ad esempio quando si opera nelle capezzagne, lungo i bordi del campo o nelle operazioni di completamento del trattamento all'interno dell'appezzamento.

Il passaggio dal sistema "tradizionale" di distribuzione degli agrofarmaci alla tecnica dell'irrorazione di precisione deve, tuttavia, essere oggetto di un'attenta valutazione a livello aziendale. L'irrorazione di precisione, infatti, può essere eseguita essenzialmente con due tecniche:

- Con sistemi "off-line", questi sistemi richiedono dei sopralluoghi in campo (o dei monitoraggi da satellite) per la raccolta dei dati e la determinazione dello stato di avanzamento della malattia. Dai dati raccolti vengono poi prodotte delle mappe con cui poi è possibile applicare la distribuzione a rateo-variabile.

  Generalmente la messa in opera di tali sistemi e la produzione di mappe non viene svolta dall'azienda agricola stessa ma è delegata ad aziende esterne che forniscono il servizio ed all'agricoltore spetta il solo compito di effettuare il trattamento una volta ricevuta la mappa.

  Questo approccio consente l'elaborazione di una gran mole di dati, portando alla produzione di mappe estremamente dettagliate. Il problema risiede nelle tempistiche di produzione di tali mappe che non consentono una tempestività di intervento in campo, infatti, tale processo può richiedere anche due o tre giorni. Tempo in cui i patogeni come peronospora ed oidio possono proseguire la loro attività e provocare ulteriori danni.

- Con sistemi in grado di individuare, con una serie di specifici sensori il problema o il target in maniera diretta e d'intervenire in tempo reale sugli attuatori che modificano l'irrorazione (real-time systems).

  In questo caso tutto quello che serve per attivare o meno l'irrorazione è montato sulla macchina e gestito da una centralina elettronica in grado di raccogliere ed elaborare le informazioni circa la posizione della macchina e quelle provenienti da sensori presenti e trasmetterle agli attuatori.

  Tale metodologia risulta più tempestiva della precedente, per contro il dettaglio dell'intervento è ridotto, in quanto tali sistemi real-time, per ragioni di costo e

scarsa adattabilità dei processori performanti alle condizioni di campo, non hanno capacità di calcolo paragonabili ai sistemi fissi.

In entrambi i casi è necessario disporre di una macchina irroratrice in grado di operare una distribuzione mirata del fitofarmaco, ovvero, capace di modificare la portata erogata dagli ugelli, o a parità di portata di quest'ultima, la concentrazione di prodotto fitoiatrico nella miscela erogata (Balsari, et al., 2016).

In vigneto e nelle arboree l'obiettivo principale è quello di distribuire il prodotto solo dove è presente la vegetazione bersaglio e di adeguare le modalità di distribuzione alle caratteristiche morfologiche della vegetazione (altezza, spessore, strati fogliari e sviluppo vegetativo). Per conseguire questo scopo le tipologie di sensori più performanti e utilizzate sono quelle ad ultrasuoni o LiDAR.

Tali sensori, che verranno approfonditi nel paragrafo successivo, inizialmente furono utilizzati per definire la struttura delle chiome, informazioni poi utili per la creazione di mappe di prescrizione utilizzabili poi per l'applicazione del rateo variabile. Successivamente sono stati utilizzati nella la costruzione di apparecchiature capaci di operare in real-time.

1.3 **Macchine e dispositivi attualmente esistenti**

Per far fronte alle problematiche sopra elencate, nel corso degli anni sono stati messi a punto e commercializzati macchinari appositi ma anche dispositivi adattabili che possono essere montati su macchinari già esistenti. Questi vengono distinti in base al loro funzionamento e sono descritti di seguito.

1.3.1 *Sistemi a controllo fisico*

In questa categoria sono raggruppati tutti quei dispositivi e macchinari che vanno a ridurre la deriva attraverso metodi fisici. Tra questi troviamo diverse tipologie di ugelli anti-deriva applicabili ai comuni atomizzatori a polverizzazione meccanica e gli atomizzatori a tunnel (o a recupero di prodotto).

- Per quanto riguarda gli ugelli anti-deriva, le tipologie disponibili sul mercato sono sostanzialmente due: la prima è caratterizzata da una pre-camera o pre-orifizio situata all'interno del corpo dell'ugello che permette di ridurre la pressione del liquido in prossimità dell'apertura favorendo di conseguenza la formazione di gocce di maggiori dimensioni. La riduzione di pressione è garantita delle dimensioni ridotte del foro di entrata nella precamera rispetto a quelle dell'orifizio da cui fuoriesce il liquido. Nella seconda tipologia di ugello anti-deriva, invece, è

presente un foro sul lato del corpo dell'ugello stesso, da cui l'aria, per effetto Venturi, viene aspirata ed iniettata nel liquido prossimo ad attraversare l'orifizio, permettendo la formazione di gocce di dimensioni maggiori che inglobano bolle d'aria. L'attuazione di tali fenomeni ha richiesto un notevole allungamento del corpo dell'ugello (+300% rispetto ai normali ugelli a fessura). La seconda tipologia di ugelli risulta più efficiente ed è capace di ridurre tra il 40% e il 60% la deriva rispetto agli ugelli tradizionali indipendentemente dalla velocità del vento (Balsari, et al., 2000) fino ad arrivare al 75% in situazioni particolarmente favorevoli (Ganzelmeier & Rautmann, 2000).

A seguito di sperimentazioni svolte da Bondesan et al. su pomacee per valutare le performance di diversi ugelli anti-deriva, si è osservato che gli ugelli ad inclusione d'aria, producono una popolazione di gocce di maggiori dimensioni che risultano meno soggette a spostarsi dall'area trattata poiché tendono a ricadere a terra rapidamente. In generale, dalla valutazione dei depositi, è emerso come la qualità dell'applicazione ottenibile con gli ugelli anti-deriva sia risultata buona ed in linea con quanto prodotto dagli ugelli standard. L'uniformità di deposizione fra parte alta e basale della chioma è risultata maggiore con altre tipologie di ugelli (ugelli a ventaglio). Dallo stesso studio si è osservato inoltre che l'efficacia dei trattamenti contro la ticchiolatura è risultata comunque adeguata durante le annate della sperimentazione per ciascuna delle due tipologie di ugelli testati. Tuttavia, le differenze emerse relativamente all'efficacia dei trattamenti contro l'oidio nel 2010, inducono a rivalutare le scelte sui volumi di distribuzione adottabili quando si utilizzano ugelli ad inclusione d'aria. Se da un lato le loro caratteristiche costruttive li rendono particolarmente adatti a contenere la deriva, il loro impiego richiede altresì maggiori attenzioni nelle scelte operative, oltre che nella pulizia dei filtri e degli ugelli stessi. Quest'ultimo aspetto è emerso dalle osservazioni condotte durante i test, in cui spesso si ravvisava la necessità di interrompere i trattamenti per la presenza di getti otturati. L'adozione di un filtro con dimensioni delle maglie adeguate, ha consentito di risolvere il problema (Bondesan, et al., 2012).

- Atomizzatori a tunnel o a riciclo per frutteti e vigneti. Sono macchinari da tempo riconosciuti come uno strumento importante per ridurre notevolmente sia la contaminazione del suolo per ruscellamento che la deriva aerea (Backer & Ruhling, 1991) (Siegfried & Raisigl, 1991). Il principio di funzionamento si basa su due

pannelli opposti, ognuno da un lato del filare, in grado di intercettare la miscela che non ha raggiunto il bersaglio e recuperarla per poterla riutilizzare. Normalmente si tratta di macchine quasi sempre trainate con serbatoi che variano da 500 a 3000 litri. La nebulizzazione della miscela avviene grazie ad una pompa a pistone-membrana, che invia il liquido ad una barra porta-ugelli montata verticalmente in prossimità dal filare (alcuni costruttori offrono macchine con nebulizzazione pneumatica). I pannelli sono provvisti di sistemi di intercettazione delle gocce (grigliati in acciaio). I sistemi di intercettazione hanno il compito di bloccare fisicamente la miscela che non ha raggiunto il bersaglio che cola verso un contenitore di recupero. Il liquido raccolto viene quindi sottoposto ad una filtrazione a più stadi per separare eventuali impurità raccolte. L'aspirazione della miscela recuperata è garantita da una pompa indipendente che provvede a inviare il prodotto nel serbatoio principale.

Queste irroratrici sono in grado di recuperare e riciclare la maggior parte della frazione irrorata che non è stata trattenuta dalla chioma, rendendo possibile un controllo efficiente dei parassiti anche a tassi di dose di fitofarmaco ridotta (del 50% e 70%, nelle prime fasi di crescita della coltura; o, 15% e 30% a pieno sviluppo del fogliame) (Siegfried & Hollinger, 1996) (Doruchowski & Holownicki, 2000). L'importanza ambientale ed economica di un ridotto consumo di prodotti fitosanitari viene ulteriormente enfatizzata in climi piovosi come quello dell'Italia nord-orientale, dove 15 e 20 applicazioni all'anno sono una pratica comune, e il costo dei fitofarmaci può variare da 40 a 70 euro/ha per applicazione. Nonostante questi vantaggi, il numero di irroratrici a tunnel nelle aziende viticole italiane è ancora molto ridotto, a causa del costo più elevato della macchina, della minore velocità di lavoro, della necessità di fare frequenti soste per la pulizia del sistema di filtrazione delle impurità, della difficile manovrabilità rispetto alle irroratrici convenzionali e della difficoltà nel distribuire omogeneamente il prodotto anche nella parte interna della vegetazione, soprattutto per le varietà più vigorose (Pergher, et al., 2013).

1.3.2 *Sistemi a ultrasuoni*

Questi sistemi permettono trattamenti localizzati grazie all'ausilio di sensori ad ultrasuoni.

I sensori a ultrasuoni trasmettono onde sonore ad alta frequenza verso un oggetto e rilevano l'eco riflessa. La distanza tra il sensore e l'oggetto viene quindi calcolata misurando la differenza di tempo tra la trasmissione e la ricezione delle onde.

Vengono utilizzati per rilevare la presenza di vegetazione e bloccare, temporaneamente, la nebulizzazione in presenza di vuoti e fallanze.

Il segnale proveniente dai sensori, insieme ai dati sulla velocità di avanzamento delle macchine e la distanza costante tra i sensori e gli ugelli, vengono utilizzati da un algoritmo ottimizzato per aprire e chiudere gli ugelli individualmente (Doruchowski & Holownicki, 2000).

Per garantire il buon funzionamento di questi sensori, è necessario installarli sul lato del serbatoio, in modo che non abbiano interferenze. È necessario, inoltre, scegliere sensori con raggio e forza del segnale adeguati, in quanto la loro precisone diminuisce all'aumentare della distanza dal target.

Questi sensori inizialmente furono studiati per misurare le caratteristiche della chioma delle piante (volume, densità fogliare ecc.). Delle unità per la misurazione costituite da un trasduttore a ultrasuoni sono state utilizzate per la prima volta nel 1988 per misurare la larghezza della chioma degli alberi e la sua estensione, prove sul campo in meleti e pescheti hanno trovato il sistema per misurare la larghezza degli alberi e la loro estensione con alta precisione, meno del 10% di errore medio (Giles, et al., 1988). Zaman e Salyani nel 2004 hanno sviluppato un sistema con 10 sensori a ultrasuoni montati su un palo verticale e un microprocessore per la misurazione del volume della chioma, valutando l'effetto della velocità sulle misurazioni ultrasoniche del volume della chioma. I risultati hanno indicato che quest'ultima non ha un effetto significativo sulle misurazioni (Zaman & Salyani, 2004). Altre sperimentazioni hanno valutato la capacità di rilevamento del sensore al variare della velocità di spostamento e della temperatura ambientale. La variazione della velocità di spostamento non ha avuto un effetto significativo sul rilevamento del sensore, ma l'aumento della temperatura ambiente da 16,7 °C a 41,6 °C ha ridotto la distanza del rilevamento di 5 cm (Jeon, et al., 2011).

Successivamente, validate le potenzialità di tali sensori e la bontà delle loro misurazioni, sono stati accoppiati a dei sistemi di calcolo e a degli attuatori della portata per essere utilizzati nella costruzione di macchinari capaci di operare la chiusura ed apertura automatica degli ugelli in real-time. Tale macchinario è stato testato in un pescheto e meleto per studiare il risparmio del volume di miscela irrorata in relazione all'architettura della coltura target, le prove hanno fatto registrare risparmi fino al 52% in appezzamenti caratterizzati da numerose fallanze e chiome dalla struttura eterogenea (Giles, et al., 1989).

Moltò et al. hanno sviluppato un'irroratrice a rateo variabile per adattare la portata dell'irrorazione in base al volume occupato dalle foglie in relazione alla forma della chioma.

Il sistema consisteva di due sensori a ultrasuoni con un microcontroller che controllava diverse valvole elettroidrauliche attraverso un circuito appositamente progettato. Il sistema permetteva di spruzzare dosi più elevate nella parte centrale dell'albero, dove c'è più vegetazione nelle chiome di forma globosa (Moltò, et al., 2000). Gli esperimenti sul campo hanno rivelato che sono stati raggiunti risparmi di miscela irrorata fino al 37%, mantenendo la qualità del trattamento (Moltò, et al., 2001).

Solanelles et al. hanno sviluppato un sistema di irrorazione basato su un sensore ultrasonico che regolava la dose irrorata proporzionalmente alla larghezza della chioma delle colture arboree. La regolazione della portata si basava sulla relazione tra la larghezza effettiva dell'albero misurata dai sensori a ultrasuoni e la larghezza massima dell'albero. Il test del prototipo negli oliveti, pereti e meleti ha rivelato un risparmio di miscela rispettivamente del 70%, 28% e 39% rispetto a un'applicazione convenzionale, con una migliore efficienza di applicazione (Solanelles, et al., 2006).

Un altro atomizzatore a rateo variabile basato su sensori a ultrasuoni è stato progettato da Gil et al. che ha modificato la portata dagli ugelli, in relazione alla variabilità della larghezza della coltura. La valutazione dell'irroratrice ha rivelato che in media è stato applicato il 58% in meno di liquido rispetto all'applicazione a portata costante, con una deposizione simile sulle foglie (Gil, et al., 2007).

Un prototipo di irroratrice per adattare automaticamente la distribuzione dell'aerosol e dell'aria in base alle caratteristiche dell'obiettivo è stato sviluppato da Balsari et al. Per la caratterizzazione della chioma in termini di dimensioni e densità, è stato sviluppato e studiato un Crop Identification System (CIS), basato su sensori a ultrasuoni. Test effettuati in campo a diverse velocità di avanzamento (2, 4, 6 e 8 km/h), hanno confermato l'idoneità del sistema a rilevare in real-time le caratteristiche del bersaglio da irrorare e a consentire un'adeguata regolazione dei parametri di irrorazione (Balsari, et al., 2008).

Llorens et al. hanno riferito che in media circa il 58% di risparmio nel volume di applicazione è stato ottenuto con il metodo a tasso variabile, ottenendo depositi fogliari simili o addirittura migliori rispetto ad una irrorazione standard (Llorens, et al., 2010).

Jeon e Zhu hanno sviluppato un'irroratrice a rateo variabile basata su sensori a ultrasuoni per regolare automaticamente la portata dell'irrorazione in base alle dimensioni della chioma degli alberi. L'irroratrice aveva due barre integrate con cinque coppie opposte di ugelli di spruzzo equidistanti. La precisione dell'irroratrice è stata valutata a diverse velocità di avanzamento. I risultati dei test hanno rivelato che l'irroratrice applicava tassi di uscita variabili da 0 a 20,4 L/min a velocità di avanzamento da 3,2 a 8,0 km/h (Jeon & Zhu, 2012). Durante

gli esperimenti condotti su piante da frutto in vivaio, l'irroratrice a tasso variabile ha erogato 151-359 L/ha, mentre l'applicazione convenzionale a tasso costante ha richiesto 1110 L/ha. I risultati dei test hanno dimostrato che l'irroratrice a tasso variabile ha ridotto il volume di irrorazione fino all'86,4 e al 70,8% rispetto alle applicazioni a tasso costante (Jeon, et al., 2011).

Due anni dopo Gil et al., a seguito di prove svolte su vigneto in Spagna, stimano il risparmio economico derivante all'utilizzo di un atomizzatore che attua il rateo-variabile per mezzo di ultrasuoni, pari ad un 22% rispetto ad un trattamento convenzionale (Gil, et al., 2013).

Dall'analisi della letteratura scientifica, si evince che l'uso di sensori a ultrasuoni consente di ottenere informazioni e risultati molto interessanti. D'altra parte, ad emergere sono anche i limiti emersi durante il loro utilizzo, derivanti dalla conformazione stessa dell'onda sonora, la quale, divergendo molto dal punto di emissione, aumenta d'ampiezza all'aumentare della distanza dal bersaglio, riducendo l'accuratezza delle misure e aumentando la possibile interferenza nella ricezione del segnale di due sensori consecutivi. Accuratezza che viene inoltre inficiata dalla temperatura e umidità dell'aria. Le misurazioni della larghezza del punto devono essere estrapolate in una zona della struttura vegetativa definita, con qualche rischio di errore nello scalare il dato all'intera superficie. Tali misurazioni risultano pertanto fortemente influenzate dall'ambiente e dall'operatore e non permettono di avere un risultato molto preciso sulla determinazione della struttura vegetativa (Llorenz, et al., 2011).

1.3.3 *Sistemi LiDAR*

Per cercare di ovviare alle problematiche proprie dei sensori ad ultrasuoni stanno prendendo sempre più piede sensori basati sulla tecnologia laser, tra cui una delle più utilizzate è la tecnologia LiDAR.

Il LiDAR utilizza la radiazione nel dominio ottico. Il sensore di tipo attivo invia degli impulsi luminosi (laser), verso il bersaglio (ad esempio la superficie della vegetazione) e tramite un detector, rileva il ritorno dell'impulso dopo che è stato riflesso dal bersaglio. Registrando il tempo che impiega l'impulso luminoso ad andare e tornare dal bersaglio (con un'accuratezza dell'ordine dei nanosecondi) e conoscendo la velocità della luce, il LiDAR è in grado di rilevare con precisione la distanza tra il sensore e il bersaglio. Conoscendo inoltre in maniera precisa le coordinate del sensore nello spazio tridimensionale (qualora collegato a GPS e sistema inerziale di navigazione) è possibile ricavare le coordinate dei punti in cui l'impulso luminoso ha colpito gli oggetti. Il risultato che si ottiene è una nuvola di punti ciascuno con le proprie coordinate nello spazio tridimensionale, da cui è possibile ricavare informazioni sull'altezza e sulla struttura geometrica 3D della vegetazione (Casa, et al., 2016).

I primi LiDAR, (come anche i modelli di fascia economica presenti oggi sul mercato) sono dispositivi 2D: riescono ad individuare la posizione di un punto in uno spazio piano, qualora posti su dispositivi in movimento la sovrapposizione e l'unione dei diversi rilevamenti permette di costruire tridimensionalmente la nuvola di punti da questi rilevata.

Ad oggi vi è un rapido progresso in diverse tecnologie avanzate di LiDAR, quali ad esempio i LiDAR full waveform che invece dei singoli punti ricevono il segnale da ritorni multipli, permettendo una miglior ricostruzione del passaggio attraverso la copertura vegetale. Un'altra innovazione è quella dei LiDAR multi- o iper-spettrali in cui per ogni punto della nuvola 3D sono fornite informazioni derivanti dallo spettro di assorbanza determinato dall'ostacolo (Matese, et al., 2016).

Nel settore agricolo tali sensori sono utilizzati per la rilevazione e la caratterizzazione geometrica della chioma delle piante e forniscono con estrema precisione informazioni correlate alle biomasse ed al LAI (Leaf Area Index).

I primi studi a riguardo furono condotti nel 1993 dove per misurare l'altezza delle chiome degli alberi è stato utilizzato un altimetro laser aviotrasportato (Ritchie, et al., 1993), seguiti nel 1996 da Nilsson che ha usato un sistema LiDAR per misurare l'altezza e il volume degli alberi (Nilsson, 1996).

Un sistema LiDAR è stato usato da Rossel-Polo et al. per misurare il volume dei filari e la superficie totale delle colture in frutteti e vigneti (Rossel-Polo, et al., 2009). Un sistema di scansione laser con l'algoritmo corrispondente è stato sviluppato da Wei e Salyani per misurare l'altezza, la larghezza e il volume delle chiome degli alberi (Wei & Salyani, 2004), poi usato nel 2005 confrontando i risultati ottenuti con la valutazione visiva rilevandone una buona correlazione (Wei & Salyani, 2005).

Un laser scanner a terra con algoritmo analogo è stato usato per misurare il volume degli alberi e l'area delle foglie in tempo reale (Palacin, et al., 2007).

Lee e Ehsani hanno sviluppato un sistema basato su un laser montato su un veicolo che consiste in uno scanner laser, un GPS, un sensore inerziale collegato a un computer per misurare l'altezza, la larghezza e il volume delle chiome degli alberi (Lee & Ehsani, 2008).

I test sul campo negli agrumeti hanno mostrato una grande correlazione con le misurazioni manuali. Tumbo et al. hanno confrontato le misurazioni del volume delle chiome degli agrumi con sensori ultrasonici, laser e con il metodo manuale. Hanno concluso che entrambe le misurazioni ultrasoniche e laser concordavano con le misurazioni manuali. Rispetto al sensore a ultrasuoni, il sensore laser ha mostrato una migliore previsione del volume della chioma grazie alla maggiore risoluzione (Tumbo, et al., 2002). Allo stesso modo, Llorens et al. hanno

confrontato il sensore a ultrasuoni e il sensore LIDAR per la misurazione dell'altezza, della larghezza e del volume delle colture con i metodi di misurazione manuale e distruttiva delle chiome. I risultati hanno indicato che entrambi i metodi a ultrasuoni e LIDAR avevano una buona correlazione con i metodi manuali. Inoltre, hanno concluso che il sensore a ultrasuoni è uno strumento appropriato per la caratterizzazione della chioma ma il LIDAR ha dimostrato di essere un metodo più accurato (Llorenz, et al., 2011).

Analogamente a quanto accaduto per i sistemi ad ultrasuoni, validate le potenzialità di tali sensori e la bontà delle loro misurazioni, che in questo caso risultano più accurate perché non influenzate dalla distanza con il target e dalle condizioni climatiche, sono stati accoppiati a dei sistemi di calcolo e a degli attuatori della portata per essere utilizzati nella costruzione di macchinari capaci di operare la chiusura ed apertura automatica degli ugelli in real-time.

Basandosi su un sistema di rilevamento a scansione laser, Chen et al., (US) hanno sviluppato un atomizzatore sperimentale a rateo variabile capace di controllare l'uscita del getto dei singoli ugelli in tempo reale. Ogni ugello era accoppiato ad un'elettrovalvola modulata a larghezza di impulso, tale prototipo ha raggiunto un'erogazione a velocità variabile basata sulla presenza, l'altezza e la larghezza dell'albero bersaglio e la sua densità fogliare (Chen, et al., 2012). Le prestazioni di questo prototipo sono state testate in un meleto, quantificando la deposizione dell'aerosol all'interno delle chiome in tre diverse fasi di crescita, confrontando i risultati con quelli ottenuti da un trattamento svolto da un atomizzatore convenzionale. I risultati hanno indicato che il prototipo ha consumato solo il 27-53% della miscela rispetto ad un trattamento convenzionale, ottenendo comunque una copertura adeguata all'interno delle chiome (Chen, et al., 2013). In queste condizioni, è stata rilevata una riduzione delle perdite medie sul terreno del 68-90% e intorno alle chiome degli alberi del 70-92%, ha ridotto la dispersione in aria del 70-100% (Chen, et al., 2013).

Sempre negli Stati Uniti Liu et al. hanno sviluppato un sistema prototipale di controllo automatico della portata con microprocessori ed elettrovalvole controllate con modulazione di larghezza di impulso (PWM), per controllare le portate degli ugelli multicanale in modo indipendente per l'irroratrice a portata variabile. L'algoritmo di controllo del sistema è stato elaborato attraverso un computer ed è stato anche utilizzato per comunicare tra l'operatore dell'irroratrice e il sistema di controllo. Il sistema sviluppato è stato valutato in laboratorio per verificare la sua longevità e la precisione del sistema di controllo con tre diversi ugelli, a quattro diverse pressioni operative (138-345 kPa) e dieci cicli di lavoro (10-100%). Dimostrata la funzionalità in laboratorio di tale sistema, è stato integrato con successo su un atomizzatore a portata variabile (Liu, et al., 2014).

In Spagna, utilizzando il sistema LiDAR di caratterizzazione della chioma, Escola et al. hanno sviluppato un prototipo di irroratrice per frutteti con un algoritmo a velocità variabile per adattare il volume di miscela irrorata al volume della chioma. I risultati dei test del prototipo hanno rivelato una forte relazione tra le portate previste e quelle irrorate e tra le sezioni trasversali delle chiome e i volumi irrorati (Escolà, et al., 2013).

Da questi studi, si può riassumere che la tecnologia LiDAR utilizzata per l'irrorazione a rateo variabile in real-time si sta dimostrando lo strumento più adatto per i trattamenti di precisione nei frutteti e nei vigneti. Ciononostante Tali sistemi sono finora stati utilizzati solo nell'ambito della ricerca, a causa della difficoltà di elaborazione dei dati e del loro elevato costo. Costo che negli ultimi anni ha visto un veloce abbassamento che ne ha aumentato l'effettiva applicabilità.

Capitolo 2
MATERIALI E METODI

Il presente lavoro di tesi aveva l'obiettivo di implementare un sistema veloce e replicabile per valutare la qualità di distribuzione della miscela irrorata da macchine per la distribuzione di antiparassitari.

L'obiettivo specifico è la verifica delle caratteristiche di lavoro di un cantiere che effettua trattamenti. Nel caso esaminato, la macchina è dotata di una serie di sensori per il controllo dell'apertura e chiusura di ogni singolo ugello disposto sulla barra irroratrice, in funzione della presenza o assenza di vegetazione. Il sistema progettato è stato testato per verificare la qualità del lavoro con e senza l'attivazione del sensore.

Il protocollo seguito è stato sviluppato partendo da quello prodotto in un precedente lavoro di tesi (Tobia, 2020) opportunamente snellito e perfezionato al fine di rendere più scorrevole l'analisi del maggior numero di dati provenienti dai rilievi in campo.

2.1 **Caso di studio**

Per la prova è stato utilizzato un atomizzatore trainato monoasse, senza ruote sterzanti, con frammentazione meccanica e trasporto pneumatico. Prodotta dalla ditta Sae, modello Defender Turbmatic 91 DP/1500, la macchina è costituita da: un serbatoio in vetroresina della capacità di 1500 litri, ventilatore assiale ad aspirazione anteriore con diametro di 910 mm, 14 ugelli a cono a circuito centralizzato disposti su barra verticale (7 per lato) con flusso d'aria tangenziale. La macchina è in grado di coprire una larghezza interfilare compresa tra i 3 e i 6 metri e un'altezza di distribuzione massima compresa tra i 5 e i 6 metri. Il trattore abbinato è un Landini Rex 100.

Al cantiere sopracitato è stato collegato un sistema di acquisizione dati costituito da una serie di sensori montati su una barra verticale fissata alla parte anteriore del telaio dell'atomizzatore, immediatamente sopra al gruppo delle valvole di comando (Figura 2-4). Nello specifico:

- Sensore LiDAR (*SLAMTEC: RPLIDAR A3*): scelto in base al costo contenuto e alla frequenza di acquisizione dati (16kHZ: 16.000 punti al secondo) che, posta in

relazione alla velocità standard di un cantiere per il trattamento fitosanitario, 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 filare contrapposte (Figura 2-1).

Tale sensore è stato montato in posizione posteriore centrale rispetto alla barra verticale per poter acquisire il maggior numero di dati della parete fogliare (con la possibilità di essere variato in altezza).

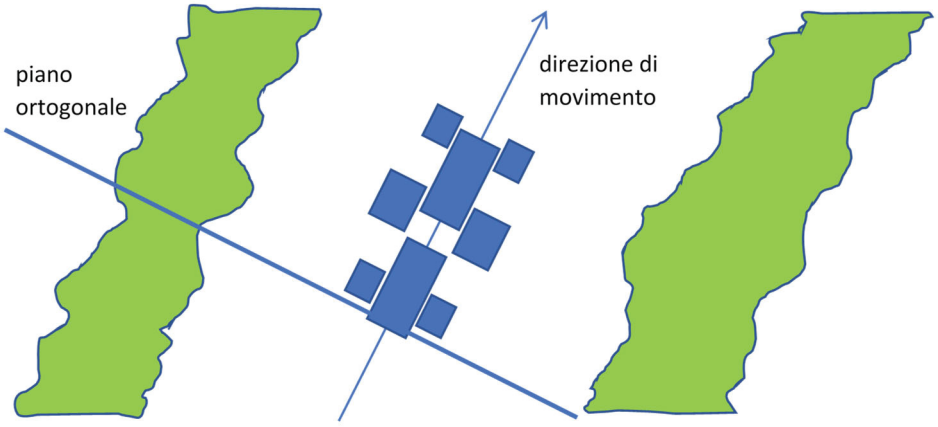

Figura 2-1: Piano di acquisizione dati del LiDAR

- Antenna GPS (*Ag Leader GPS 1500*): questa tipologia di ricevitore si collega ad almeno quattro satelliti presenti in orbita ed usa le informazioni da loro fornite, a seguito di una correzione differenziale operata da una rete di satelliti e basi terrestri (in Europa EGNOS), per calcolare la posizione con un errore massimo di ±1m. Ciò consente la georeferenziazione del cantiere e fornisce il dato di posizione tridimensionale dei punti determinati dal LiDAR (le coordinate tridimensionali sono date dal LiDAR: 2 coordinate sul piano verticale delle chiome; e una coordinata longitudinale alla controspalliera derivata dal GPS).

  Tale antenna è stata fissata sul punto più alto della barra per evitare che la parete fogliare possa avere un effetto di schermatura del segnale ricevuto.
- Dispositivo di misura inerziale (IMU) a tre assi (*WIT MPU6050 3-Axis*): dispositivo elettronico che attraverso una combinazione di giroscopi e magnetometri è in grado di rilevare rispettivamente i movimenti rotazionali sugli assi xyz e le accelerazioni a cui un corpo viene sottoposto. Serve a determinare errori di posizionamento del LiDAR (inclinazione) che inevitabilmente intercorrono quando si opera su superfici irregolari come possono essere i fondi

coltivati, a maggior ragione se questi sono lavorati come succede negli interfilari dei vigneti (Figura 2-2). Posizionato sulla barra di fissaggio orizzontale, non sempre viene incluso in prototipi simili. Il suo utilizzo viene più volte consigliato in letteratura scientifica per aumentare l'accuratezza delle misurazioni (Cortiella, et al., 2011) (Escolà, et al., 2017), è stata utilizzata da Tsoulias et al. nella costruzione di un sistema LiDAR trasportato da un trattore, utilizzato per stimare i parametri vegetativi della chioma degli alberi (Tsoulias, et al., 2019).

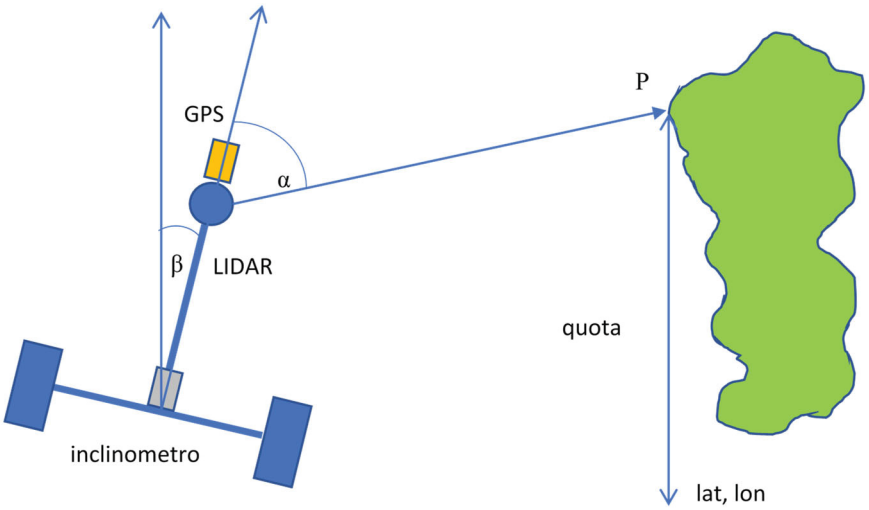

Figura 2-2: Schema di funzionamento del dispositivo di misura inerziale

Tutti i sensori sono collegati con dei cavi ad una scheda elettronica (*Raspberry Pi B+*) programmata con un Software appositamente sviluppato dalla ISELQUI Technology (partner tecnologico del progetto), per gestire in tempo reale i dati acquisiti dai sensori coordinati temporalmente da un clock interno e il salvataggio degli stessi in una chiavetta USB. Tale scheda è dotata di una interfaccia Wi-Fi che consente di copiare i dati generati senza dover rimuovere la chiavetta USB dal suo alloggiamento.

Il sistema finora descritto è quindi in grado di rilevare eventuali fallanze, disformità e buchi nella vegetazione. L'attuazione del rateo variabile con la chiusura e la successiva apertura del singolo ugello in concomitanza di queste, si esplica attraverso l'utilizzo di una scheda controllore comandata dalla scheda *Raspberry* deputata al controllo delle 14 elettrovalvole, ognuna delle quali regola la portata di un ugello, consentendo così ad ogni elemento di lavorare indipendentemente l'uno dall'altro (Figura 2-3, 2-4).

Figura 2-3: Macchina Operatrice oggetto di studio

Figura 2-4: Sistema di acquisizione ed elaborazione dati (sx); attuatori del rateo-variabile (dx)

2.2 **Rilievi in campo**

I rilievi in campo si sono susseguiti tra maggio ed agosto 2021 in un appezzamento vitato di proprietà dell'azienda agricola "Tenute Mattei" nel comune di Arcevia (coordinate GPS: 43.517751, 12.967274). Tale vigneto, allevato su un versante collinare con esposizione Sud-Ovest / Nord-Est è stato volutamente scelto perché presentasse fallanze lungo i diversi filari ed uno sviluppo della chioma molto irregolare. La scelta è stata attuata perché utile a verificare

la capacità del sistema di captazione e di analisi, di cogliere le caratteristiche qualitative del funzionamento della macchina.

Dei 22 filari presenti sull'appezzamento i 3 più ad ovest rappresentano il controllo non trattato e sono dedicati ad altre sperimentazioni di tipo fitopatologico, spostandosi verso est, 10 filari sono gestiti con il cantiere sopra descritto con la sensoristica in azione (trattamento LiDAR), i restanti 9 sono gestiti sempre con il cantiere di cui sopra ma con la sensoristica inattivata (trattamento Standard) in modo tale da rappresentare il funzionamento di un trattamento standard (Figura 2-5).

I rilievi effettuati sono stati tre: un intervento di mappatura del vigneto in data 21 maggio e due interventi di verifica della distribuzione del prodotto fitosanitario durante il trattamento, rispettivamente il 24 giugno e il 20 luglio.

Figura 2-5: Ripartizione del vigneto oggetto di studio

2.2.1 *Mappatura del vigneto*

Questa fase consiste nella mappatura su un foglio quadrettato, successivamente trascritto su Microsoft Excel, di quanto presente sull'appezzamento (Figura 2-6).

Assumendo ogni quadretto come il posto occupato (o presunto tale) da una vite si è proceduti con l'osservazione di ogni pianta, filare per filare annotando eventuali fallanze (evidenziate in rosso con la lettera F), fallanze con ricaccio del portainnesto (evidenziate in arancione con la lettera P), piante sommerse da edera (evidenziate in verde scuro con lettera E), piante prossime al disseccamento ([1]), pali di testa/coda (/), pali veri e propri (|I).

La produzione di tale mappa consente di avere un'indicazione quantitativa delle fallanze presenti e della loro distribuzione. Informazioni fondamentali per l'organizzazione dei successivi rilievi in campo.

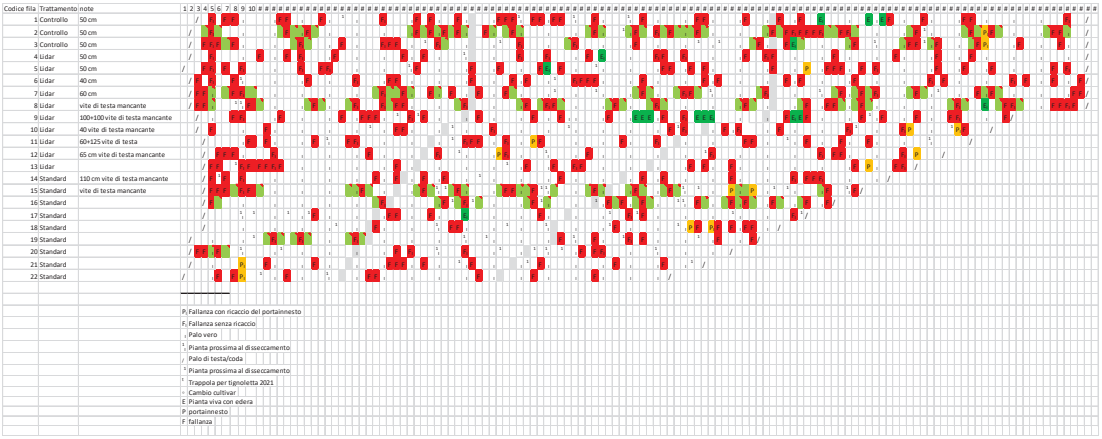

Figura 2-6: Mappatura del vigneto oggetto di studio

2.2.2 *Verifica della distribuzione del prodotto fitosanitario durante il trattamento*

L'obiettivo è verificare il corretto funzionamento dei diversi dispositivi di regolazione del flusso di distribuzione del prodotto fitosanitario: il macchinario dovrà interrompere l'erogazione nei punti vuoti lungo il filare e al termine del filare stesso.

Dal momento che il macchinario durante il passaggio nell'interfilare distribuisce il prodotto sul lato destro del filare alla sua sinistra e sul lato sinistro del filare alla sua destra, sono stati considerati come aree di saggio sei pareti fogliari adiacenti a tre interfilari: quattro pareti fogliari sottoposte a distribuzione effettuata inattivando la sensoristica (trattamento Standard) e altre due adiacenti trattate utilizzando il dispositivo LiDAR (trattamento LiDAR). Tali aree di saggio, oltre ad essere opportunamente spaziate per prevenire influenze dovute alla deriva, sono state scelte a seguito dell'analisi della mappa precedentemente prodotta, in base alla quantità di fallanze e alla loro distribuzione. Per conferire al rilievo una migliore ripetibilità ai fini di una successiva analisi statistica, le due aree di saggio relative ai due diversi trattamenti (standard e LiDAR) sono state suddivise in tre blocchi basandosi sui dati rilevati dalla mappatura, la fine di un blocco e l'inizio del successivo è stato segnato in mappa evidenziando la casella con il colore grigio (Figura 2-6). I tre blocchi, nel caso del trattamento con LiDAR ricadono tutti sui due filari selezionati, mentre nel caso dello standard, per assenza di vuoti, il primo blocco è stato esteso ad altri due filari con caratteristiche simili (Figura 2-7).

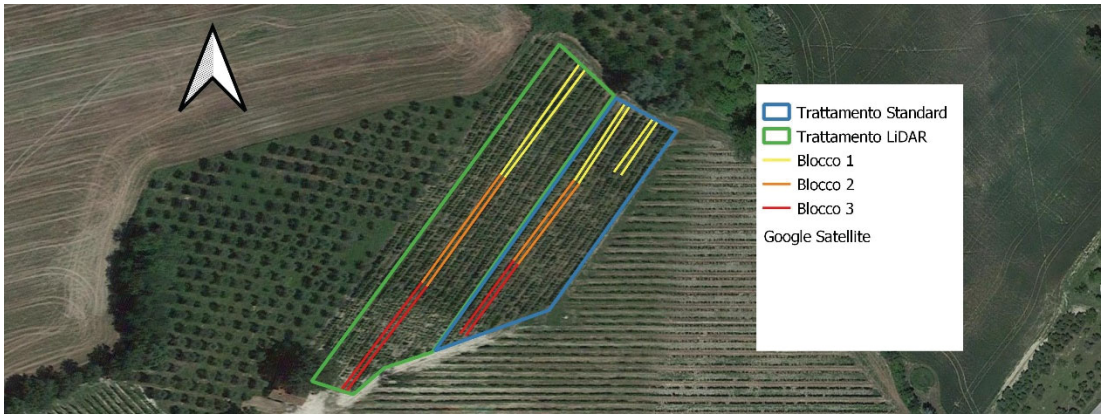

Figura 2-7: Disegno sperimentale

Per valutare la bontà del trattamento effettuato sono state utilizzate delle cartine idrosensibili di dimensione 2,6 cm x 7,6 cm (ditta produttrice: Syngenta), queste si colorano all'impatto di ogni singola goccia di soluzione irrorata, permettendo di verificare direttamente il livello e la qualità della bagnatura nelle zone della vegetazione dove sono posizionate. Forniscono una stima immediata della copertura, della qualità delle gocce e dell'uniformità del trattamento.

Tali cartine sono state posizionate sul versante della chioma aggettante l'interfilare interessato dal passaggio del macchinario in concomitanza ed in prossimità delle fallanze presenti. Le cartine sono state posizionate sulle foglie nelle posizioni stabilite (evidenziate nella mappa in verde chiaro. Figura 2-6) attraverso delle semplici graffette avendo poi l'accortezza, una volta effettuato il trattamento, di rimuoverle facendo in modo di togliere eventuali pezzi di foglia rimasti attaccati alle graffette, che avrebbero potuto alterare la colorazione delle cartine una volta messe nelle apposite buste (per effetto di evaporazione dell'acqua) (Figura 2-8). Per quanto riguarda il posizionamento sulle fallanze si è utilizzato come supporto un filo di nylon legato ai fili orizzontali del filare sul quale sono state attaccate le cartine con delle graffette.

Nello specifico, nel rilievo del 24 giugno, per ciascuno dei tre blocchi di cui sopra sono state posizionate 2 cartine per ognuna delle 15 fallanze selezionate nelle aree di saggio gestite con il trattamento standard e 2 cartine per ognuna delle 15 piante selezionate in concomitanza di tali fallanze. Lo stesso è stato fatto nelle aree di saggio gestiste con il LiDAR. Per un totale di 360 cartine utilizzate.

La scelta di quali vuoti e pieni (per pieni si intendono le piante campione) selezionare all'interno di ogni blocco è avvenuta tramite randomizzazione.

Per quanto riguarda il rilievo del 20 luglio, a causa della difficoltà di reperimento delle cartine idrosensibili, si è deciso di limitare il loro utilizzo alla sola area di saggio gestita dal LiDAR, lo schema di posizionamento è rimasto lo stesso ma il numero di cartine posizionato per ogni vuoto e pieno è sceso da 2 ad 1 (per un totale di 90 cartine utilizzate).

Figura 2-8: Cartina posizionata sulla vegetazione prima e dopo il trattamento

Ciascuna cartina è stata nominata secondo un preciso codice univoco riportato sul retro. Si includono a scopo esplicativo due tabelle con i codici utilizzati per l'identificazione delle diverse collocazioni (Tabella 2-1, 2-2; Figura 2-9).

Tabella 2-1: Codifica cartine: posizione e tipologie di trattamento

Posizione della cartina	Trattamento Standard	Trattamento LiDAR
Vegetazione / pieno	S	L
Fallanza / vuoto	VS	VL

Tabella 2-2: Codifica cartine: numerazione

Trattamento	Blocco	N° Progressivo Rilievo	Posizione Sul Filo
S; VS; L; VL	Da 1 a 3	Da 1 a 15	1: filo più basso 2: filo più alto

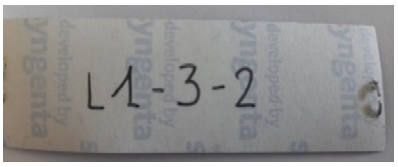

Figura 2-9: Esempio di codice riportato sul retro di una cartina

Essendo l'azienda gestita in regime biologico i trattamenti in questione constano di una miscela di rame e zolfo e sono stati effettuati ad una velocità di circa 8 km/h, utilizzando i parametri e le modalità di utilizzo dell'azienda Mattei (Figura 2-10).

Le cartine sono state rimosse dopo circa 5 minuti dal termine del trattamento, in modo da avere la sicurezza che si asciugassero.

Una volta rimosse tutte le cartine, sono state portate in laboratorio per poter elaborare i dati.

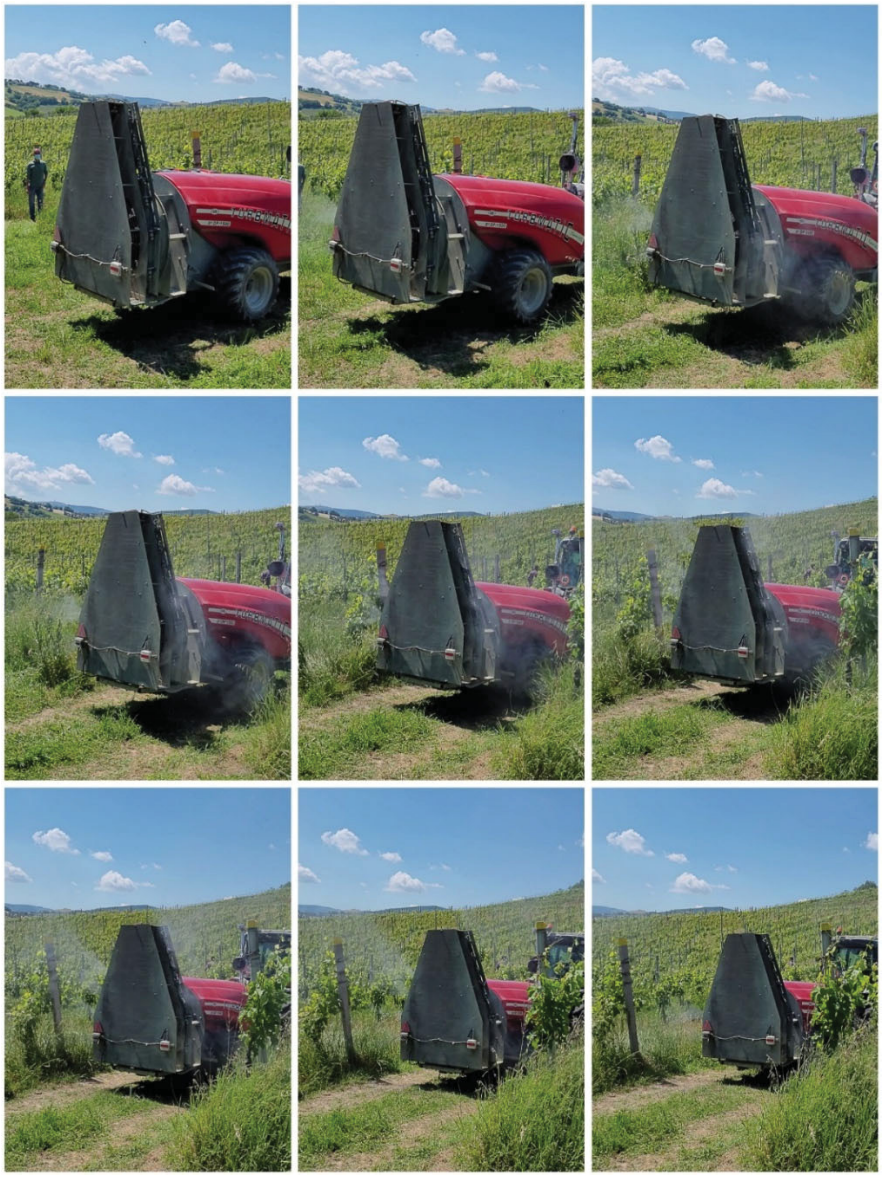

Figura 2-10: Successione di fotogrammi relativi al trattamento gestito con LiDAR

2.3 **Analisi dei rilievi di campo**

Per l'acquisizione e l'analisi delle immagini esistono alcune applicazioni utilizzate in pieno campo che permettono di avere un responso veloce relativo alle caratteristiche qualitative della distribuzione e della struttura delle piante (vitiCanopy). Tuttavia, con tali applicazioni, è difficile ottenere delle immagini scevre dall'influenza delle condizioni ambientali, prima fra tutte la luminosità.

Per tale ragione, si è preferito acquisire e processare le immagini ottenute mediante una procedura da eseguire "off-line" e progettata per la sperimentazione in oggetto. Le fasi della procedura sono: acquisizione digitale delle immagini impressionate sulle cartine; analisi dei dati mediante software di elaborazione immagini; analisi statistica.

2.3.1 *Preparazione del sistema di acquisizione dati*

Tale fase del lavoro è volta all'acquisizione digitale delle immagini attraverso una fotocamera digitale, la procedura mira ad eliminare la variabilità legata alla discrezionalità delle scelte operative e alle condizioni ambientali. La standardizzazione della fase è stata ottenuta riducendo la distorsione e fornendo un'intensità luminosa alla cartina idrosensibile costante in tutte le direzioni.

Il primo requisito è stato ottenuto costruendo un supporto per bloccare la fotocamera ad un'altezza costante rispetto al piano di lavoro, dove, in corrispondenza dell'apertura per la fotocamera, è stato fissato un foglio con una griglia che riporta i margini della struttura di supporto della fotocamera e della cartina idrosensibile. Per ridurre l'influenza del fattore luce, oltre ad acquisire le foto nel minor numero di sedute possibili con le stesse condizioni di luminosità, si è utilizzata una fotocamera capace di regolare i diversi parametri di scatto (diaframma, ISO ed esposizione) al variare delle condizioni esterne in modo tale da avere un risultato costante in tutte le foto (Figura 2-11).

Figura 2-11: Postazione di acquisizione dati

2.3.2 *Acquisizione ed analisi dati*

Il post-processamento delle immagini, acquisite in formato .jpg, ha previsto una serie di trasformazioni di formato. Ciò si è reso necessario perché, benché il formato .jpg sia il più diffuso standard di compressione delle immagini fotografiche, ha il difetto di essere un'immagine raster e, quindi, a risoluzione definita.

Per rendere i file utilizzabili dal software scelto per il post-processamento, cioè QGIS, ogni immagine in formato .jpg è stata ritagliata con una maschera di dimensione nota, vettorializzata[1] ed infine sono state eliminate tutte le geometrie superflue/inesistenti che derivavano da una visualizzazione delle ombre sulle cartine attraverso la scelta di un valore di luminosità uguale. Il tutto attraverso il software Inkscape.

I file sono stati salvati in formato .dxf, lo standard più utilizzato per lo scambio di dati tra i diversi programmi di disegno e di grafica vettoriale. Inizialmente nato per AutoCAD, è divenuto rapidamente uno standard adottato in modo universale nel campo della grafica tecnica.

I file convertiti sono stati caricati su QGIS. La scelta di adottare questo programma è stata dettata dal fatto che è gratuito e che sia ampiamente supportato da una grandissima comunità di operatori che contribuiscono all'implementazione del programma stesso e alla risoluzione di eventuali problemi di utilizzo, rendendo tale strumento di facile applicazione.

[1] Con un vettore, a differenza di un'immagine raster, è possibile modificare rapidamente testo, forme, colori e altri elementi. Poiché i vettori si basano su punti e piani, piuttosto che pixel, è possibile ridimensionarli senza perdere risoluzione.

Il file .dxf può essere letto anche da QGIS perché riesce a leggere file di origine CAD ma non riesce a modificarli. In generale il formato identifica un file di tipo lineare, quindi QGIS legge l'informazione come se fosse una polilinea.

I file, hanno subìto un'ulteriore modificazione nella codifica dell'informazione contenuta, assumendo il formato .shp per permettere il supporto degli strumenti di calcolo vettoriale.

Tale strumento è stato applicato tramite l'uso di un algoritmo di QGIS, presente sulla barra degli strumenti (strumenti di geometria: da linee a poligoni). Così facendo si è trasformato ciascun file vettoriale costituito da linee chiuse in file vettoriale di tipo poligonale ed è stato possibile ricavare i dati di interesse, in particolare, il numero di poligoni presenti all'interno di ciascuna cartina e la loro area.

Per tutti i file è stato impostato lo stesso sistema di riferimento, al fine di rendere confrontabile tutti i risultati.

Alla fine della preparazione del sistema, i dati di interesse calcolati per ogni cartina sono il numero di poligoni all'interno di ogni singola immagine, l'area di ciascun poligono e l'area totale della cartina. Tali dati ottenuti per ogni cartina, sono stati poi copiati su un foglio di calcolo di Microsoft Excel e sono stati utilizzati per la successiva analisi statistica.

Dal punto di vista metodologico, è importante sottolineare anche il metodo utilizzato per la gestione della grande mole di file prodotti, in considerazione del fatto che il programma open source generalizza la visualizzazione di file simili. In dettaglio, i file sono distinti secondo due ordini di codifica: il primo relativo al codice utilizzato per l'identificazione delle cartine, il secondo relativo al tipo di trasformazione operata.

2.3.3 *Analisi statistica*

Con i dati raccolti tramite QGIS, si è deciso di procedere con delle analisi statistiche per evidenziare la significatività o meno delle risposte di distribuzione della miscela distribuita sulla cartina. In particolare, si è utilizzato il test Anova, gestito tramite software Excel.

Ai fini della valutazione della bontà di distribuzione del prodotto irrorato, si è utilizzato come parametro la percentuale di copertura di ogni singola cartina (ottenuta dividendo l'area degli impatti per l'area della cartina analizzata, entrambe ottenute da QGIS) questo perché essendo un valore adimensionale non risulta influenzato dalla dimensione della cartina analizzata e risulta essere un parametro più affidabile per quantificare la copertura rispetto al numero degli impatti su centimetro quadrato. La percentuale di copertura, infatti, aumenta linearmente all'aumentare del numero di impatti/cm^2 fino a circa un 30% di copertura, dopodiché a percentuali più alte di copertura corrispondono valori simili e addirittura più bassi

di impatti/cm^2; questo perché le gocce di miscela, sovrapponendosi portano ad un aumento di copertura ma non ad un innalzamento del numero di impatti (Tobia, 2020).

Per l'ANOVA è stato utilizzato ripetutamente un disegno a blocchi completamente randomizzati per valutare la significatività totale, tra blocchi (1,2,3) e tra trattamenti (S, L, VL, VS). Per ogni disegno è stato adottato un livello si significatività dell'85%. Nello specifico, per ogni rilievo in campo sono stati organizzati tre disegni a blocchi completamente randomizzati dove in ognuno sono state messe a confronto le percentuali di copertura di due trattamenti alla volta (ognuno con 15 rilievi) ripetuti per tre blocchi, rispettivamente:

- confronto tra pieno dello Standard (S) e pieno del LiDAR (L) per verificare la bontà di distribuzione sul target;
- confronto tra Vuoti del LiDAR (VL) e Vuoti dello Standard (VS) per verificare l'effettiva differenza di distribuzione nelle fallanze e tentare una definizione di deriva fisiologica;
- confronto tra pieno del LiDAR (L) e Vuoti del LiDAR (VL) per verificare il funzionamento primario del prototipo.

Per quanto riguarda il secondo rilievo, viste le problematiche nel reperimento delle cartine, è stato seguito lo stesso metodo ma i valori di L e VL ottenuti sono stati confrontati con i valori S e VS ricavati dal primo trattamento.

Laddove in una posizione (sia essa L, VL, S o VS), fosse stata posizionata più di una cartina (disposta su due fili orizzontali diversi) i valori di copertura ottenuti dall'analisi dati, sono stati mediati, in modo tale da rendere i rilievi effettuati durante il primo trattamento confrontabili per numero ed entità con quelli del secondo.

Capitolo 3
RISULTATI

L'acquisizione dei dati in campo e l'analisi dei dati digitalizzati permette di ottenere per ogni cartina delle informazioni relative alle caratteristiche della distribuzione della miscela, in particolare, la percentuale di superficie coperta.

3.1 **Risultati primo rilevamento**

Nelle tabelle a seguito sono riportate le percentuali di copertura ottenute dall'analisi delle cartine utilizzate durante il primo rilevamento.

Laddove in una posizione (sia essa L, VL, S o VS), fosse stata posizionata più di una cartina (disposta su due fili orizzontali diversi), i valori di copertura ottenuti dall'analisi dati, sono stati mediati, in modo tale da rendere i rilievi effettuati durante il primo trattamento, confrontabili per numero ed entità con quelli del secondo.

Tabella 3-1: Risultati 1° rilevamento: Percentuale copertura cartine

Codice			% copertura	Codice			% copertura	Codice			% copertura	Codice			% copertura
		1	2,71%			1	34,80%			1	4,14%			1	40,53%
		2	5,44%			2	38,31%			2	2,00%			2	34,01%
		3	62,60%			3	27,95%			3	8,02%			3	88,72%
		4	29,32%			4				4	2,15%			4	36,12%
		5	11,31%			5	34,24%			5	1,37%			5	32,67%
		6	9,32%			6	44,24%			6	9,34%			6	36,01%
		7	16,01%			7	9,67%			7	2,88%			7	31,37%
	1	8	14,09%		1	8	16,02%		1	8	54,04%		1	8	32,70%
		9	12,64%			9	5,59%			9	54,09%			9	0,62%
		10	36,23%			10	25,73%			10	21,31%			10	24,21%
		11	12,86%			11	31,62%			11	25,01%			11	
		12	3,53%			12	5,18%			12	47,03%			12	
		13	3,88%			13	26,15%			13	16,21%			13	
		14	8,76%			14	52,68%			14	63,05%			14	
		15	6,90%			15	50,42%			15	53,44%			15	
		1	32,08%			1	32,65%			1	1,47%			1	39,64%
		2	20,97%			2	52,61%			2	4,68%			2	32,84%
		3	20,76%			3	31,39%			3	0,72%			3	0,29%
		4	3,45%			4	21,56%			4	2,56%			4	0,24%
		5	42,45%			5	15,94%			5	0,31%			5	19,67%
		6	5,92%			6	19,91%			6	7,23%			6	0,82%
		7	17,58%			7	30,58%			7	5,31%			7	27,82%
L	2	8	21,22%	VL	2	8	12,46%	S	2	8	5,33%	VS	2	8	34,13%
		9	31,62%			9	15,77%			9	6,59%			9	36,37%
		10	9,84%			10	15,52%			10	2,18%			10	
		11	34,91%			11	40,23%			11	0,74%			11	
		12	4,35%			12	11,65%			12	0,25%			12	
		13	12,58%			13				13	3,67%			13	
		14	3,01%			14				14	2,43%			14	
		15	36,97%			15				15	1,97%			15	
		1	24,40%			1	8,26%			1	1,57%			1	3,93%
		2	38,56%			2	16,04%			2	2,38%			2	2,07%
		3	35,98%			3	35,79%			3	0,98%			3	19,70%
		4	25,80%			4	42,93%			4	3,70%			4	1,61%
		5				5	14,22%			5	1,25%			5	24,49%
		6	26,02%			6	20,71%			6				6	1,83%
		7	0,21%			7	70,91%			7	4,01%			7	29,94%
	3	8	30,90%		3	8	76,27%		3	8	4,20%		3	8	2,29%
		9	36,26%			9	11,30%			9	0,97%			9	30,23%
		10	30,41%			10	73,57%			10	3,22%			10	2,51%
		11	4,55%			11	6,70%			11	1,89%			11	37,69%
		12	14,45%			12	56,78%			12	0,30%			12	27,58%
		13	5,81%			13	21,99%			13	3,95%			13	
		14	8,96%			14				14	3,32%			14	
		15	1,10%			15				15	1,63%			15	

In sintesi:

Tabella 3-2: Risultati 1° rilevamento: tabella riassuntiva

	L		VL		S		VS	
	Media (%)	**σ**	**Media (%)**	**σ**	**Media (%)**	**σ**	**Media (%)**	**σ**

Blocco 1	**15,71**	0,177	**28,76**	0,232	**24,27**	0,252	**36,14**	0,361
Blocco 2	**19,85**	0,157	**25,02**	0,171	**3,11**	0,029	**21,31**	0,168
Blocco 3	**20,24**	0,156	**35,04**	0,298	**2,38**	0,021	**14,79**	0,171

Per quanto riguarda l'analisi statistica, i risultati ottenuti dall'Anova sono i seguenti:

Tabella 3-3: Risultati Anova 1° rilevamento: confronto tra pieni del LiDAR (L) e pieni dello Standard (S)

Confronto tra L e S						
Fattore di Correzione (FC)	1,803		**Probabilità (P)**	0,15		
Fonte di Variabilità (FV)	**Devianza (SQ)**	**Gradi di Libertà (GL)**	**Varianza (MS)**	**Fcalcolato (Fc)**	**Ftabulare (Ft)**	*
Totale	2,261	87	0.026	1,007	1,296	N.S.
Trattamento	0,694	29	0,024	0,927	1,379	N.S.
Blocco	0,123	2	0,061	2,378	1,963	*
Errore	1,445	56	0,026			

Tabella 3-4: Risultati Anova 1° rilevamento: confronto tra Vuoti del LiDAR (VL) e Vuoti dello Standard (VS)

Confronto tra VL e VS						
FC	5,108		**P**	0,15		
FV	**SQ**	**GL**	**MS**	**Fc**	**Ft**	*
Totale	2,536	69	0,037	0,476	1,352	N.S.
Trattamento	-0,070	26	-0,003	-0,035	1,429	N.S.
Blocco	-0,561	2	-0,280	-3,630	1,988	N.S.
Errore	3,167	41	0,077			

Tabella 3-5: Risultati Anova 1° rilevamento: confronto tra pieni del LiDAR (L) e Vuoti del LiDAR (VL)

Confronto tra L e VL						
FC	4,700		**P**	0,15		
FV	**SQ**	**GL**	**MS**	**Fc**	**Ft**	*

Totale	2,506	82	0,031	0,636	1,311	N.S.
Trattamento	0,386	29	0,013	0,277	1,389	N.S.
Blocco	-0330	2	-0,165	-3,438	1,969	N.S.
Errore	2,451	51	0,048			

3.2 **Risultati secondo rilevamento**

Nelle tabelle a seguito sono riportate le percentuali di copertura ottenute dall'analisi delle cartine utilizzate durante il secondo rilevamento.

Tabella 3-6: Risultati 2° rilevamento: percentuale copertura cartine

Codice			% copertura	Codice			% copertura
		1	5,80%			1	1,38%
		2	24,12%			2	1,55%
		3	1,65%			3	2,29%
		4	18,43%			4	4,01%
		5	18,97%			5	8,07%
		6	24,50%			6	6,89%
		7	20,73%			7	17,69%
	1	8	21,97%		1	8	15,41%
		9	26,18%			9	5,84%
		10	19,25%			10	3,44%
		11	19,86%			11	0,73%
		12	10,38%			12	6,64%
		13	24,57%			13	12,16%
		14				14	5,95%
		15	21,39%			15	23,11%
		1	2,95%			1	2,17%
		2	22,40%			2	2,30%
		3	21,63%			3	14,36%
		4	7,77%			4	15,68%
		5	20,88%			5	18,49%
		6	0,48%			6	8,69%
		7	26,50%			7	33,55%
L	2	8	13,46%	VL	2	8	8,02%
		9	28,45%			9	13,37%
		10	8,37%			10	11,67%
		11	7,77%			11	25,40%
		12	18,53%			12	4,31%
		13	6,96%			13	17,38%
		14	17,05%			14	2,74%
		15	30,11%			15	12,19%
		1	13,70%			1	14,88%
		2	29,22%			2	11,24%
		3	2,16%			3	10,01%
		4	30,77%			4	14,78%
		5	17,82%			5	13,87%
		6	16,58%			6	10,05%
		7	3,60%			7	21,41%
	3	8	20,36%		3	8	11,96%
		9	21,67%			9	8,98%
		10	34,15%			10	19,70%
		11	22,00%			11	30,40%
		12	17,87%			12	23,56%
		13	27,35%			13	11,27%
		14				14	9,57%
		15	23,14%			15	25,99%

In sintesi:

Tabella 3-7: Risultati 2° rilevamento: tabella riassuntiva

	L		VL	
	Media (%)	**σ**	**Media (%)**	**σ**
Blocco 1	**18,41**	0,074	**7.68**	0,066
Blocco 2	**15,55**	0,095	**12,69**	0,088
Blocco 3	**20,03**	0,093	**15,85**	0,067

Per quanto riguarda l'analisi statistica, i risultati ottenuti dall'Anova sono i seguenti, si ricordi che per le cause sopra elencate i valori di S e VS fanno riferimento a quelli ottenuti dal primo rilevamento:

Tabella 3-8: Risultati Anova 2° rilevamento: confronto tra pieni del LiDAR (L) e pieni dello Standard (S)

Confronto tra L e S						
FC	1,695		**P**	0,15		
FV	**SQ**	**GL**	**MS**	**Fc**	**Ft**	*****
Totale	1,685	86	0,020	1,056	1,298	N.S.
Trattamento	0,484	29	0,017	0,899	1,381	N.S.
Blocco	0,181	2	0,091	4,882	1,964	*
Errore	1,020	55	0,019			

Tabella 3-9: Risultati Anova 2° rilevamento: confronto tra Vuoti del LiDAR (VL) e Vuoti dello Standard (VS)

Confronto tra VL e VS						
FC	2,142		**P**	0,15		
FV	**SQ**	**GL**	**MS**	**Fc**	**Ft**	*****
Totale	1,628	75	0,022	1,217	1,327	N.S.
Trattamento	0,907	26	0,035	1,954	1,411	*
Blocco	-0,117	2	-0,059	-3,282	1,976	N.S.
Errore	0,839	47	0,018			

Tabella 3-10: Risultati Anova 2° rilevamento: confronto tra pieni del LiDAR (L) e Vuoti del LiDAR (VL)

Confronto tra L e VL

FC	1,964		**P**	0,15		
FV	**SQ**	**GL**	**MS**	**Fc**	**Ft**	*****
Totale	0,684	87	0,342	1,750	1,296	*
Trattamento	0,301	29	0,150	0,769	1,379	N.S.
Blocco	-0,007	2	-0,004	-0,019	1,963	N.S.
Errore	0,391	56	0,195			

Capitolo 4
DISCUSSIONI

Prima di discutere i risultati riportati nel capitolo precedente, va anticipato che durante il primo rilevamento del 24 giugno, si sono verificate delle problematiche relative al funzionamento del GPS. Problematiche le quali cause non sono ancora interamente comprese ma che hanno generato una sorta di casualità nell'apertura e chiusura degli ugelli, casualità che poi si è ripercossa sulla distribuzione, andando talora ad inficiare la significatività della prova.

Per quanto riguarda i risultati dell'Anova relativi al primo rilevamento, è emerso quanto segue:

- Dal confronto tra pieni del LiDAR (L) e pieni dello Standard (S) (Tabella 3-3) emerge che nel complesso le differenze presenti all'interno del disegno non sono state significative, risultato positivo che indica che la percentuale di copertura del LiDAR sui pieni è statisticamente identica a quella del trattamento standard; non significatività presente nello specifico anche tra trattamenti. Ciò significa che il metodo introdotto (LiDAR) funziona allo stesso modo del sistema di riferimento (Standard).

  Differenza significativa è invece presente tra blocchi, dalla quale si rileva una percentuale di copertura non uniforme sulla fila relativa al trattamento standard (Tabella 3-2) dove si è passati da un 24% di copertura nel primo blocco ad un 3% e 2% nei blocchi successivi. Tale abbassamento del livello di copertura non è imputabile al cattivo funzionamento del macchinario oggetto di sperimentazione ma probabilmente all'effetto muro della vegetazione. Questo intercorre quando la ventola dell'atomizzatore utilizzata per spingere la miscela irrorata all'interno della vegetazione, viene impiegata a velocità troppo basse.
- Dal confronto tra Vuoti del LiDAR (VL) e Vuoti dello Standard (VS) (Tabella 3-4), si è rilevata una non significatività sul trattamento e sui blocchi, il che significa che il sistema LiDAR ha distribuito come lo standard. Tale risultato tutt'altro che positivo

era tuttavia prevedibile visto il cattivo funzionamento dell'apparecchiatura durante il trattamento.

- Dal confronto tra pieni del LiDAR (L) e vuoti del LiDAR (VL) (Tabella 3-5), allo stesso modo di quanto riportato precedentemente, a causa di tali problematiche non è emersa nessuna differenza significativa, significatività che era attesa nel caso il sistema progettato avesse funzionato correttamente.

Dall'analisi delle percentuali di copertura del secondo rilevamento, effettuato in data 20 luglio, risulta:

- Dal confronto tra pieni del LiDAR (L) e pieni dello Standard (S) (Tabella 3-8) allo stesso modo dell'analogo confronto relativo al primo rilevamento, i risultati sono positivi. Non emerge una differenza significativa tra trattamenti, ciò significa che il sistema LiDAR distribuisce come lo standard ed è quindi equamente efficace. Alla stessa maniera del precedente c'è una variabilità tra blocchi attribuibile alle stesse cause riportate in precedenza (Tabella 3-2; 3-7).
- Dal confronto tra Vuoti del LiDAR (VL) e Vuoti dello Standard (VS) (Tabella 3-9), non emerge una differenza significativa tra blocchi, ma più importante, a differenza di quanto accaduto per il rilevamento precedente, emergono differenze significative tra trattamenti. Questo significa che la macchina progettata è stata in grado di adempire ai suoi scopi facendo registrare una percentuale di copertura media sui vuoti della tesi LiDAR del 12% (rispettivamente Blocco 1: 7,68%; Blocco 2: 12,69%; Blocco 3: 15,83%) (Tabella 3-7); contro una percentuale di copertura media del 24% propria del trattamento Standard (rispettivamente Blocco 1: 36,14%; Blocco 2: 21,31%; Blocco 3: 14,79%) (Tabella 3-2). Da ciò, emerge che il LiDAR riesce a controllare la distribuzione nei vuoti creando una differenza significativa rispetto alla distribuzione standard che ha percentuali di copertura doppie.
- Dal confronto tra i pieni ed i vuoti all'interno del trattamento LiDAR (L e VL) (Tabella 3-10), la variabilità risulta significativa solo sul totale, questo dato fornisce scarse indicazioni in quanto si tratta di una variabilità campionaria, quindi tra tutte le registrazioni. Tale risultato è in contrapposizione con le aspettative ma va tenuto conto che il disegno sperimentale non è stato costruito per confrontare e magnificare questo aspetto ma per valutare la differenza di distribuzione del LiDAR rispetto allo standard, potrebbe quindi non essere adeguato per questo scopo, sia per mancanza di cartine, che per numero di rilevamenti ecc.

In definitiva il sistema LiDAR oggetto di sperimentazione è risultato uno strumento con delle buone potenzialità ma che richiede ancora delle modifiche e ulteriori sperimentazioni per poter essere ottimizzato al fine di essere reso commercializzabile.

Prima fra tutte vi è la necessità di fare in modo che non si presentino più malfunzionamenti come quelli verificatasi durante il primo rilevamento. A tal fine l'ISELQUI technology sta già progettando un ulteriore sistema di controllo costituito da un sensore odometrico, il quale monitorando la velocità di rivoluzione delle ruote è capace di sopperire ad eventuali momenti di vuoto del segnale GPS, continuando a garantire la correlazione tra i punti rilevati dal LiDAR e le loro coordinate geografiche, evitando così, che al verificarsi di tali situazioni, la macchina distribuisca il prodotto in maniera casuale. Tale sensore, sarebbe inoltre in grado di rilevare eventuali slittamenti del mezzo con maggiore precisione andando ad ottimizzare la qualità dell'irrorazione nelle condizioni in cui questo fenomeno viene magnificato (ad esempio i versanti collinari con pendenze rilevanti su interfilare lavorato). In secondo luogo, lo stesso partner, ha provveduto ad inserire un algoritmo che registra il numero di ugelli aperti istante per istante durante il trattamento con il LiDAR attivo. Ciò servirà per verificare, in successive sperimentazioni, eventuali correlazioni con la copertura fogliare e per validare i dati relativi all'uso di miscela di agrofarmaci.

Altre migliorie possono essere suggerite, per quanto riguarda l'acquisizione dei dati, estendendo il numero di rilievi ad un maggior numero di trattamenti, al fine di avere una base statistica più solida in grado di aumentare la significatività di quanto sostenuto.

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati attraverso l'utilizzo di cartine idrosensibili, il protocollo si è dimostrato funzionante ma, seppur opportunamente snellito rispetto a quello utilizzato in precedenza (Tobia, 2020), risulta ancora farraginoso e impegnativo in termini di tempo e richiede comunque l'impiego di una persona che vi si dedichi a tempo pieno. Tale esigenza risulta facile da soddisfare in ottica di progetto, ma sarebbe improponibile qualora estesa a livello aziendale se non supportata da un servizio esterno di elaborazione.

CONCLUSIONI

Nell'attività di ricerca in cui è inserita la presente tesi è stato possibile costruire e mettere a punto un sistema laser-scanner per la distribuzione di trattamenti attraverso atomizzatore. Tale sistema consente di distribuire prodotti in "real-time" attraverso l'analisi dei dati relativi alla copertura fogliare e distinguendo zone con assenza o presenza di copertura fogliare e di conseguenza, variare la dose irrorata. Il prototipo è stato progettato nell'ottica di contenere il più possibile i costi, rendendolo effettivamente applicabile in realtà aziendali di ogni dimensione.

La metodologia di acquisizione dati attraverso l'utilizzo di cartine idrosensibili si è dimostrata valida. La procedura semplificata rispetto alla precedente esperienza (Tobia, 2020) risulta comunque perfettibile in ottica di un'ulteriore riduzione delle tempistiche. Un possibile miglioramento riguardante le operazioni incluse in QGIS è quello di programmare delle "macro" che in automatico sono in grado di applicare reiteratamente tutte le trasformazioni necessarie all'elaborazione delle cartine.

Dall'analisi statistica dei dati è emerso che il sistema LiDAR è in grado di operare sulla vegetazione al pari di un trattamento standard facendo però registrare differenze significative tra blocchi. Inoltre, laddove funzionante, il sistema è stato in grado di regolare la propria portata facendo registrare sulle cartine poste sulle fallanze una media del 50% in meno di copertura rispetto alle cartine poste sulle fallanze del trattamento standard. D'altra parte, è emersa la necessità di estendere i rilevamenti ad ulteriori trattamenti, al fine di confermare quanto emerso e valutare eventuali differenze significative tra pieni e vuoti all'interno del trattamento LiDAR. Tale obiettivo può essere raggiunto equipaggiando il macchinario di un odometro, in grado di monitorare e quantificare eventuali slittamenti delle ruote e soprattutto sopperire ad eventuali errori nella ricezione del segnale GPS. Nell'ottica di ulteriori sperimentazioni negli anni a venire, potrebbe inoltre essere utile la programmazione della scheda elettronica con un ulteriore algoritmo in grado di registrare e georeferenziare il numero di ugelli aperti istante per istante, al fine di valutare un eventuale correlazione tra la quantità di miscela irrorata e la densità della vegetazione. A tale scopo, per misurare la quantità di miscela che durante il trattamento viene intercettata dalla vegetazione e quella che invece

subisce deriva, si possono disporre delle cartine idrosensibili in transetti, nell'interfilare adiacente a quello sottoposto al trattamento.

BIBLIOGRAFIA

Arvidsson, T., Bergstrom, L. & Krueger, J., 2011. Spray drift as influenced by meteorological and technical factors. *Pest management science*, 67(5), pp. 586-598.

Assoenologi, 2020. Viaggio nei vitigni resistenti. *L'enologo,* Issue 1, p. 63.

Backer, G. & Ruhling, W., 1991. Pflanzenschutz in Raumkulturen-Verringerung der Luft-und Bodenbelastung durch Mittelrecycling [Pest control in spatial crops-Reduction of air and soil contamination using recycling techniques]. *Landtechnik,* Issue 3, pp. 119-122.

Balsari, P., Airoldi, G. & Casa, R., 2016. Trattamenti fitosanitari in agricoltura di precisione. In: *Agricoltura di precisione.* s.l.:Edagricole, pp. 301-328.

Balsari, P. et al., 2008. A system for adjusting the spray application to the target characteristics. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal.*

Balsari, P., Marucco , P. & Tamagnone, M., 2000. *Valutazione di diverse tipologie di ugelli antideriva.* s.l., s.n.

Balsari, P. & Marucco, P., 2007. *TOPPS: a European Project aimed at reducing PPP point sources.* Piacenza, s.n., pp. 595-600.

Balsari, P. et al., 2014. *Valutazione dell'entità della deriva e di soluzioni per la sua mitigazione in una realtà viticola e frutticola dell'Emilia Romagna.* Bologna, CLUEB Editrice Bologna, pp. 591-600.

Bedos, C. et al., 2002. Mass transfer of pesticides into the atmosphere by volatilization from soils and plants: overview. *Agronomie,* Issue 22 (1), pp. 21-33.

Bondesan, D. et al., 2012. *Valutazione delle prestazioni di ugelli antideriva nella difesa del melo in Trentino.* s.l., s.n., pp. 119-128.

Capri, E., Padovani, L. & Trevisan, M., 1999. *The prediction of contamination of underground water by phytosanitary products.* s.l.:s.n.

Carter, A., 2000. How pesticides get into water - and proposed reduction measures. *Pesticide Outlook,* pp. 149-156.

Casa, R. et al., 2016. Il telerilevamento in agricoltura di precisione. In: C. R., a cura di *Agricoltura di precisione.* Milano: Edagricole- New Business Media, pp. 69-108.

Chen, Y. et al., 2013. Spray deposition inside tree canopies from a newly developed variable-rate air-assisted sprayer. *Transactions of the ASABE,* 56(6), pp. 1263-1272.

Chen, Y., Zhu, H. & Ozkan, H., 2012. Development of a variable-rate sprayer with laser scanning sensor to synchronize spray outputs to tree structures. *Transactions of the ASABE,* 55(3), pp. 773-781.

Chen, Y. et al., 2013. Spray drift and off-target loss reductions with a precision air-assisted sprayer. *Transactions of the ASABE,* 56(6), pp. 1273-1281.

Cortiella, R. et al., 2011. Innovative LIDAR 3D Dynamic Measurement System to estimate Fruit-tree Leaf Area. *Sensors,* 11(6), pp. 5769-5791.

Damalas, C., 2015. Pesticide Drift: Seeking Reliable Environmental Indicators of Exposure Assessment. In: *Environmental assesment.* Dordrecht: Springer, pp. 251-261.

Doruchowski, G. & Holownicki, R., 2000. Environmentally friendly spray techniques for tree crops. *Crop protection,* 19(8-10), pp. 617-622.

EPPO, E. a. M. P. P. O., 2003. Chapter 9: Non-target terrestrial arthropods. In: *Environmental risk assessment scheme for plant protection products..* s.l.:s.n., pp. 131-139.

Escolà, A. et al., 2017. Mobile terrestrial laser scanner applications in Precision Fruticulture/Horticulture and tools to extract information from canopy point clouds. *Precision agric,* Volume 18, pp. 111-132.

Escolà, A. et al., 2013. Variable rate sprayer. Part 1–Orchard prototype: Design, implementation and validation. *Computers and electronics in agriculture,* Volume 95, pp. 122-135.

Flury, M., 1996. Experimental evidence of transport of pesticides through field soils. *Journal of environmental quality,* I(25), pp. 25-45.

Ganzelmeier, H. & Rautmann, D., 2000. Drift, Drift reducing sprayers and sprayer testing. *Aspects of applied biology,* Issue 57, pp. 1-10.

Garnett, T. et al., 2013. Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. *Science,* Volume 241, pp. 33-34.

Gil, E. et al., 2007. Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection,* 26(8), pp. 1287-1297.

Gil, E. et al., 2013. Variable rate sprayer. Part 2–Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. *Computers and Electronics in Agriculture,* Volume 95, pp. 136-150.

Giles, D., Delwiche, M. & Dodd, R., 1989. Sprayer control by sensing orchard crop characteristics: Orchard architecture and spray liquid savings. *Journal of Agricultural Engineering Research,* Volume 43, pp. 271-289.

Giles, D., Delwiche, M. J. & Dodd , R. B., 1988. Electronic measurement of tree canopy volume. *Transaction of the ASAE,* 31(1), pp. 264-273.

Godfay, C. et al., 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science,* Volume 327, pp. 812-818.

Godfay, H. & Garnett, T., 2014. Food security and sustainable intensification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences,* 369(1639).

Hofman, V. & Solseng, E., 2001. *Reducing spray drift,* s.l.: North Dakota State University.

ISO22866, 2005. *Equipment for Crop Protection-Methods for Field Measurements of Spray Drift.* Geneva, Switzerland,: s.n.

Jeon, H. & Zhu, H., 2012. Development of a variable-rate sprayer for nursery liner applications. *transaction of the ASABE,* 55(1), pp. 303-312.

Jeon, H. et al., 2011. Evaluation of Ultrasonic Sensors for the Variable Rate Tree Liner Sprayer Development. *Computers and Electronics in Agriculture,* 75(1), pp. 213-221.

Jeon, H. et al., 2011. Performance evaluation of a newly developed variable-rate sprayer for nursery liner applications. *Transactions of the ASABE,* 54(6), pp. 1997-2007.

Lee, K. & Ehsani, R., 2008. *A laser-scanning system for quantification of tree-geometric characteristics.* Providence, Rhode Island, s.n.

Lisci, R. et al., 2016. Applicazioni alla viticoltura ed altre colture arboree. In: R. Casa, a cura di *Agricoltura di precisione.* Milano: Edagricole - New Business Media, pp. 377-407.

Liu, H. et al., 2014. Development of digital flow control system for multi-channel variable-rate sprayers. *Transactions of the ASABE,* 57(1), pp. 273-281.

Llorens, J., Gil, E., Llop, J. & Escolà, A., 2010. Variable rate dosing in precision viticulture: Use of electronic devices to improve application efficiency. *Crop Protection,* 29(3), pp. 239-248.

Llorenz, J., Gil, E. & Llop, J., 2011. Ultrasonic and LIDAR Sensors for Electronic Canopy Characterization in Vineyards: Advances to Improve Pesticide Application Methods. *Sensors,* 11(2), pp. 2177-2194.

Matese, A., Di Gennaro, S., Nardi, D. & Potena, C., 2016. Piattaforme a controllo remoto e robotiche per il monitoraggio e la gestione delle colture. In: R. Casa, a cura di *Agricoltura di precisione.* Milano: Edagricole - New Business Media, pp. 109-128.

McIntyre, et al., 2009. *IAASTD (International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development). Global report,* Washington DC: Island Press.

Moltò, E., Martin, B. & Gutierrez, A., 2000. PM—Power and Machinery: Design and Testing of an Automatic Machine for Spraying at a Constant Distance from the Tree Canopy. *Journal of Agricultural Engineering Research,* 77(4), pp. 379-384.

Moltò, E., Martin, B. & Gutierrez, A., 2001. Pesticide loss reduction by automatic adoption of spraying on globular trees. *Journal of agricoltural engeering research,* 78(1), pp. 34-41.

Nilsson, M., 1996. Estimation of tree heights and stand volume using an airborne LiDAR system. *Remote sensing of environment,* 56(1), pp. 1-7.

Palacin, J. et al., 2007. Real-Time Tree-Foliage Surface Estimation Using a Ground Laser Scanner. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* 56(4), pp. 1377-1383.

Pergher, G. et al., 2013. Assessment of spray deposition and recycling rate in the vineyard from a new type of air-assisted tunnel sprayer. *Crop Protection,* Volume 45, pp. 6-14.

Ritchie, J. et al., 1993. Measuring canopy structure with an airborne laser altimeter. *Transactions of the ASAE,* 36(4), pp. 1235-1238.

Rossel-Polo, J. et al., 2009. A tractor-mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: a comparison with conventional destructive measurements. *Biosystems Engineering,* 102(2), pp. 128-134.

Russu, R. & Vieri, M., 2003. *Macchine irroratrici agricole: controlli e tarature per una maggiore efficienza e sicurezza di impiego.* s.l.:ARSIA.

Sachs, J. et al., 2010. Monitoring the World's agriculture. *Nature,* Volume 466, pp. 558-560.

Siegfried, W. & Hollinger, E., 1996. *Application technology in fruit growing and viticulture,* Wadenswill, Switzerland: Report, Swiss Federal Research Station.

Siegfried, W. & Raisigl, U., 1991. First experiences with the Joco-Recycling machine in vineyards. *Swiss magazine for fruit and viticulture,* Issue 127, pp. 154-160.

Solanelles, F. et al., 2006. An Electronic Control System for Pesticide Application Proportional to the Canopy Width of Tree Crops. *Biosystems Engineering,* 95(4), pp. 473-481.

Struik, P. & Kuyper, T., 2017. Sustainable intensification in agriculture: the richer shade of green. A review. *Agronomy for Sustainable Development,* 37(5), p. 39.

Tobia, L., 2020. *Studio preliminare per migliorare la distribuzione di agrofarmaci in vigneto.* s.l.:s.n.

Tsoulias, N., Paraforos, D., Fountas, S. & Zude-Sasse, M., 2019. Estimating canopy parameters based on the stem position in apple trees using a 2D LiDAR. *Agronomy,* 9(11), p. 740.

Tumbo, S. et al., 2002. Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurements of citrus canopy volume. *Applied Engineering in Agriculture,* 18(3), p. 367.

Van den Berg, F. et al., 1999. Emission of pesticides into the air. In: *Fate of pesticides in the atmosphere: implications foe environmental risk assessment.* Dordrecht: Springer, pp. 195-218.

Walklate, P. & Cross, J., 2013. Regulated Dose adjustemeent of commercial orchard spraying products. *Crop Protection,* Volume 54, pp. 65-73.

Walklate, P. et al., 2002. Comparison of different Spray volume Deposition Models using LIDAR measurements of Apple orchards. *Biosystems Engineering,* 82(3), pp. 253-267.

Walklate, P. et al., 1997. Short-range LiDAR measurement of top fruit tree canopies for pesticide applications research in the United Kingdom. *Advances in Laser Remote Sensing for Terrestrial and Oceanographic Applications,* Volume 3059, pp. 143-151.

Wei, J. & Salyani, M., 2004. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 1. Prototype development. *Transactions of the ASAE,* 47(6), p. 2101.

Wei, J. & Salyani, M., 2005. Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 2 . Foliage density measurement. *Transactions of the ASAE,* 48(4), pp. 1595-1601.

Zaman, Q. & Salyani, M., 2004. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurement of citrus tree volume. *Applied Engineering in Agriculture,* 20(2), p. 173.

Zezza, A. & Henke, R., 2018. Produttività e sostenibilità nell'agricoltura europea: verso la viable production e la crescita verde. *Agriregionieuropa,* 14(52).

Zimdahl, R., 2018. *Fundamentals of weed science.* s.l.:Academic press.